

Desenvolvimento do Processo de Laser Cladding com Metais para Fabrico Aditivo

Pedro André de Castro Moura Soares

Orientadores no INEGI: Eng.º João Paulo Touro Pereira
Prof. Rui Jorge de Lemos Neto
Orientador na FEUP: Prof. Fernando Jorge Lino Alves

DISSERTAÇÃO DO MIEM



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2014

*“You have to ask these questions: who pays the piper, and what is
valuable in this life?”*

Robert Plant

RESUMO

Na sociedade atual, a crescente procura de processos de fabrico que rivalizem com os convencionais, encontra no fabrico aditivo uma solução bastante promissora. Especialmente no tratamento de materiais metálicos, a categoria de processos de fabrico aditivo consegue produzir resultados competitivos, no que diz respeito a qualidade, tempo e custos de produção.

Dentro desta gama, destacam-se os processos de deposição direcionada de energia, em particular, os de Laser Cladding, pela enorme margem de progressão que apresentam. Recorrendo à utilização destes processos, torna-se possível a criação de componentes complexos, feitos à medida do cliente, com uma redução significativa de excessos de produção.

Num trabalho que contou com a parceria do INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, a presente tese de mestrado tem como objetivo, em primeiro lugar, dar a conhecer o processo de Laser Cladding, enquadrando-o dentro da categoria dos processos de fabrico aditivo.

Através de uma análise detalhada do estado da arte e de um aprofundamento dos parâmetros de processamento, é possível fornecer ao leitor um conjunto de linhas de guia que permitem tirar maior aproveitamento do processo, no tratamento dos diferentes materiais.

Por último, no capítulo final da dissertação, é realizado um estudo com o objetivo de apresentar uma ou mais soluções de implementação do processo de Laser Cladding, a partir da adaptação de um sistema de corte e soldadura já existente. Nesta fase do trabalho são expostas as limitações existentes para tal adaptação, seguidas da apresentação de um conjunto de medidas a implementar.

Palavras-chave: Laser Cladding, Fabrico Aditivo, Materiais Metálicos, Parâmetros de Processamento, Soluções de Implementação.

ABSTRACT

In the contemporary society, the increasing demand for manufacturing processes that match the traditional ones, finds in additive manufacturing a really promising solution. Specially on the processing of metallic materials, additive manufacturing processes are able to produce fairly competitive results, regarding quality, time and manufacturing costs.

Within this range, manufacturing by directed energy deposition processes, particularly by Laser Cladding, stands out, due to the large margin for progression they present. Employing these processes, the creation of complex, custom made parts, with a significant reduction of production surplus, is now possible.

In partnership with INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, the following master thesis aims, firstly, to make known the process of Laser Cladding and frame it into the category of additive manufacturing.

By a moderately detailed analysis of the state-of-the-art and a deepening study of the processing parameters, it is possible to give the reader a set of guidelines to take advantage of the process, when it comes to handling different materials.

Lastly, in the final chapter of the dissertation, a study is conducted with the goal of presenting one or more solutions for the implementation of the process of Laser Cladding, by the adaptation of a cutting and welding system that already exists. On this stage, the limitations for such an adaptation are exposed and followed by the presentation of a set of measures to implement.

Key words: Laser Cladding, Additive Manufacturing, Metallic Materials, Processing Parameters, Implementation Solutions.

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro João Paulo Touro Pereira e aos Professores Fernando Jorge Lino Alves e Rui Jorge de Lemos Neto, por todo o tempo disponibilizado ao longo do trabalho e por toda a orientação concedida durante o semestre.

Ao Engenheiro Tiago Alves pela ajuda fornecida ao longo do trabalho, tanto por toda a informação e conhecimentos necessários que facultou, como pelo enorme interesse, demonstrado em inúmeras ocasiões.

Ao INEGI e à ADIRA, tanto pela oportunidade concedida para realizar este trabalho, como pela disponibilidade que sempre existiu para ajudar.

Aos meus amigos, que durante os cinco anos de faculdade sempre apoiaram as minhas decisões, estando sempre presentes para me proporcionar momentos que nunca serão esquecidos.

Aos meus familiares, em especial, à minha mãe, por todo o tempo investido em mim, por todos os conselhos fornecidos ao longo da minha vida académica e por terem conseguido que nunca me faltasse nada durante toda a minha vida.

O autor reconhece com apreço o financiamento do Projeto SAESCTN-PII&DT/1/2011, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 – O Novo Norte), ao abrigo do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER)

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
AGRADECIMENTOS	ix
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento Inicial	1
1.2. Estrutura do Documento	1
1.3. Objetivos	2
2. Fabrico Aditivo - Estado da Arte.....	5
2.1. Enquadramento e Aplicações	5
2.2. Crescimento da Indústria e Expectativas Futuras	7
2.3. Processos de Fabrico	8
3. Laser Cladding - Estado da Arte	11
3.1. Esquema de Funcionamento	12
3.2. Deposição da Matéria-Prima	16
3.2.1. Deposição de Pasta	16
3.2.2. Alimentação por Fio Metálico	16
3.2.3. Injeção de Pó	17
3.3. Equipamento Utilizado	18
3.3.1. Fontes de Energia	18
3.3.2. Sistemas de Alimentação de Pó	20
3.3.3. Sistemas de Distribuição de Pó	24
3.4. Vantagens e Restrições Gerais do Processo	25
3.5. Aplicações no Setor Industrial	27
3.5.1. Proteções Superficiais	27
3.5.2. Fabrico Direto de Componentes Funcionais	29
3.5.3. Reparação de Componentes	32
3.6. Ligas de Interesse em Processar	33

4. Laser Cladding - Parâmetros de Funcionamento	37
4.1. Pré-Processamento	38
4.1.1. Pré-Aquecimento dos Materiais	39
4.2. Parâmetros de Processamento	41
4.2.1. Fonte de Energia.....	41
4.2.2. Sistemas de Distribuição do Pó e Especificações do <i>Nozzle</i>	46
4.2.3. Movimentação	55
4.2.4. Fluxo de Gás Inerte	56
4.2.5. Parâmetros Combinados	61
4.3. Pós-Processamento	71
5. Conceção de um Sistema de Laser Cladding a partir de um Sistema de Corte e Soldadura.....	73
5.1. Descrição do Sistema de Corte e Soldadura e seus Componentes	76
5.1.1. Fonte de Energia.....	76
5.1.2. Cabeça de Corte e Soldadura.....	76
5.1.3. Robô.....	77
5.1.4. Mesa de Operações	78
5.1.5. Outros.....	78
5.2. Formulação de Hipóteses para a Introdução do Sistema de Laser Cladding	79
5.2.1. Alteração do <i>Nozzle</i> da Cabeça de Corte e Soldadura	79
5.2.2. Nova Cabeça de Laser Cladding	82
5.3. Verificação das Limitações Existentes na Adaptação do Processo	82
5.4. Apresentação de Soluções de Adaptação	83
5.4.1. Cabeça de Laser Cladding.....	84
5.4.2. Interface Robô-Cabeça	86
5.4.3. Adaptação da Fonte de Energia	88
5.4.4. Alimentação do Pó	88
5.4.5. Geometria dos Movimentos	90
5.4.6. Adaptações Adicionais	90
5.4.7. Conjunto Final e Sumário de Adaptações	92
6. Considerações Finais.....	95
6.1. Conclusões	95
6.2. Trabalhos Futuros.....	96
REFERÊNCIAS	97
ANEXOS	101
Anexo A - Valores Recolhidos de Potências do Laser Aplicadas	101
Anexo B - Valores Recolhidos de Diâmetros do Feixe Laser	103
Anexo C - Valores Recolhidos de Velocidades de Alimentação do Pó	104
Anexo D - Valores Recolhidos de Velocidades de Varrimento	105
Anexo E - Valores Recolhidos de Caudais de Gás Inerte.....	106
Anexo F - Especificações da Cabeça Laserfact F2-Y	107
Anexo G - Área e Eixos de Trabalho do Robô Reis RV60-40	108
Anexo H - Tolerâncias da Flange do Robô Reis RV60-40.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transferência da informação durante um processo de fabrico aditivo; adaptada de [20]	5
Figura 2 - Distribuição das aplicações dos sistemas de fabrico aditivo pelos diversos setores existentes; adaptada de [7]	6
Figura 3 - Utilização dada pelos clientes aos componentes produzidos por fabrico aditivo; adaptada de [7].....	6
Figura 4 - Evolução dos rendimentos (em milhões de dólares) provenientes de produtos e serviços de fabrico aditivo comercializados nas duas últimas décadas; retirado de [7] ...	7
Figura 5 - Evolução dos rendimentos (em milhões de dólares) provenientes das vendas de materiais para processos de fabrico aditivo, na última década; retirado de [7]	7
Figura 6 - Diferentes categorias de fabrico aditivo	8
Figura 7 - Principais processos de fabrico de fusão de camada de pó e de deposição direcionada de energia.....	9
Figura 8 - Esquema de tópicos abordados ao longo do capítulo	11
Figura 9 - Esquema ilustrativo do processo de Laser Cladding; adaptada de [6]	12
Figura 10 - Esquema ilustrativo do percurso do feixe laser num processo de Laser Cladding; imagens retiradas de [1-4]	14
Figura 11 - Esquema ilustrativo do percurso da matéria-prima num processo de Laser Cladding; imagens retiradas de [1, 11, 12]	15
Figura 12 - Processo de administração da matéria-prima na forma de pasta; adaptado de [13]	16
Figura 13 - Processo de administração da matéria-prima por fio metálico; adaptado de [13]	17
Figura 14 - Processo de administração da matéria-prima por injeção de pó; adaptado de [13]	17
Figura 15 - Principais tipos de laser utilizados em processos de Laser Cladding	18
Figura 16 - Sistema de alimentação de pó por gravidade; adaptado de [13]	20

Figura 17 - Sistemas de alimentação de pó por gravidade com diferentes doseadores; adaptado de [13]	21
Figura 18 - Sistema de alimentação de pó por transporte mecânico; adaptado de [13].....	22
Figura 19 - Sistema de alimentação de pó de transporte por gás; adaptado de [13].....	23
Figura 20 - Sistema de alimentação de pó com transporte por vibração; adaptado de [13]...	23
Figura 21 - Sistema de distribuição de pó por <i>nozzle</i> lateral; adaptado de [13]	24
Figura 22 - Sistema de distribuição de pó por <i>nozzle</i> coaxial; adaptado de [13]	25
Figura 23 - Fabrico de um implante de titânio, pelo processo de Laser Cladding (antes e depois do tratamento de acabamento superficial); retirada de [17]	29
Figura 24 - Fabrico de uma pá de turbina, através do processo de Laser Cladding; retirada de [17]	29
Figura 25 - Microestruturas de uma liga Ti-6Al-4V, para um componente fabricado por processos convencionais (à esq.) e para um componente fabricado por Laser Cladding (à dir.); retirada de [17]	30
Figura 26 - Exemplo de reparação de uma turbina pelo processo de Laser Cladding; retirado de [34]	32
Figura 27 - Categorias de <i>Inputs</i> nos processos de Laser Cladding.....	37
Figura 28 - Categorias de <i>Outputs</i> nos processos de Laser Cladding	38
Figura 29 - Resultados obtidos para bases sem pré-aquecimento (à esq.) e bases pré-aquecidas (à dir.); adaptada de [32]	39
Figura 30 - Microestruturas obtidas para bases pré-aquecidas (à esq.) e bases sem pré-aquecimento (à dir.); adaptada da fonte [32]	40
Figura 31 - Influência da potência aplicada na temperatura do pó; adaptada de [26]	42
Figura 32 - Influência da potência aplicada na temperatura do pó, em função da distância percorrida pelas partículas; adaptada de [21].....	43
Figura 33 - Influência da potência aplicada na perda de massa das partículas, em função da distância percorrida; adaptada de [21]	43
Figura 34 - Influência da espessura da camada depositada na rugosidade média das paredes; adaptada de [14]	45
Figura 35 - Influência da espessura da camada depositada na velocidade de arrefecimento; adaptada de [14]	45
Figura 36 - Comparação entre rugosidades obtidas para regime contínuo e regime pulsado; adaptada de [33]	46
Figura 37 - Influência da velocidade de alimentação do pó na altura do revestimento, H; adaptada de [31]	47
Figura 38 - Influência da velocidade de alimentação no perfil de temperaturas do fluxo de pó; adaptada de [21]	48

Figura 39 - Exemplo de resultado obtido para uma administração de pó pouco controlada; retirada de [22].....	48
Figura 40 - Exemplo de resultado obtido para uma administração com um desvio no alinhamento das linhas de centro de fluxo de pó e feixe laser ; retirada de [22].....	49
Figura 41 - Influência do ângulo de incidência no perfil do fluxo de pó; adaptada de [16]	50
Figura 42 - Influência do ângulo de incidência no perfil do feixe laser; adaptada de [16]	50
Figura 43 - Influência do ângulo de incidência na absorção relativa; adaptada de [16]	51
Figura 44 - Influência do ângulo de incidência na eficiência relativa de captação; adaptada de [16]	51
Figura 45 - Influência do ângulo de incidência na geometria do revestimento; adaptada de [16]	52
Figura 46 - Distância à superfície de trabalho (<i>standoff</i>); adaptada de [29]	53
Figura 47 - Influência da distância à superfície de trabalho na captação do pó; adaptada de [15]	53
Figura 48 - Esquema ilustrativo de um processo com deposições combinadas de pó e fio metálico; adaptada de [25]	54
Figura 49 - Influência da deposição combinada de pó e fio metálico no acabamento obtido; adaptada de [25]	55
Figura 50 - Influência do gás inerte na projeção das partículas de pó; retirada de [30]	57
Figura 51 - Influência do caudal de gás inerte na altura do revestimento; retirada de [30] ...	58
Figura 52 - Rugosidade provocada pela oxidação obtida, para um caudal de gás inerte de 2 l/min; retirada de [30]	59
Figura 53 - Rugosidade provocada pela oxidação obtida para um caudal de gás inerte de 12 l/min; retirada de [30]	59
Figura 54 - Esquema ilustrativo de um sistema de Laser Cladding com atmosfera de gás inerte controlada; adaptada de [19].....	60
Figura 55 - Região admissível para trabalhar, mediante os parâmetros de densidade energética do laser e concentração de pó depositado; adaptada de [13]	62
Figura 56 - Influência da densidade energética do laser (relação potência - diâmetro do feixe) na altura do revestimento; adaptada de [30].....	63
Figura 57 - Influência da densidade energética do laser (relação potência - velocidade de varrimento) na altura do revestimento; adaptada de [31]	63
Figura 58 - Influência da densidade energética do laser na largura do revestimento; adaptada de [30]	64
Figura 59 - Dimensões principais do revestimento produzido; retirada de [28]	65
Figura 60 - Influência da densidade energética do laser no nível de diluição ; adaptada de [28]	65

Figura 61 - Influência da densidade energética do laser nas velocidades de arrefecimento; adaptada de [31]	66
Figura 62 - Influência da densidade energética do laser (relação potência - velocidade de varrimento) no tamanho de grão; adaptada de [23]	67
Figura 63 - Ilustração da zona afetada pelo calor presente no processo de Laser Cladding; adaptada de [13]	67
Figura 64 - Variação da largura e profundidade da zona afetada pelo calor com a densidade energética do laser (relação potência - velocidade de varrimento); adaptada de [18]	68
Figura 65 - Porosidade causada pela fusão insuficiente das partículas de pó de uma liga Ti-6Al-4V; retirada de [23]	69
Figura 66 - Porosidade causada pela introdução de gás durante o processo no tratamento de uma liga Ti-6Al-4V; retirada de [23]	69
Figura 67 - Influência da densidade energética do laser (relação potência - velocidade de varrimento) na porosidade obtida, para bases de pequena espessura (à esq.) e bases de grande espessura (à dir.); adaptada de [23]	70
Figura 68 - Influência da concentração de pó depositado (relação velocidade de alimentação - velocidade de varrimento) na altura do revestimento; adaptada de [30]	70
Figura 69 - Exemplo de componente produzido com uma incorreta aplicação dos parâmetros de processamento, antes e depois do tratamento de acabamento; retirado de [24]	71
Figura 70 - Erros evidenciados na produção de componentes, por falta de controlo das dimensões do <i>clad</i> ; retirado de [14]	72
Figura 71 - Exemplo de sistema de controlo das temperaturas geradas no processo de Laser Cladding; retirado de [13]	72
Figura 72 - Metodologia utilizada para a implementação do processo de Laser Cladding	73
Figura 73 - Sistema robotizado atualmente em posse do INEGI	74
Figura 74 - Ilustração de um sistema de Laser Cladding robotizado; retirado de [5]	74
Figura 75 - Exemplo de um sistema de Laser Cladding em atuação; retirado de [10]	75
Figura 76 - Fonte de Laser Rofin FL 030 - versão compacta; retirada de [2]	76
Figura 77 - Cabeça de corte e soldadura Laserfact F2-Y; retirada de [8]	77
Figura 78 - Robô de seis eixos Reis RV60-40, com pormenor ampliado da flange de ligação ..	77
Figura 79 - Módulos periféricos Reis RDM11	78
Figura 80 - Colimador Optoskand com montagem de baioneta QB (à esq.) e fibras óticas Optoskand (à dir.); retirados de [3, 4]	78
Figura 81 - Primeira hipótese de introdução do sistema de Laser Cladding: a) substituição do nozzle; b) introdução de um alimentador de pó (retirado de [11])	79

Figura 82 - <i>Nozzle</i> coaxial de Laser Cladding; retirada de [12]	80
Figura 83 - Segunda hipótese de introdução do sistema de Laser Cladding - cabeça de Laser Cladding; retirada de [9]	82
Figura 84 - Conjunto de Limitações de Adaptação.....	82
Figura 85 - Cabeça de Laser Cladding modelada	84
Figura 86 - Vista pormenorizada do <i>nozzle</i> modelado.....	85
Figura 87 - Esquema do interior da cabeça modelada	85
Figura 88 - Sistema de ligação entre robô e cabeça de Laser Cladding	86
Figura 89 - Zona de aperto dos parafusos M8 e do pino de centragem.....	87
Figura 90 - Interface robô-cabeça	87
Figura 91 - Colocação do alimentador de pó junto à base do robô; retirado de [5]	89
Figura 92 - Alimentadores de pó Twin 10-C da Sulzer-Metco (à esq.) e GTV PF 2/2 (à dir.); retirado de [11, 27]	89
Figura 93 - Módulos periféricos de dois eixos de trabalho.....	90
Figura 94 - Ilustração de um sistema de reciclagem de pó; adaptado de uma imagem fornecida pelo INEGI	91
Figura 95 - Vista geral do sistema robotizado	93
Figura 96 - Vista do acoplamento da cabeça no robô	93
Figura 97 - Vista alternativa do acoplamento da cabeça no robô.....	94
Figura 98 - Vista de topo do sistema robotizado	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de fabricantes de processos de fabrico aditivo para materiais metálicos	10
Tabela 2 - Diferentes comprimentos de onda produzidos pelas diversas fontes laser	19
Tabela 3 - Comparação dos processos de Laser Cladding com outras técnicas de revestimento; adaptado de [13].....	28
Tabela 4 - Comparação dos processos de Laser Cladding com outros processos de fabrico aditivo; adaptado de [13]	30
Tabela 5 - Comparação entre processos de fabrico aditivo de materiais metálicos; adaptado de [39]	31
Tabela 6 - Composição química dos diferentes aços inoxidáveis.....	33
Tabela 7 - Composição química dos diferentes aços de ferramentas	34
Tabela 8 - Composição química das diferentes ligas de níquel.....	34
Tabela 9 - Composição química da liga de cobalto-crómio Stellite 6	35
Tabela 10 - Composição química das diferentes ligas de titânio.....	35
Tabela 11 - Parâmetros de pré-aquecimento das partículas de pó.....	40
Tabela 12 - Restrições e desvantagens associadas à introdução de um <i>nozzle</i> de Laser Cladding	81
Tabela 13 - Conjunto de possíveis adaptações para a implementação do processo de Laser Cladding	92
Tabela 14 - Conjunto de adaptações opcionais para melhorar a eficiência do processo	92

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CNC	Controlo Numérico Computadorizado
D	Diâmetro do Feixe Laser
DDM	Deposição Direta de Metal
DFV	Deposição Física de Vapor
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DQV	Deposição Química de Vapor
E	Densidade Energética do Laser
EBM	Electron Beam Melting
FDPE	Fabrico Direto por Feixe de Eletrões
FFE	Fusão por Feixe de Eletrões
FSL	Fusão Seletiva a Laser
G	Concentração de Pó Depositado
h	Profundidade do Revestimento
H	Altura do Revestimento
M	Velocidade de Alimentação do Pó
MDF	Modelação por Deposição Fundida
P	Potência do Laser
S	Distância da Linha de Centro ao Contorno do Feixe Laser/Fluxo de Pó
SDML	Sinterização Direta de Metal por Laser
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SSL	Sinterização Seletiva a Laser
U	Velocidade de Varrimento
W	Largura do Revestimento
Wp	Índice de Rugosidade

1. Introdução

1.1. Enquadramento Inicial

Devido à crescente redução de custos associados ao equipamento de sistemas laser e com a verificação de avanços significativos na área da engenharia e dos processos tecnológicos, o processamento de materiais metálicos por laser toma especial importância em setores como o automóvel, o aeroespacial e o da medicina.

Pela diversidade de aplicações que possui, especialmente como técnica de fabrico aditivo, o processo de Laser Cladding apresenta-se como um processo emergente na sociedade atual, sendo expectável uma margem de progressão acentuada num futuro não muito distante.

Se, por um lado, é de extrema importância possuir um equipamento fiável que desempenhe eficientemente as funções do processo, por outro, é necessário o *know-how* para a aplicação correta da vasta gama de parâmetros de processamento.

Desta forma, a presente dissertação irá ser dividida em duas partes. A primeira será relativa ao estudo teórico do funcionamento de um sistema de Laser Cladding e a segunda passará pelo estudo prático de possibilidade de implementação do mesmo. Ainda relativamente a esta segunda fase do trabalho, em parceria com o INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, será abordada a possibilidade de implementação do sistema de Laser Cladding, através da adaptação de um sistema de corte e soldadura já existente.

1.2. Estrutura do Documento

A presente dissertação encontra-se estruturada por um capítulo introdutório e cinco capítulos de conteúdo científico, nos quais a informação apresentada aborda temas distintos. De um modo geral, na construção do documento, pretendeu-se partir de uma situação mais generalizada, para se poder, ao longo da leitura, interiorizar conhecimentos mais específicos.

O documento apresentado contempla então seis capítulos. O primeiro apresenta apenas um enquadramento do trabalho realizado, com referência à estrutura do documento e aos objetivos inerentes à conceção da dissertação.

O capítulo 2 constitui uma simples abordagem à gama de processos de fabrico aditivo, especialmente àqueles utilizados no tratamento de materiais metálicos. Neste capítulo, é realizada uma observação à tecnologia utilizada e é feita uma referência a diferentes fabricantes e aplicações no setor industrial.

O terceiro capítulo assenta o seu conteúdo no estado da arte dos processos de Laser Cladding, abordando, de um modo um pouco mais detalhado, as diferentes especificações do processo e os componentes que intervêm nas diversas fases do procedimento.

O capítulo 4 incide mais detalhadamente nos parâmetros de funcionamento dos processos de Laser Cladding, dividindo-os pelas diferentes fases do processo. Neste capítulo, é demonstrada a influência que cada parâmetro exerce no resultado final e são expostos alguns valores de referência utilizados em processos de Laser Cladding.

O quinto capítulo aborda a metodologia utilizada no projeto de adaptação de um sistema de corte e soldadura para desempenhar as funções do processo de Laser Cladding. Após a descrição do sistema de corte e soldadura já existente, é realizada a verificação das limitações existentes na possível adaptação e são apresentadas diversas soluções de implementação, algumas das quais sob a forma de desenhos a duas e três dimensões.

Por último, o capítulo 6 apresenta as considerações finais do estudo, expondo as conclusões retiradas e os trabalhos futuros a realizar, de forma a perceber quais poderão ser os tópicos a abordar em situações futuras. É também abordada a capacidade de industrialização do equipamento, de modo a entender o valor acrescentado que um sistema de Laser Cladding pode fornecer ao mercado industrial.

1.3. Objetivos

O conjunto de objetivos estabelecidos no presente documento pode ser repartido pelos diferentes capítulos abordados. Cada capítulo visa aprofundar diversos assuntos, de diferentes conteúdos científicos. Contudo, a existir um objetivo geral na redação da seguinte dissertação, esse será o de dar a conhecer o processo de Laser Cladding, processo integrante da gama de fabrico aditivo.

Deste modo, os objetivos presentes na tese passarão, de um modo generalizado, pelos seguintes pontos:

- Dar conhecimento do estado da arte dos diferentes processos de fabrico aditivo em materiais metálicos, enquadrando neles, de um modo mais pormenorizado, os processos de Laser Cladding;
- Aprofundar as características e especificações dos processos de Laser Cladding, através de uma abordagem mais detalhada aos parâmetros de funcionamento;
- Fornecer, de um modo geral, linhas de guia na manipulação do equipamento para maximizar o aproveitamento do processo;

- Verificar as limitações existentes na implementação do processo de Laser Cladding, através da adaptação de um sistema de corte e soldadura já existente;
- Apresentar uma ou mais soluções de implementação do processo, com base na formulação de hipóteses para a introdução do sistema de Laser Cladding

2. Fabrico Aditivo – Estado da Arte

2.1. Enquadramento e Aplicações

Com a evolução do setor industrial, existe uma gama de processos de fabrico emergente: o fabrico aditivo. Rivalizando cada vez mais com os processos convencionais, encontra na indústria algo mais do que um nicho.

O fabrico aditivo representa então, de um modo sucinto, a produção de modelos físicos, a partir da conversão de um ficheiro CAD tridimensional num modelo por camadas. Ao contrário dos processos tradicionais de maquinagem, que utilizam um método subtrativo para a obtenção de componentes, através da remoção de material, os processos de fabrico aditivo constroem um produto através da deposição de material, camada por camada. A transferência da informação durante o processo pode ser observada pela Figura 1.

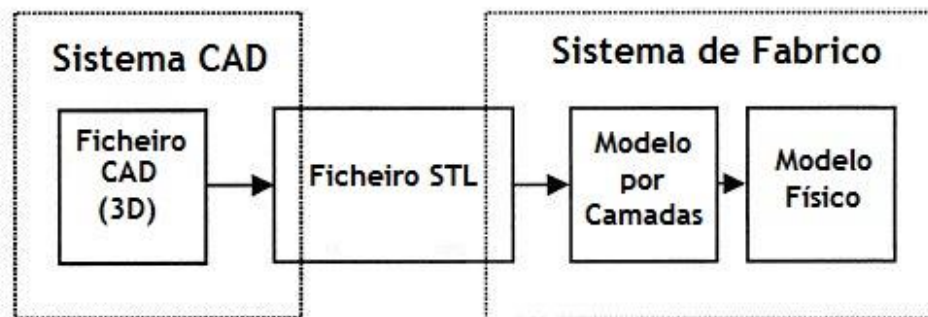


Figura 1 – Transferência da informação durante um processo de fabrico aditivo; adaptada de [20]

Num futuro não muito distante, prevê-se uma expansão acentuada desta gama de processos, pela quantidade enorme de vantagens que pode apresentar. Entre outras, destacam-se as seguintes [7]:

- Produção de componentes de geometria complexa, de baixo peso e com estabilidade estrutural;
- Componentes produzidos “à medida do cliente”, com apenas um passo de produção;
- Reprodutibilidade e precisão;
- Redução do tempo e excessos de produção.

Os processos de fabrico aditivo, até à data, distribuem-se por inúmeros setores. Entre outros, destacam-se o aeroespacial, o da medicina e o dos veículos motorizados, pela vasta margem de expansão que apresentam. Através da Figura 2, é possível visualizar a distribuição das aplicações dos sistemas de fabrico aditivo pelos diversos setores existentes.

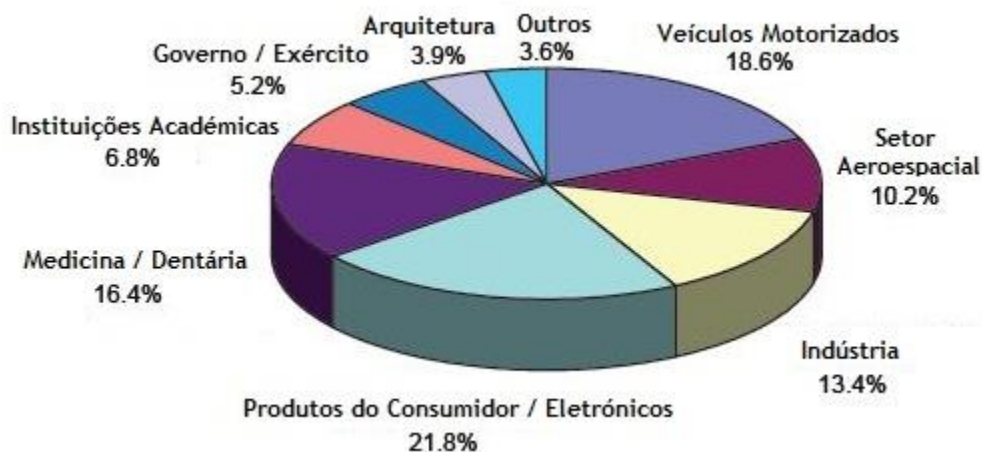


Figura 2 - Distribuição das aplicações dos sistemas de fabrico aditivo pelos diversos setores existentes; adaptada de [7]

Por outro lado, a partir da Figura 3, pode-se observar a utilização dada pelo cliente aos componentes produzidos por esta gama de processos.



Figura 3 - Utilização dada pelos clientes aos componentes produzidos por fabrico aditivo; adaptada de [7]

2.2. Crescimento da Indústria e Expectativas Futuras

Como já foi mencionado, estima-se que num futuro não muito distante, a indústria do fabrico aditivo venha a sofrer uma expansão significativa.

Através das figuras que se seguem, é possível evidenciar o crescimento abrupto do fabrico aditivo nas duas últimas décadas. Em primeiro lugar, a Figura 4, demonstra o aumento dos produtos e serviços de fabrico aditivo comercializados nos últimos vinte anos. As barras a azul representam os produtos, enquanto que as roxas dizem respeito aos serviços.

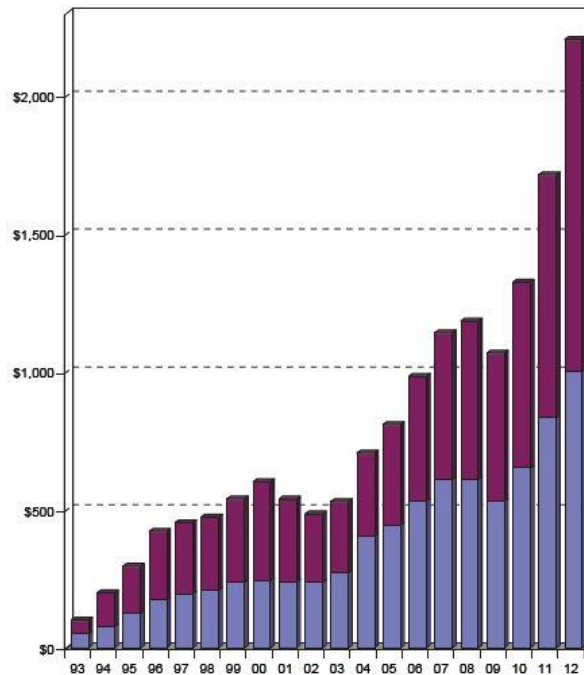


Figura 4 - Evolução dos rendimentos (em milhões de dólares) provenientes de produtos e serviços de fabrico aditivo comercializados nas duas últimas décadas; retirado de [7]

Por outro lado, é também possível verificar os rendimentos das vendas de materiais para processos de fabrico aditivo, através da análise da Figura 5.

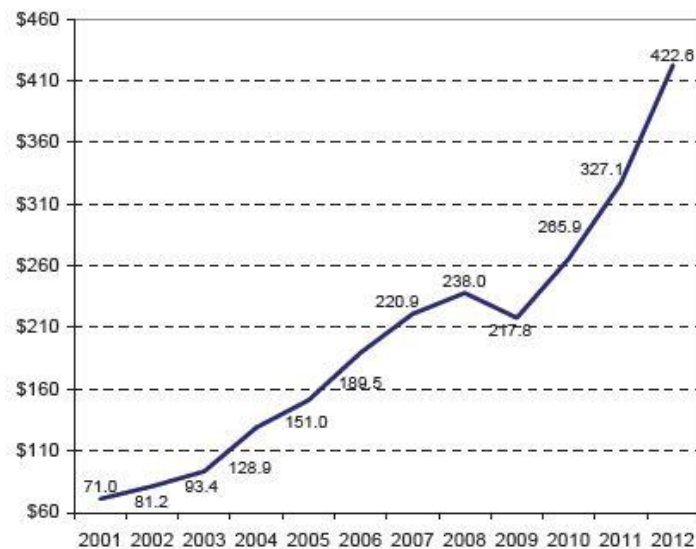


Figura 5 - Evolução dos rendimentos (em milhões de dólares) provenientes das vendas de materiais para processos de fabrico aditivo, na última década; retirado de [7]

2.3. Processos de Fabrico

Na seguinte secção são apresentadas as diferentes categorias de fabrico aditivo, agrupadas por tecnologias utilizadas e matéria-prima processada, dando ênfase aos processos que tratam materiais metálicos. É também realizada uma breve referência a fabricantes de sistemas deste tipo de fabrico.

Em primeiro lugar, é de salientar que não existe muita concordância no que diz respeito às categorias de processos de fabrico aditivo. No entanto, contemplando os diferentes materiais processados e a tecnologia utilizada em cada um dos processos, é possível dividir o fabrico aditivo em seis grandes grupos (Figura 6).



Figura 6 - Diferentes categorias de fabrico aditivo

No que diz respeito a materiais metálicos, pode-se afirmar que os processos de deposição direcionada de energia e os de fusão de camada de pó encontram-se na vanguarda do fabrico aditivo.

Os processos de fusão de camada de pó utilizam energia térmica para fundirem, seletivamente, regiões de uma camada de pó preposicionada. Através de uma fonte laser ou a partir de um feixe de eletrões, a energia é utilizada para fundir o pó que, à medida que arrefece, vai se transformando no estado sólido. Comparando os dois tipos de fonte de energia, é possível verificar algumas vantagens, por parte do laser, no que diz respeito ao acabamento superficial e a nível de custos de equipamento. No entanto, a produção de componentes por feixe de eletrões é mais rápida e leva à formação de menores distorções e tensões residuais [7].

Os sistemas de fusão de camada de pó para o tratamento de materiais metálicos são relativamente caros, quando comparando com outros sistemas de fabrico aditivo. Os custos relativos um sistema deste tipo podem variar entre 120 mil e 1,4 milhões de euros [7].

Por outro lado, os processos de deposição direcionada de energia aproveitam uma fonte de energia térmica para produzir componentes, fundindo o material metálico à medida que este vai sendo depositado. Esta gama de processos apresenta enorme flexibilidade pois serve-se, normalmente, do uso de um sistema CNC multi axial para orientar as movimentações necessárias [7].

A nível de custos de equipamento, esta gama de processos necessita de um grande investimento inicial. Os custos de sistemas de deposição direcionada de energia podem variar entre 350 mil e 1,5 milhões de euros [7].

Através da Figura 7, é então possível visualizar os principais processos de fabrico que fazem parte destas duas gamas.

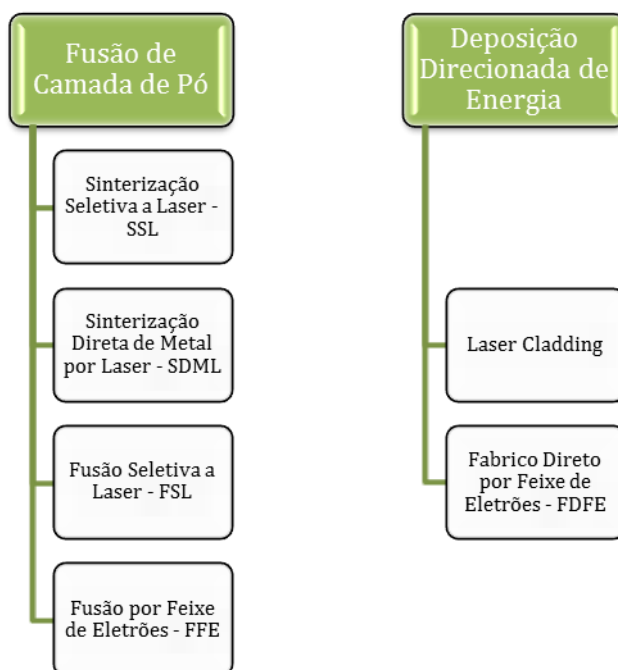


Figura 7 – Principais processos de fabrico de fusão de camada de pó e de deposição direcionada de energia

É de salientar que os processos de Laser Cladding são muitas vezes referenciados pela sigla DDM, deposição direta de metal.

A partir da Tabela 1, podem-se verificar alguns fabricantes e fornecedores de sistemas de fabrico aditivo de materiais metálicos.

Tabela 1 - Exemplos de fabricantes de processos de fabrico aditivo para materiais metálicos

Processo de Fabrico	Fabricante
SSL	Renishaw
	3D Systems
	Aspect
SDML	EOS
	Phenix
FSL	Realizer
	SLM Solutions
	3D Systems
FFE	Arcam
Laser Cladding	Optomec
	Trumpf
	InssTek
	BeAM
	DM3D Technology
	POM
FDFE	Sciaky

No seguinte capítulo, ir-se-á então aprofundar o processo de Laser Cladding, através do estudo detalhado do estado da arte, explicitando de modo claro, as vantagens e aplicações desta gama de processos.

3. Laser Cladding – Estado da Arte

O setor industrial procura constantemente processos inovadores e adequados com vista a melhorar a qualidade dos produtos que concebe, tentando sempre aumentar o número de aplicações, reduzindo, ao mesmo tempo, os tempos de produção e, consequentemente, os custos associados.

Os processos e tecnologias de Laser Cladding surgem cada vez mais como uma das soluções mais apetecíveis, pelo imenso valor acrescentado que conferem à cadeia de produção. Atualmente, encontram-se sob grande foco, pela variedade de produtos e aplicações que conseguem proporcionar, especialmente no tratamento de materiais metálicos, sendo que para este grupo de matérias – primas pode-se verificar uma enorme margem de progressão num futuro não muito distante.

O presente capítulo tem então como objetivos estudar o modo de funcionamento deste grupo de processos e suas aplicações no setor industrial, explicitando de forma clara as vantagens da sua utilização perante outros processos de fabrico aditivo e processos de fabrico convencionais.

Ao percorrer os diversos subcapítulos apresentados na Figura 8, poder-se-á ter noções claras sobre o funcionamento dos processos de Laser Cladding, com uma abordagem simples às especificações mais relevantes, entre elas, a deposição da matéria-prima e o equipamento utilizado.

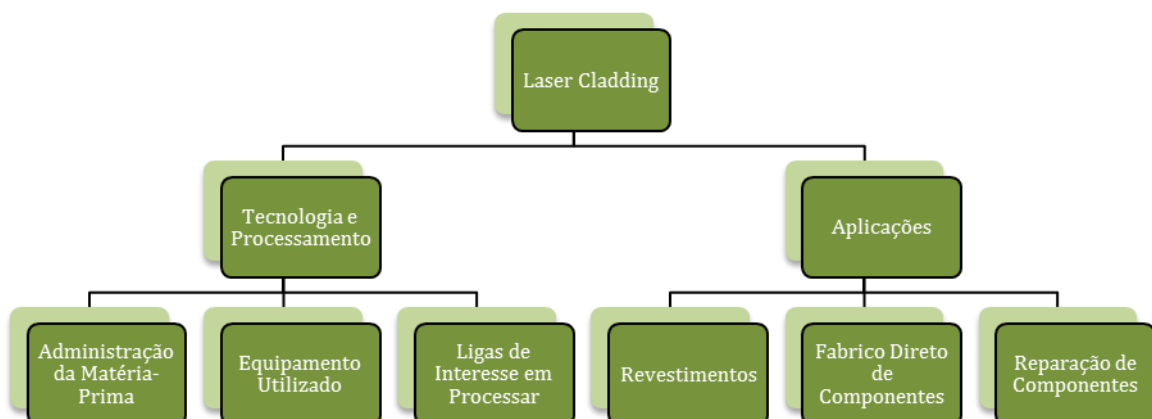


Figura 8 - Esquema de tópicos abordados ao longo do capítulo

Em concordância com o que foi mencionado na explicação dos processos de deposição por energia direcionada, os processos de Laser Cladding servem-se do uso da energia laser para fundir tanto o material base como o material de adição, que, depois da solidificação, formam uma camada fina, denominada *clad* (ou simplesmente revestimento), de elevada densidade e boas propriedades mecânicas. Este tipo de fabrico permite a adição do material numa fase simultânea à da incidência do feixe laser, característica que o torna único perante qualquer outro processo que não faça parte da gama de deposição por energia direcionada. O processo, à semelhança de outros processos de fabrico aditivo, dispõe o material camada após camada, até se obter o componente desejado. Numa fase final, a base pode permanecer no componente ou então retirada através de procedimentos mecânicos.

3.1. Esquema de Funcionamento

Para melhor compreender o funcionamento do processo de Laser Cladding, a seguinte secção tem como objetivo apresentar, de uma forma simplificada e esquematizada, as diferentes características e especificações presentes.

Em primeiro lugar, através da observação da Figura 9, é possível verificar os componentes intervenientes no processo de Laser Cladding. No presente caso, está exposta a administração de pó, num sistema de distribuição coaxial. No entanto, existem outras formas de distribuição e vários tipos de matéria-prima a administrar, pelo que estes serão abordados em secções mais avançadas.

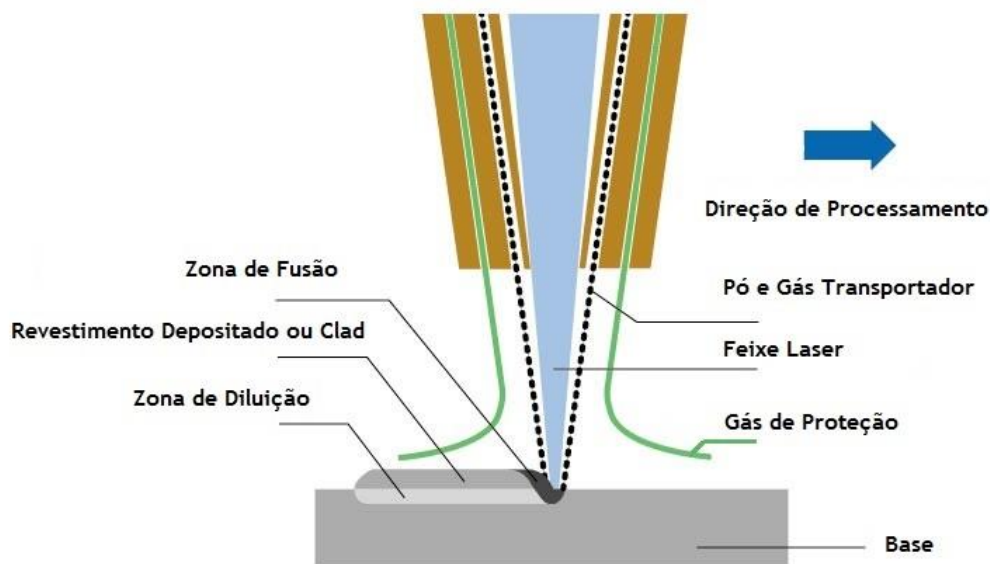


Figura 9 - Esquema ilustrativo do processo de Laser Cladding; adaptada de [6]

Como já foi mencionado, a energia proveniente do feixe laser, incidente, simultaneamente, sobre a base e sobre o material a ser depositado, vai permitir a fusão dos dois materiais, que após solidificação formam o chamado *clad*, ou revestimento.

O nível de penetração do material de adição no material base, chama-se de diluição e esta zona por si marcada vai afetar diretamente as propriedades mecânicas do produto obtido.

Para além do feixe laser e do material fornecido, existe outro interveniente bastante importante no processo de Laser Cladding: o fluxo de gás inerte. Em capítulos futuros, será abordada a importância deste parâmetro. Contudo, pode-se dizer, à partida, que o fluxo de gás inerte, num processo de Laser Cladding, pode ter duas funções. A primeira encontra-se ligada à proteção contra a oxidação, tanto dos componentes envolvidos no processo, como do produto que está a ser gerado. A segunda incide no transporte da matéria-prima, desde o alimentador, até à aplicação da mesma na superfície da base.

O processo de Laser Cladding pode então ser dividido em três vertentes, no que diz respeito aos principais componentes que participam na ação do processo: feixe laser, matéria-prima adicionada e fluxo de gás inerte. Desta forma é interessante perceber o caminho percorrido por cada um destes componentes tem de passar, até os três finalmente convergirem na zona de fusão.

Começando então pelo feixe laser, verifica-se que este tem de percorrer o caminho mais complexo. Após ser produzido na fonte, o feixe é encaminhado para a cabeça de Laser Cladding, através de espelhos refletivos ou fibras óticas, dependendo do tipo de laser. À entrada da cabeça, o feixe é submetido a um estreitamento, por parte do colimador, com o objetivo de o tornar o mais paralelo possível. Com a largura já reduzida, o feixe passa por um conjunto de lentes com diferentes distâncias focais, com o objetivo de ser convergido para um determinado ponto. A última lente, aquela que está mais próxima da superfície de trabalho, vai então ter a função de determinar o ponto focal do feixe laser. Desta forma, será possível definir o diâmetro do feixe que se irá aplicar durante o processo. O percurso descrito pode então ser visualizado na Figura 10.

Por outro lado, a matéria-prima, num percurso bastante mais simples (Figura 11), ao deixar o alimentador, é transportada, normalmente, por uma tubagem flexível, até ao *nozzle*, componente encarregue de a administrar. O *nozzle*, por sua vez, pode estar inserido na cabeça de Laser Cladding, ou então localizado lateralmente. Ainda dentro deste componente, no caso da adição de pó, à matéria-prima junta-se um fluxo de gás, com a função de transportar o material até à superfície de trabalho.

Relativamente ao fluxo de gás inerte, depois de este deixar o reservatório, em que se encontra mantido a uma certa pressão, é distribuído por vários pontos. Em primeiro lugar, o fluxo passa pelo interior da cabeça de Laser Cladding, para evitar a oxidação dos componentes nela presentes (como, por exemplo, as lentes), sendo depois liberto para a superfície. Em segundo lugar, no caso da administração de pó, como já foi mencionado, o fluxo é distribuído para o *nozzle*, com o objetivo de transportar as partículas. Em alguns casos, pode ainda ser distribuído para o alimentador, para desempenhar a mesma função. Por último, o gás inerte pode também ser aplicado diretamente na superfície de trabalho, via *nozzle* lateral, quando se pretende precaver a superfície do revestimento produzido de efeitos de oxidação.

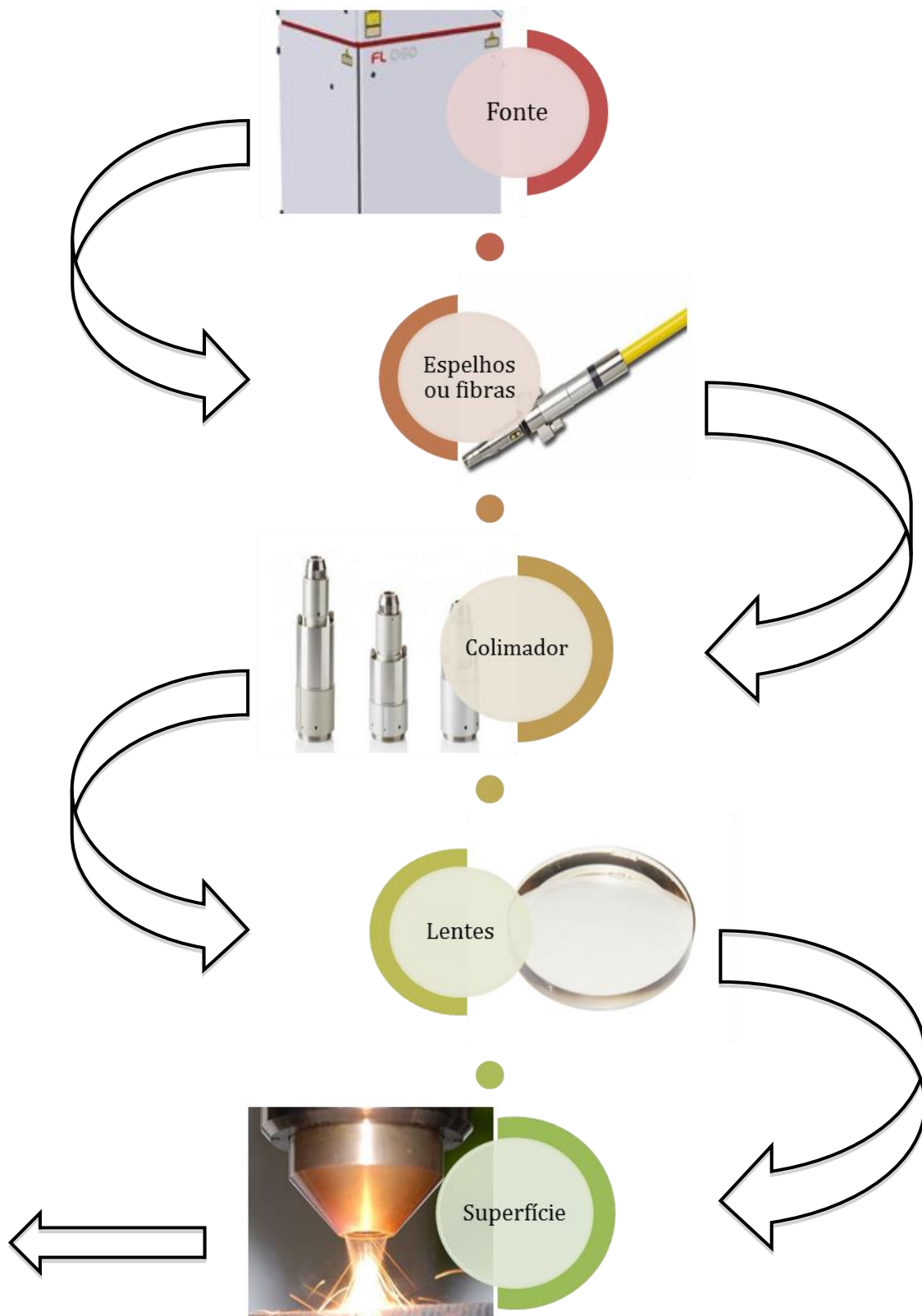


Figura 10 - Esquema ilustrativo do percurso do feixe laser num processo de Laser Cladding; imagens retiradas de [1-4]

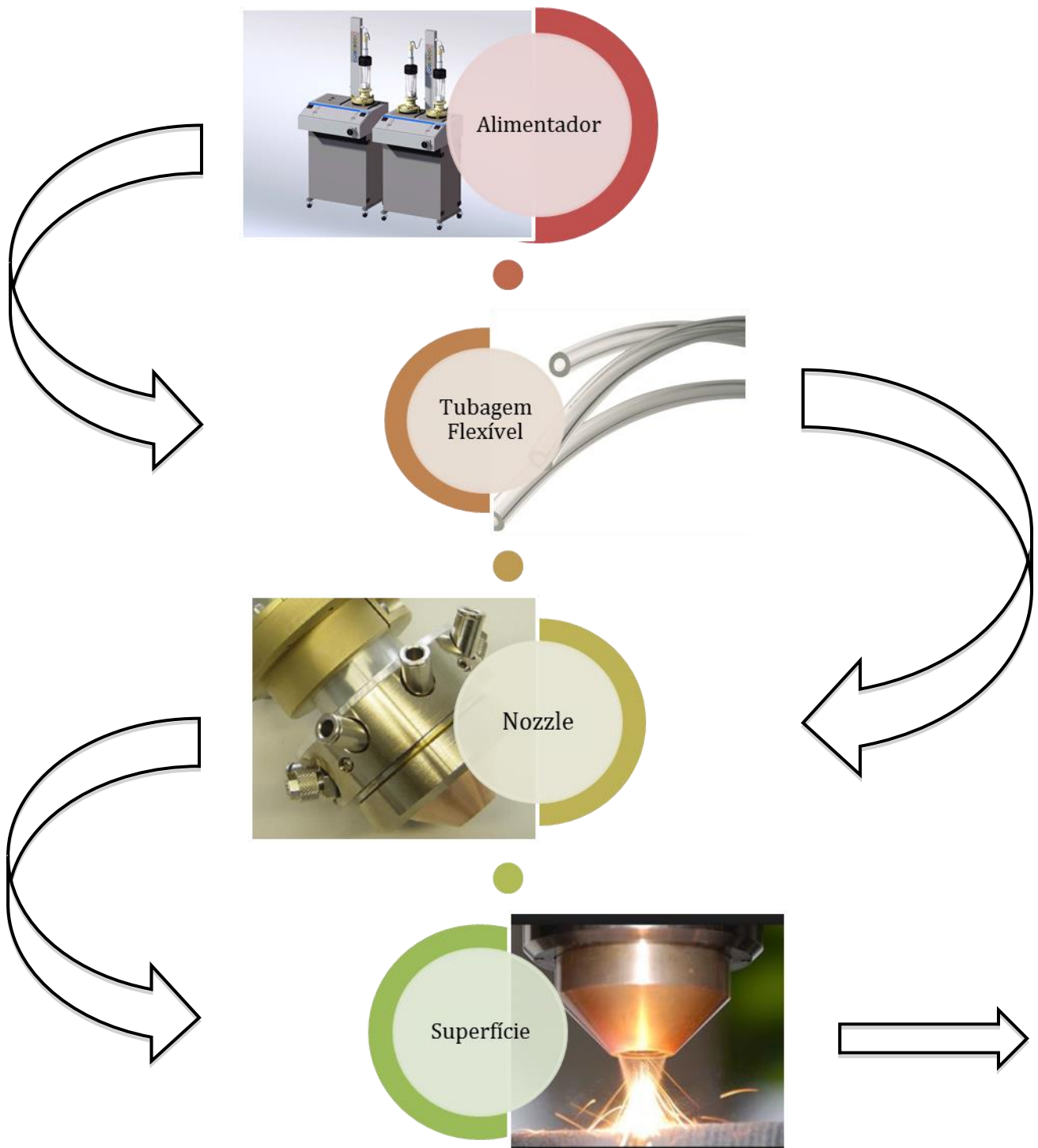


Figura 11 - Esquema ilustrativo do percurso da matéria-prima num processo de Laser Cladding; imagens retiradas de [1, 11, 12]

3.2. Deposição da Matéria-Prima

São várias as hipóteses de deposição da matéria-prima, nos processos de Laser Cladding. As mais comuns passam pela injeção de pós metálicos. No entanto existem outras possibilidades que, por vezes, mediante a aplicação em questão, surgem como alternativas mais viáveis.

3.2.1. Deposição de Pasta

A alimentação na forma de pasta consiste, simplesmente, na deposição de pó misturado com um ligante. De todos, este é o processo menos utilizado (Figura 12), pela dificuldade de controlo que apresenta. Para a deposição se dar de forma correta é necessário, para além de otimizar os parâmetros de velocidade de alimentação da pasta, a utilização de um sistema de alimentação customizado [35].

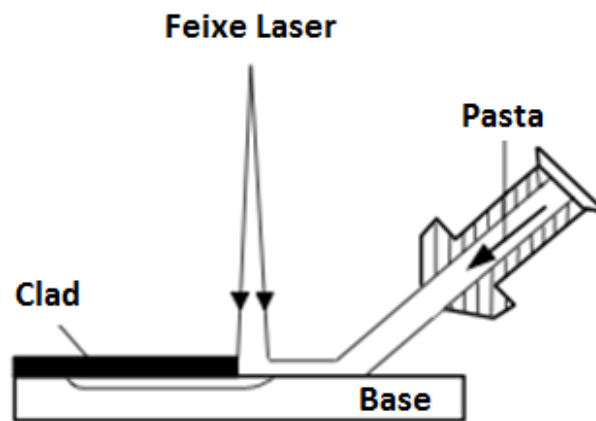


Figura 12 - Processo de deposição da matéria-prima na forma de pasta; adaptado de [13]

3.2.2. Alimentação por Fio Metálico

Na deposição da matéria-prima por fio, apresentado na Figura 13, faz-se uso, normalmente, de um tambor cerâmico que contém o material desejado para aplicar sobre o material base. Este tipo de deposição produz algumas vantagens relativamente aos processos de injeção de pó, pelo que, a nível económico, se conseguem reduzir custos de matéria-prima e excessos de produção. No que diz respeito ao processamento, uma das grandes vantagens reside na fácil adaptação à posição de trabalho [36].

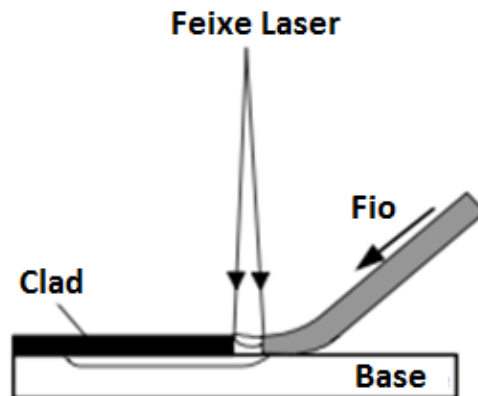


Figura 13 - Processo de deposição da matéria-prima por fio metálico; adaptado de [13]

Apesar de tudo, estudos comprovam que este tipo de alimentação perde mercado por se obter um revestimento com propriedades mecânicas inferiores. Defeitos sob a forma de fissuras são alguns dos problemas mais recorrentes deste tipo de deposição [13].

3.2.3. Injeção de Pó

O processo de injeção de pó (Figura 14), dentro dos processos de deposição de matéria-prima é aquele que é considerado o mais eficiente. Como já foi mencionado, apesar de ser ultrapassado no aspeto económico, a sua superioridade revela-se na obtenção de um produto com melhor qualidade. Para além disso, uma das grandes vantagens passa por não existir contacto direto com o banho de fusão, ao contrário do que acontece com os dois processos anteriormente referenciados. Deste modo, possíveis obstruções do feixe laser pela presença do material de adição nunca ocorrem [13].

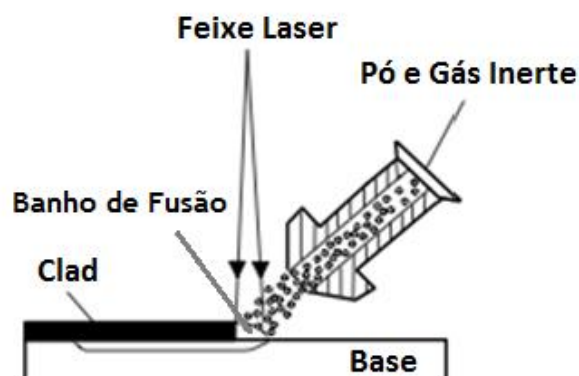


Figura 14 - Processo de deposição da matéria-prima por injeção de pó; adaptado de [13]

3.3. Equipamento Utilizado

Pelas razões apresentadas anteriormente, por ser o processo de deposição de matéria-prima mais utilizado e por ser aquele com mais margem de progressão, no presente capítulo, abordar-se-á o equipamento utilizado nos processos de Laser Cladding, nos quais a aplicação do material de adição é feita por injeção de pó. Desta forma, o equipamento pode ser dividido em três grandes grupos: fontes de energia, sistemas de alimentação e sistemas de distribuição de pó.

3.3.1. Fontes de Energia

Quando se referem fontes de energia, no caso dos processos de Laser Cladding, tal como o nome indica, fala-se dos lasers utilizados durante o procedimento. O estudo individual dos diferentes tipos de lasers existentes e, principalmente, daqueles que são utilizados com mais frequência, contribui significativamente para o desempenho do processo. Não obstante, existem algumas características comuns aos diferentes tipos de fontes. Entre elas, destaca-se o facto de a luz produzida ser bastante “monocromática”, alcançando intervalos de comprimento de onda bastante reduzidos. Por outro lado, destaca-se também o facto de o feixe emitido ser bastante direcional e focado, o que permite a aplicação de elevadas quantidades de energia em pequenas áreas de incidência [13].

No que diz respeito aos lasers utilizados em Laser Cladding, estes podem-se dividir em cinco categorias (Figura 15).

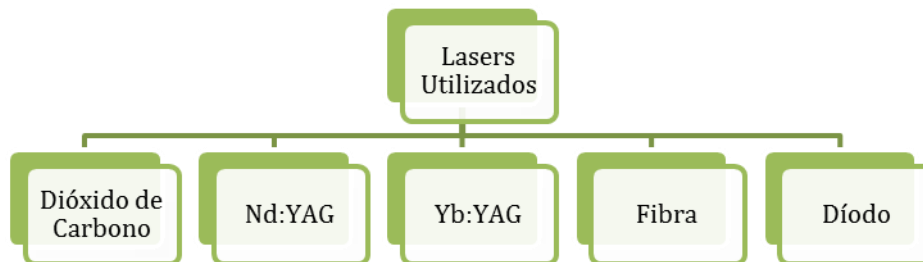


Figura 15 - Principais tipos de laser utilizados em processos de Laser Cladding

Em primeiro lugar, é importante referir que, destes cinco grupos, apenas os lasers de dióxido de carbono constituem fontes de energia de estado gasoso. Os restantes são considerados fontes de estado sólido. Existe ainda outro tipo de laser, denominado de laser de matriz líquida [13]. No entanto, não é recorrente a utilização deste último em processos de Laser Cladding.

Deste modo, é então possível fazer uma breve comparação entre as diferentes fontes utilizadas, no que toca aos principais parâmetros. Em todo o caso, é possível aprofundar os conhecimentos, através da análise realizada aos parâmetros abordados no capítulo 4.

Comprimento de Onda

A Tabela 2 apresenta os diferentes comprimentos de onda produzidos pelas diversas fontes.

Tabela 2 - Diferentes comprimentos de onda produzidos pelas diversas fontes laser

Tipo de Fonte	Comprimento de Onda [nm]
Dióxido de Carbono	10064
Nd:YAG	1064
Yb:YAG	1064
Fibra	1064
Díodo	650 a 950

Eficiência do Laser

No que diz respeito à eficiência do laser, é possível afirmar que as fontes menos eficientes são as de dióxido de carbono e as de Nd:YAG. Com maiores índices de eficiência, apresentam-se os lasers de díodo de elevada potência e os de fibra (próximos de 50%) [13].

Qualidade do Feixe

Relativamente à qualidade do feixe produzido pela fonte laser, é possível afirmar que, mais uma vez, os lasers de díodo de elevada potência e os lasers de fibra encontram-se em vantagem perante os restantes [39].

Meio de Transporte do Feixe Laser

Apenas os lasers de dióxido de carbono têm de ser transportados até à superfície de trabalho através de espelhos refletores. Os feixes dos restantes tipos de fontes podem ser transportados através de cabos de fibra ótica.

3.3.2. Sistemas de Alimentação de Pó

Os sistemas de alimentação constituem uma peça importante para o sucesso do processo de Laser Cladding, pois estão encarregues de gerar a fluidez necessária ao transporte do pó. A escolha apropriada de um sistema de alimentação, bem como dos parâmetros a si associados, tais como velocidade de alimentação e concentração de pó, produz grande parte da eficiência do processo.

Com esta abordagem, pretende-se estudar os diferentes sistemas existentes, categorizando-os pela maneira como transportam o pó, do ponto de partida até ao ponto de entrega.

Existem então algumas soluções construtivas para o sistema de alimentação, entre elas, encontram-se os sistemas baseados em gravidade, os que utilizam dispositivos mecânicos, os que recorrem à utilização de fluídos para o transporte do pó e os vibratórios. Podem também existir soluções mistas, combinando dois ou mais dos sistemas acima referidos.

Transporte por Gravidade

Os sistemas de alimentação por gravidade, apresentados na Figura 16 e na Figura 17, baseiam-se no mesmo princípio de funcionamento de um reservatório ou de uma simples ampulheta. Ao fazer variar a área da secção do orifício de saída, o pó sairá com maior ou menor velocidade. A este processo simples de alimentação, podem-se acrescentar dispositivos de doseamento, para melhor controlar a quantidade de pó a administrar. Na Figura 17 pode-se observar alguns desses dispositivos.

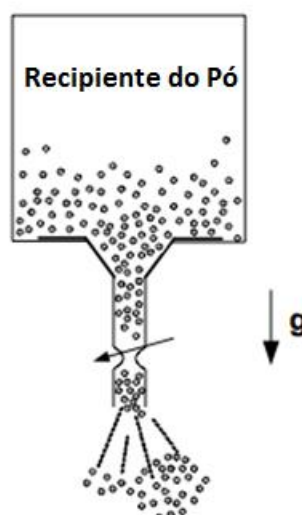


Figura 16 - Sistema de alimentação de pó por gravidade; adaptado de [13]

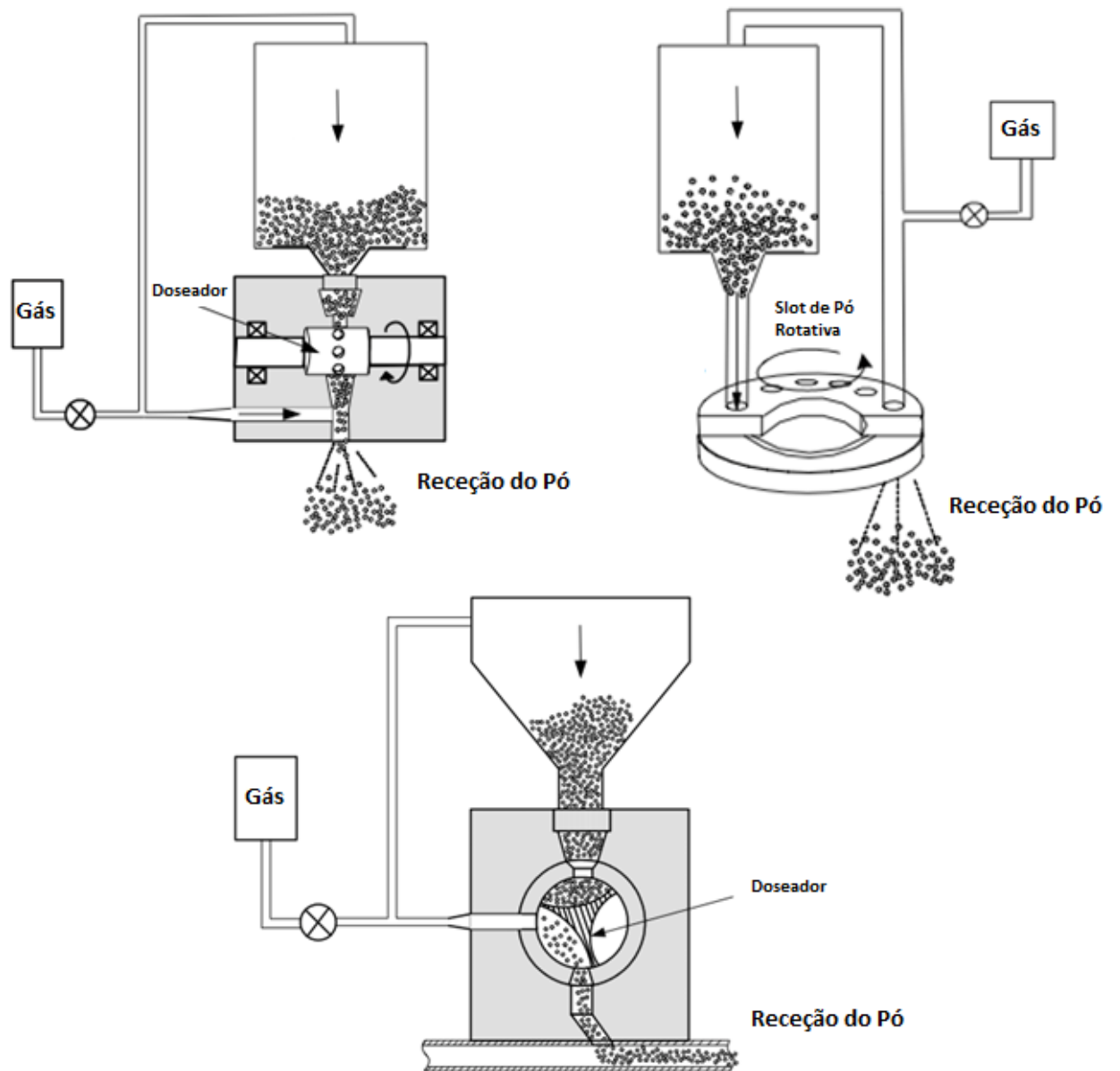


Figura 17 - Sistemas de alimentação de pó por gravidade com diferentes doseadores; adaptado de [13]

Transporte Mecânico (Parafuso Sem-Fim)

O mecanismo de alimentação por parafuso sem-fim (Figura 18), como pode ser observado na figura anterior, serve-se do uso de um parafuso para transportar o pó de uma forma uniforme até à sua entrega. Este tipo de sistema consegue transportar diferentes tipos de pó, mediante o passo do parafuso utilizado e, consoante a velocidade de rotação aplicada, pode proporcionar diferentes velocidades de alimentação. Apesar de tudo, traz como desvantagem o rápido desgaste do mecanismo, aquando do transporte de partículas de pó corrosivas, característica essa que se pode traduzir numa pior qualidade do produto final e em custos de manutenção superiores [13].

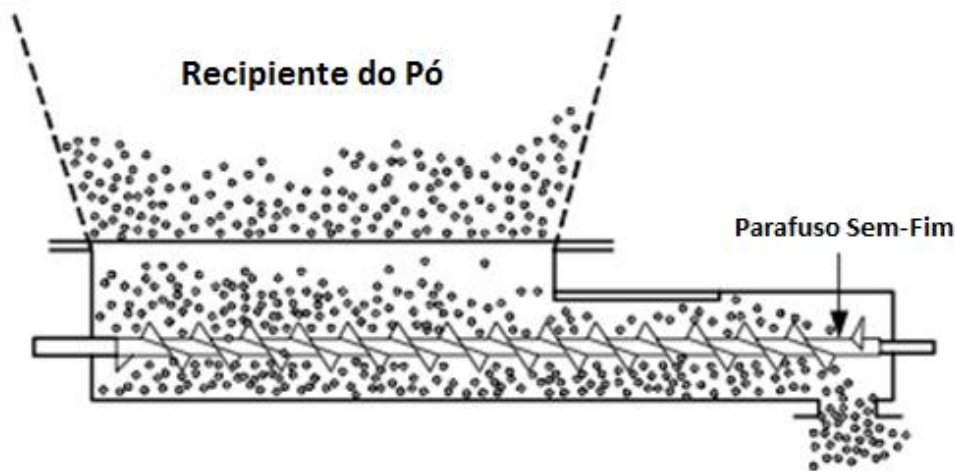


Figura 18 - Sistema de alimentação de pó por transporte mecânico; adaptado de [13]

Transporte por Gás

O sistema de alimentação por gás (Figura 19) assenta nos princípios da mecânica dos fluídos, recorrendo a uma quantidade pré-determinada de gás para transportar o pó necessário para a aplicação. O processo pode ser dividido em duas etapas.

Inicialmente, o fluído é utilizado para mover o pó da câmara até à zona de transporte. Essa quantidade de fluído pré-determinada é obtida através da utilização de um filtro instalado na parte de baixo da câmara. Numa segunda fase, o pó (já na concentração pretendida) é movimentado até ao ponto de entrega, mais uma vez, recorrendo a um determinado gás para o transporte.

Este tipo de mecanismo acarreta algumas vantagens perante os restantes, pelo que consegue proporcionar uma alimentação do pó contínua, quase independente da gravidade, assegurando portanto um bom resultado final. Para além disso, os custos de manutenção são bastante reduzidos [13].

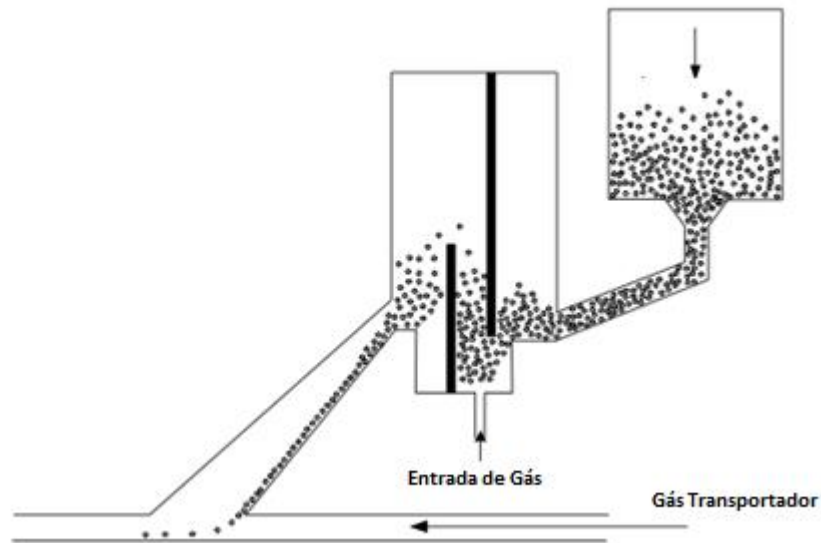


Figura 19 - Sistema de alimentação de pó de transporte por gás; adaptado de [13]

Transporte por Vibração

O mecanismo de alimentação por vibração (Figura 20) consiste, simplesmente, na utilização de tapetes vibratórios para o transporte do pó nas quantidades pretendidas. As vantagens deste tipo de conjunto residem na razoável precisão proporcionada e no alcance grande de velocidades de alimentação que se obtém [13].

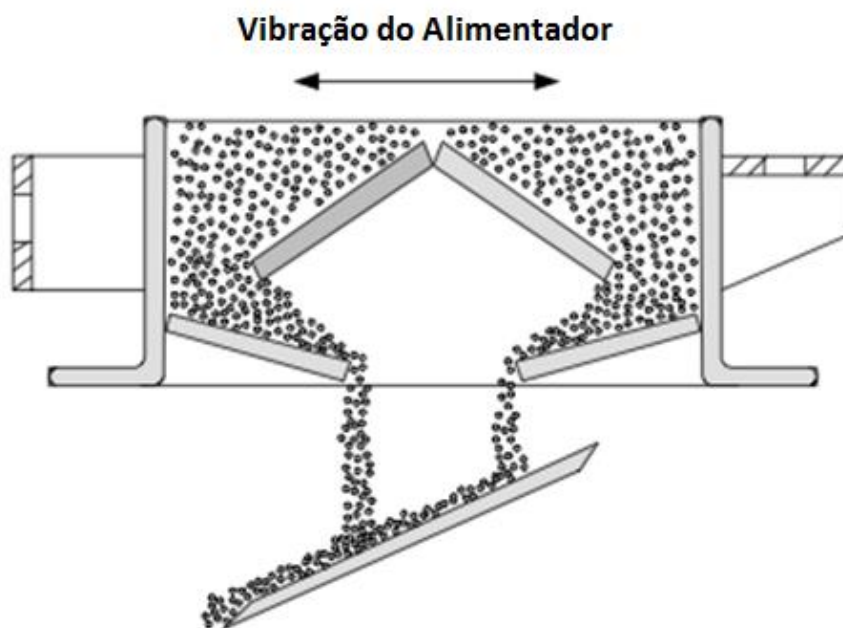


Figura 20 - Sistema de alimentação de pó com transporte por vibração; adaptado de [13]

3.3.3. Sistemas de Distribuição de Pó

Nos processos de Laser Cladding por injeção de pó, a distribuição da matéria-prima é realizada através dos chamados *nozzles*, dispositivos que estão encarregues da aplicação do material de adição no material base. Ao fluxo de pó que é aplicado, junta-se uma proteção de gases inertes para prevenir efeitos de oxidação. A eficiência dos sistemas de distribuição é crucial na qualidade do produto obtido, podendo ser avaliada pela ocorrência de dois fenômenos durante a aplicação da matéria-prima:

- captação das partículas de pó por parte do material base;
- não captação (ricochete) das partículas de pó.

Como será de esperar, numa situação ideal, o ricochete das partículas de pó deverá ser mínimo, conduzindo assim a uma maior eficiência do processo. Para tal, é então necessário reduzir ao máximo a interação de partículas sólidas com a superfície sólida do material base [15]. É neste contexto que uma escolha apropriada do tipo de *nozzle* entra em ação.

Desta forma, apesar de existir uma infinidade de tipos de sistema de entrega do pó, a maior parte deriva de duas soluções construtivas: a lateral e a coaxial.

Lateral

Nos sistema de distribuição de pó com *nozzle* lateral, o mecanismo de administração da matéria-prima encontra-se separado da fonte de energia, como pode ser observado pela Figura 21. Alguns estudos comprovam que, com este sistema, é possível obter-se maior eficiência durante um certo período de tempo [37].

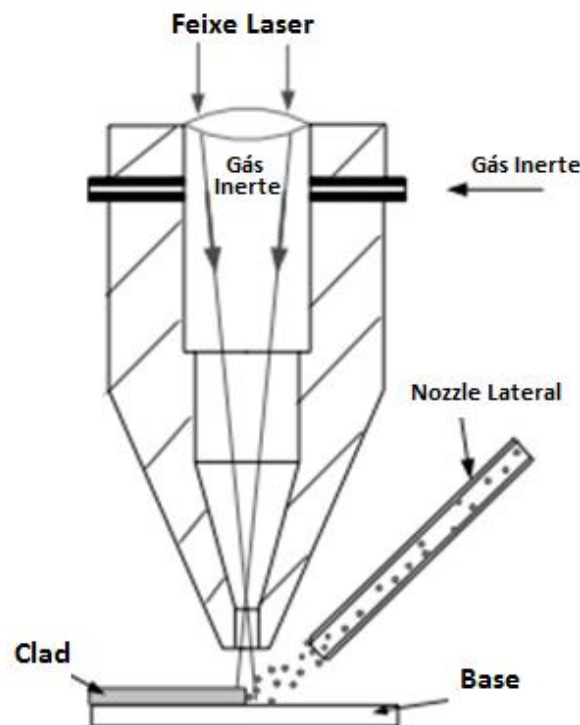


Figura 21 - Sistema de distribuição de pó por *nozzle* lateral; adaptado de [13]

Coaxial

O sistema de *nozzle* coaxial surge como uma evolução do lateral, sendo isso comprovado pela quantidade de vantagens que apresenta. Neste caso, a deposição das partículas do material de adição é realizada em torno do feixe laser (Figura 22). Com esta característica presente, é então possível existir uma independência da deposição do pó em relação ao caminho percorrido durante o processo, o que não acontecia no caso anterior. Zonas de difícil acesso passam agora a ser possíveis de atingir, catapultando assim o número de aplicações no sector industrial para valores bastante superiores.

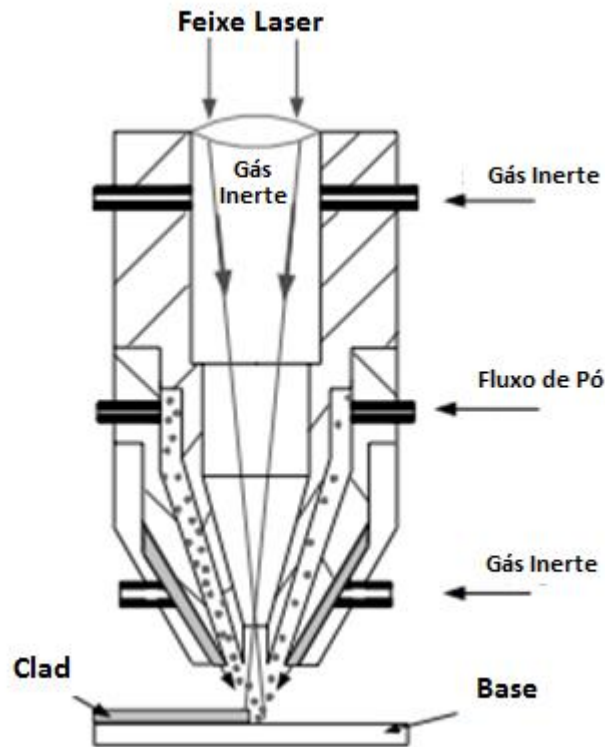


Figura 22 - Sistema de distribuição de pó por *nozzle* coaxial; adaptado de [13]

3.4. Vantagens e Restrições Gerais do Processo

O processo de Laser Cladding apresenta um conjunto vasto de vantagens, tanto a nível da qualidade do produto obtido, como em termos de produção industrial. De um modo geral, pode-se afirmar que o processo consegue atingir um grande alcance de taxas de deposição (quantidade de material depositado por unidade de tempo), com moderados índices de precisão dimensional e rugosidades superficiais mínimas de 10 μ m [38, 39]. É possível obterem-se espessuras de revestimento a partir de 0,05 mm, com larguras a partir dos 0,4 mm [13], chegando a atingir os 12 kg/h de material depositado [40].

No que diz respeito ao produto final obtido, existe um conjunto de fatores que permite a afirmação do processo de Laser Cladding perante outros processos de fabrico aditivo e processos de fabrico convencionais.

Em primeiro lugar, é possível produzirem-se componentes de densidade próxima de 100%, com níveis de distorção e diluição bastante baixos. Aplicando os parâmetros de processamento corretos, torna-se frequente a redução de tratamentos de acabamento, dada a qualidade da superfície gerada. Através de um controlo das temperaturas do processo, é possível manipular as velocidades de arrefecimento e microestruturas obtidas, obtendo assim propriedades mecânicas superiores às intrínsecas do material [30, 41, 42]. Com o mesmo controlo das temperaturas, é também possível produzirem-se zonas afetadas pelo calor bastante reduzidas, eliminando assim a necessidade de tratamentos térmicos para o alívio de tensões [13].

A nível de industrialização da produção, o processo de Laser Cladding traz consigo resultados bastante favoráveis. A principal vantagem reside na criação de componentes de geometria complexa, customizados à medida do cliente. Pelo facto de se produzir diretamente a partir de um ficheiro CAD, sem recorrer a processos intermédios, é possível reduzir o tempo de produção e, conseqüentemente, os custos associados. A redução de excessos de produção é também possível, pois na maior parte dos casos (especialmente no processo por injeção de pó) a reciclagem do material pode ser realizada, pelo que preocupações ambientais são então eliminadas [14].

O processo de Laser Cladding apresenta características únicas perante os restantes processos de fabrico aditivo. Em primeiro lugar, apresenta a possibilidade de adição de mais do que um material, durante a fase de deposição da matéria-prima. A partir deste ponto, é possível criarem-se componentes com camadas de diferentes materiais. Outra vantagem reside na aplicabilidade do processo. Dado o seu modo de funcionamento e dada a possibilidade de juntar o processo a sistemas robotizados de múltiplos eixos, passam-se a poder atingir zonas de difícil acesso. Desta forma, para além do fabrico direto de componentes, torna-se possível atuar na reparação de componentes já existentes, de uma forma bastante mais eficiente.

Por outro lado, o processo de Laser Cladding apresenta também as suas restrições. Em primeiro lugar, e talvez a principal desvantagem do processo, tem a ver com os custos associados ao investimento inicial. Por ser um processo de fabrico ainda em desenvolvimento, os custos relativos à aquisição do equipamento são ainda bastante elevados. Contudo, é possível “amenizar” o investimento inicial, através da frequente eliminação dos tratamentos térmicos e mecânicos, numa fase posterior à da deposição da matéria-prima [38].

Para além do custo, existe outra restrição bastante preponderante. Como poderá ser verificado no capítulo 4, o processo de Laser Cladding envolve bastantes parâmetros de funcionamento. Se não existir o controlo adequado dos mesmos, a qualidade do produto final será posta em causa, pela ocorrência de distúrbios no processo [16, 43].

Por último, e apenas para o caso de algumas fontes de energia, o processo pode pecar por falta de eficiência do laser utilizado. No entanto, esta é apenas uma restrição relevante para alguns tipos de fonte, estimando-se que com a investigação e desenvolvimento de lasers mais recentes, como os de fibra e os de díodo de elevada potência, a eficiência possa ser melhorada [13].

3.5. Aplicações no Setor Industrial

No que diz respeito a processos de fabrico aditivo, os processos de Laser Cladding encontram-se na vanguarda do processamento de materiais metálicos. A quantidade de aplicações que têm no setor industrial salienta a enorme potencialidade e margem de progressão que neste momento já possuem. Atualmente, este tipo de processos, a par de muitos outros da categoria de fabrico aditivo, consegue competir com os processos convencionais, não só pela qualidade do produto que geram, mas também pela capacidade de produção que cada vez mais apresentam.

Deste modo, são três os grandes tipos de aplicações dos processos de Laser Cladding: proteções superficiais, fabrico direto de componentes funcionais e reparação de componentes. No presente capítulo, será então aprofundada a gama de aplicações existentes, tentando sempre estabelecer uma comparação com outros processos de fabrico aditivo e, até mesmo, com processos de fabrico convencionais.

3.5.1. Proteções Superficiais

No revestimento de componentes, realizado através das tecnologias de Laser Cladding, ao material base é acrescentado uma camada fina de um material de adição, conseguindo-se assim um material composto com propriedades superiores ao inicial.

Geralmente, neste tipo de aplicações, o revestimento tem a função de proporcionar uma maior durabilidade ao componente, conferindo maior resistência à corrosão. Melhorias na resistência à oxidação a altas temperaturas, bem como ao desgaste por parte de agentes abrasivos e erosivos são bastante evidentes [44].

A gama de materiais utilizada neste tipo de aplicações é bastante diversificada. Destacam-se os revestimentos de ligas de titânio, níquel e cobalto em aços de ferramentas, aços inoxidáveis, ferros fundidos e ligas de alumínio, pela frequente utilização que apresentam.

Na indústria, são vários os exemplos de componentes revestidos com o auxílio deste tipo de tecnologia, sendo que são cada vez mais aplicações recorrentes na área da medicina, nomeadamente em diversos tipos de próteses e implantes.

De uma forma geral, é possível efetuar-se uma comparação entre os diversos processos de revestimento, de modo a poder perceber as vantagens e desvantagens que os processos de Laser Cladding apresentam perante os restantes. Analisando então processos de revestimento alternativos, entre eles, soldadura, processos de projeção térmica e processos de deposição química e física de vapor (“DQV” e “DFV”, respetivamente), podem-se resumir os resultados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação dos processos de Laser Cladding com outras técnicas de revestimento; adaptado de [13]

Característica	Laser Cladding	Soldadura	Projeção Térmica	DQV	DFV
Tensão da Ligação entre Camadas Depositadas	Elevada	Elevada	Moderada	Baixa	Baixa
Diluição	Baixa	Elevada	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Revestimento	Metálico, Cerâmico	Metálico	Metálico, Cerâmico	Metálico, Cerâmico	Metálico, Cerâmico
Repetibilidade	Moderada a Elevada	Moderada	Moderada	Elevada	Elevada
Zona Afetada pelo Calor	Pequena	Grande	Grande	Muito Pequena	Muito Pequena
Facilidade de Controlo	Moderada a Elevada	Baixa	Moderada	Moderada a Elevada	Moderada a Elevada
Custos	Elevados	Moderados	Moderados	Elevados	Elevados

Como se pode verificar, utilizando os processos de Laser Cladding no revestimento de componentes, conseguem-se obter produtos de boa qualidade, com elevadas tensões de ligação, através de baixa diluição e de uma zona afetada pelo calor reduzida [45]. Apesar de tudo, a tecnologia desta categoria de processos ainda não se encontra suficientemente desenvolvida ao ponto de os custos, no que diz respeito a investimento e manutenção, serem competitivos com os dos restantes processos.

Como exemplos de proteção superficial de componentes, através do processo de Laser Cladding, temos os seguintes:

- Veios de ferramentas de furação;
- Válvulas de motores de combustão interna;
- Revestimentos de ferramentas;
- Componentes de bombas hidráulicas;
- Moldes.

3.5.2. Fabrico Direto de Componentes Funcionais

O fabrico direto de componentes funcionais constitui uma grande parte das aplicações dos processos de Laser Cladding. É cada vez mais recorrente o fabrico direto de peças em materiais como o titânio e o níquel, especialmente nos setores da medicina e medicina dentária e também no setor aeroespacial [19, 41, 45]. Através da Figura 23 e da Figura 24, é possível observar, respetivamente, o fabrico de um implante de titânio e de uma pá de turbina, através do processo de Laser Cladding.



Figura 23 - Fabrico de um implante de titânio, pelo processo de Laser Cladding (antes e depois do tratamento de acabamento superficial); retirada de [17]

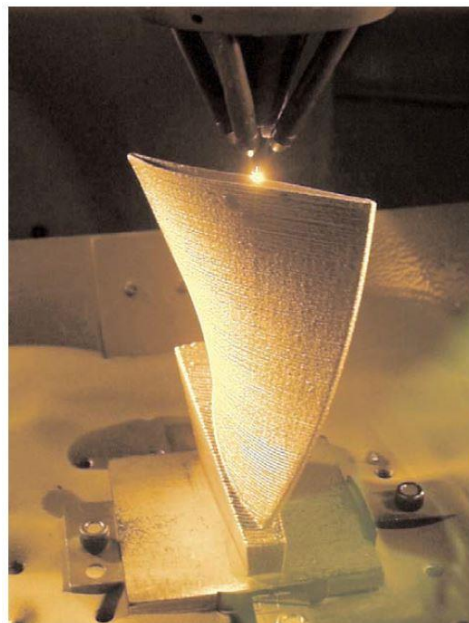


Figura 24 - Fabrico de uma pá de turbina, através do processo de Laser Cladding; retirada de [17]

No caso das aplicações na área da medicina, os componentes fabricados pelo processo de Laser Cladding apresentam algumas características que comprovam a superioridade do processo em relação aos processos de fabrico convencionais. Entre elas, destacam-se a elevada resistência à corrosão, a baixa porosidade (que leva à redução do aparecimento de infeções bacterianas) e o baixo peso dos componentes produzidos [17]. Através da Figura 25, é também possível observar a diferença na homogeneidade da microestrutura de um componente produzido pelo processo de Laser Cladding, em relação a outro fabricado por processos convencionais.

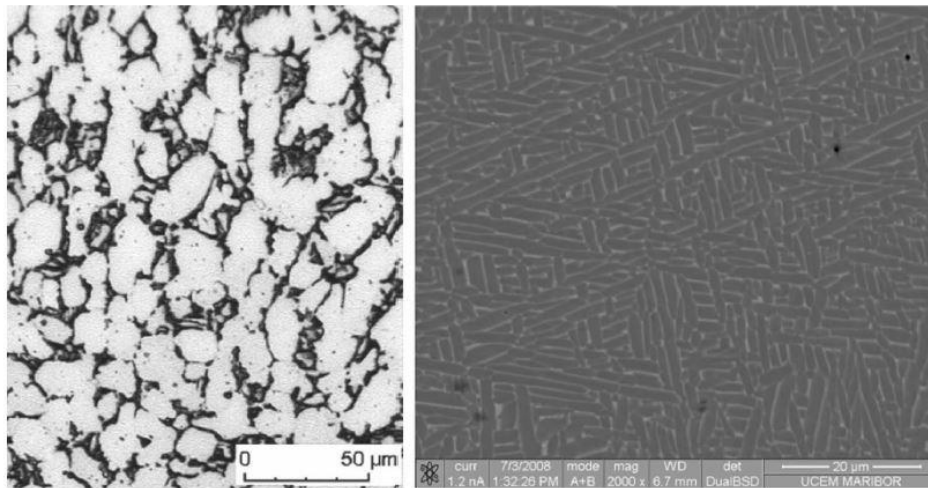


Figura 25 – Microestruturas de uma liga Ti-6Al-4V, para um componente fabricado por processos convencionais (à esq.) e para um componente fabricado por Laser Cladding (à dir.); retirada de [17]

Por outro lado, é também interessante comparar o processo de Laser Cladding com outros processos de fabrico aditivo. Pela análise da Tabela 4, é possível verificar a competitividade do processo, aquando da comparação dos parâmetros de precisão dimensional e qualidade do produto gerado.

Tabela 4 - Comparação dos processos de Laser Cladding com outros processos de fabrico aditivo; adaptado de [13]

Característica	Laser Cladding	Estereolitografia	MDF *	Impressão 3D
Precisão Dimensional	Moderada	Moderada	Moderada a Elevada	Baixa a Moderada
Qualidade do Produto	Elevada	Baixa a Moderada	Elevada	Baixa
Estrutura de Suporte	Não Necessária	Necessária	Necessária	Necessária
Custos de Maquinaria	Elevados	Relativamente Moderados	Moderados	Baixos

* MDF - Modelação por Deposição Fundida 30

Uma outra vantagem dos processos de Laser Cladding encontra-se no facto de, na maior parte dos casos, não necessitarem de estruturas de suporte na produção de componentes, o que torna possível a criação de estruturas com partes suspensas [39].

Como já foi mencionado, mas desta feita nesta categoria de aplicações, o Laser Cladding perde terreno no capítulo dos custos associados ao investimento e manutenção do sistema. No entanto, pelo facto de ainda ser um processo em investigação, estima-se que, num futuro não muito distante, os custos sejam reduzidos pelo desenvolvimento de sistemas mais eficientes (nomeadamente no que diz respeito às fontes de energia) e pela contratação de mão-de-obra qualificada [13].

Por último, pela análise Tabela 5, é possível comparar o processo de Laser Cladding (DMD) com outros processos de fabrico aditivo de materiais metálicos.

Tabela 5 - Comparação entre processos de fabrico aditivo de materiais metálicos; adaptado de [39]

Tecnologia	SLS	DMLS	SLM	EBM	DMD
Fabricante	3D system - DTM Corp.	EOS GmbH	3D system - MTT	Arcam	POM - Easyclad
Taxa de Deposição (cm³/h)	10 -100	7-70	5-20	55-80	10-70
Operações de Pós-Processamento	Limpeza (infiltração) (acabamento)	Limpeza (infiltração) (acabamento)	Limpeza (acabamento)	Limpeza (acabamento)	(acabamento)
Espessura da Camada (µm)*	20-150	20-100	20-100	50-200	-
Rugosidade (µm)	Ra 2	Ra 11	Ra 11	Ra 25-35	Ra 10-25
Precisão Dimensional (mm)*	0,2	0,1-0,2	0,2	0,4	0,3

* Informação do Fabricante

Ainda em relação aos processos de fabrico aditivo em materiais metálicos, e no que toca aos custos associados ao equipamento utilizado, é de salientar que estes variam constantemente de fabricante para fabricante e de produto para produto, sendo então difícil fazer uma comparação entre os mesmos

3.5.3. Reparação de Componentes

Uma das grandes vantagens do processo de Laser Cladding reside na reparação de componentes. Com isto se quer dizer que é possível recuperar componentes que tenham sofrido estragos ao longo do tempo, ou até mesmo, defeitos de fabrico, sem necessidade de substituição [17]. No setor industrial, esta é uma vantagem que qualquer cliente vê com agrado, pois, normalmente, envolve uma redução de custos relativamente ao fabrico de uma nova peça.

Quando comparando com os processos de fabrico tradicionais, especialmente os de soldadura, verifica-se que a reparação de componentes, para o caso do processo de Laser Cladding, é realizada com maior eficiência, principalmente, pelas características de diluição e de zona afetada pelo calor, apresentadas na Tabela 3. Através do controlo adequado das temperaturas no processo de Laser Cladding, é possível combater as principais desvantagens dos processos de soldadura: as elevadas distorções e tensões residuais [18, 46]

As principais aplicações de reparação de componentes apresentam dois focos:

- Pás de turbinas (Figura 26);
- Motores de aeronaves militares;
- Ferramentas de custo elevado.



Figura 26 - Exemplo de reparação de uma turbina pelo processo de Laser Cladding; retirado de [34]

3.6. Ligas de Interesse em Processar

Como se sabe, existe uma variedade imensa de ligas metálicas a serem processadas na gama de aplicações previamente referidas. Entre elas, destacam-se os aços, inoxidáveis e de ferramentas, as ligas de titânio, as ligas de níquel e as ligas de cobalto-crómio, principalmente, pela boa resistência à corrosão e ao desgaste que oferecem.

O presente capítulo tem então o objetivo de apresentar algumas das ligas metálicas mais utilizadas dentro dessa gama (mencionadas também ao longo do trabalho), expondo, de modo claro, as composições químicas das mesmas. É de salientar que, nas seguintes tabelas (Tabelas 6-10), os espaços que se encontram por preencher, respetivos ao elemento principal (por exemplo, o ferro, o níquel e o titânio), têm valores que completam a constituição da liga [47].

Tabela 6 - Composição química dos diferentes aços inoxidáveis

			Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	P	S	N
Aços Inoxidáveis	AISI 316	Mín (%)		16	10	2	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		18,5	14	3	2	1	0,08	0,045	0,03	0,1
	AISI 316L	Mín (%)		16	10	2	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		18,5	14	3	2	1	0,03	0,045	0,03	0,1
	AISI 304	Mín (%)		17,5	8	-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		20	11	-	2	1	0,08	0,045	0,03	0,1
	AISI 317L	Mín (%)		17,5	11	3	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		20	17	4	2	1	0,03	0,045	0,03	-
	AISI 431	Mín (%)		15	1,25	-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		18	3	-	1	1	0,2	0,04	0,03	-

Tabela 7 - Composição química dos diferentes aços de ferramentas

			Fe	Cr	Mo	C	Si	V	Mn	Ni	P	S
Aços de Ferramentas	AISI H13	Mín (%)		4,75	1,1	0,32	0,8	0,8	0,2	-	-	
		Máx (%)		5,5	1,75	0,45	1,25	1,2	0,6	0,3	0,03	0,03
	AISI D2	Mín (%)		11	0,7	1,4	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		13	1,2	1,6	0,6	1,1	0,6	0,3	0,03	0,03

Tabela 8 - Composição química das diferentes ligas de níquel

			Ni	Cr	Mo	Nb	Ta	Fe	Co	Mn	Si	Al	Ti	Cu	C	P	S	
Ligas de Níquel	Inconel 600	Mín (%)		14	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Máx (%)		17	-	-	-	10	-	1	0,5	-	-	0,5	0,15	-	0,015	
	Inconel 625	Mín (%)		20	8	3,15	3,1	-	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		23	10	4,15	4,2	5	1	0,5	0,5	0,4	0,4	-	0,1	0,015	0,015	
	Inconel 690	Mín (%)		27	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		31	-	-	-	15	-	0,5	0,5	-	-	0,5	0,05	-	0,015	
	Inconel 718	Mín (%)		17	2,8	4,75	-	*	-	-	-	0,2	0,65	-	-	-	-	-
		Máx (%)		21	3,3	5,5	-	*	-	-	-	0,8	1,15	-	-	-	-	-

Tabela 9 - Composição química da liga de cobalto-crómio Stellite 6

			Co	Cr	W	C	Fe	Ni	Mn	Si	Mo
Ligas de Cobalto-Crómio	Stellite 6	Mín (%)		28	3,5	0,9	-	-	-	-	-
		Máx (%)		32	5,5	1,9	3	3	2	2	1,5

Tabela 10 - Composição química das diferentes ligas de titânio

			Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
Ligas de Titânio	Ti CPI (grau 1)	Mín (%)		-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		-	-	0,02	0,15	0,08	0,03	0,015
	Ti CPI (grau2)	Mín (%)		-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		-	-	0,3	0,25	0,08	0,03	0,015
	Ti CPI (grau 3)	Mín (%)		-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		-	-	0,3	0,35	0,08	0,05	0,015
	Ti CPI (grau 4)	Mín (%)		-	-	-	-	-	-	-
		Máx (%)		-	-	0,5	0,40	0,08	0,05	0,015
	Ti-6Al-4V	Mín (%)		5,5	3,5	-	-	-	-	-
		Máx (%)		6,75	4,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,015
	Ti-6Al-4V ELI	Mín (%)		5,5	3,5	-	-	-	-	-
		Máx (%)		6,5	4,5	0,25	0,13	0,08	0,05	0,012

4. Laser Cladding – Parâmetros de Funcionamento

Após uma abordagem inicial ao estado da arte dos processos de Laser Cladding e seus modos de funcionamento, na seguinte fase do trabalho, pretende-se explicitar os parâmetros de processamento mais importantes presentes ao longo do processo, desde o pré-processamento até ao produto final obtido. De um modo claro, tem-se como objetivo demonstrar a influência que cada parâmetro pode ter, individual ou conjuntamente com outros, na qualidade e rendimento do procedimento.

Deste modo, é importante ter em consideração que os parâmetros podem ser divididos em duas categorias: *Inputs* e *Outputs*. Neste quarto capítulo, é realizada tanto uma descrição como uma avaliação da preponderância dos chamados *Inputs* (Figura 27) na obtenção dos *Outputs* (Figura 28), parâmetros que determinam a qualidade do produto final.

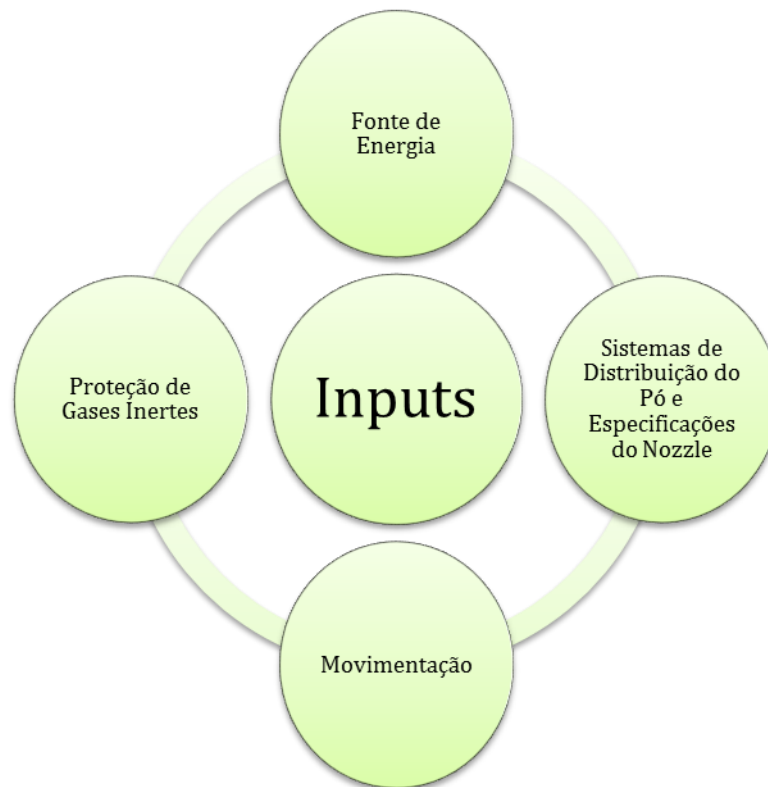


Figura 27 - Categorias de *Inputs* nos processos de Laser Cladding

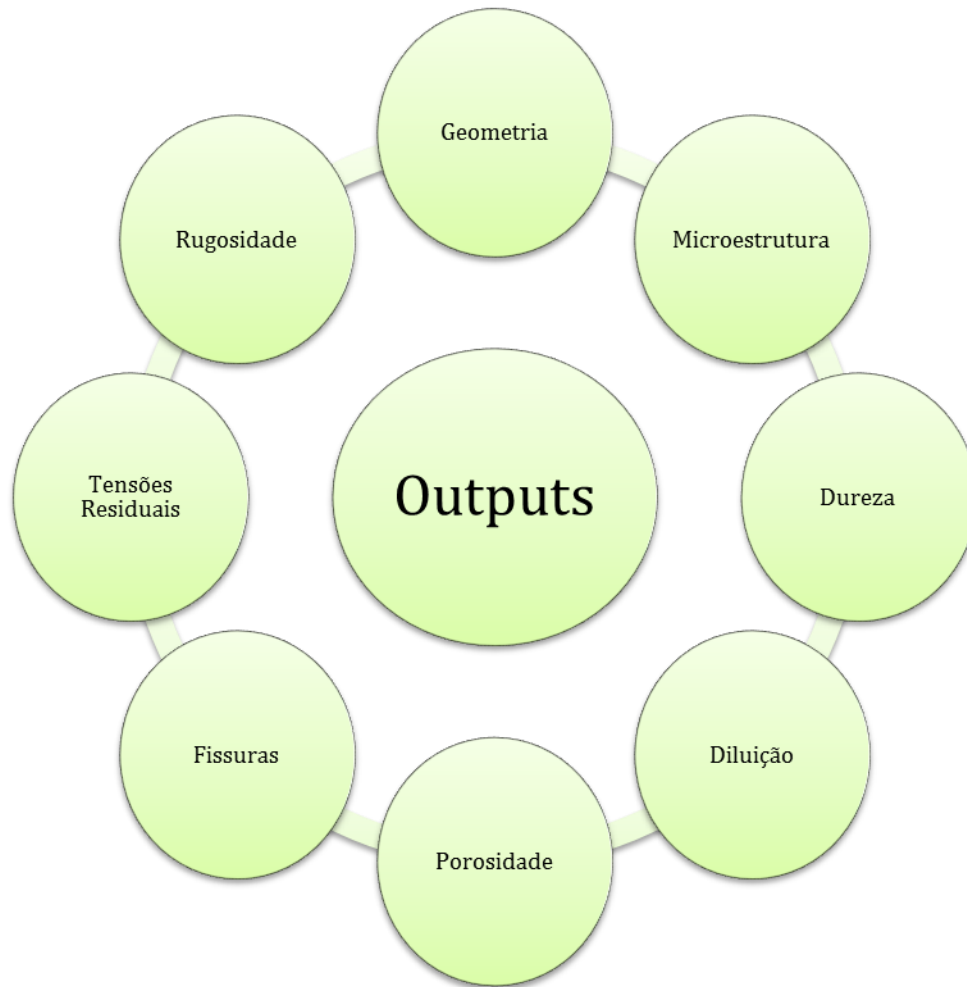


Figura 28 - Categorias de *Outputs* nos processos de Laser Cladding

Ao longo das próximas secções, poderá então ser observada a descrição de alguns dos parâmetros mais importantes, agrupados em três fases do procedimento: pré-processamento, processamento em si, ou fase de deposição, e pós-processamento. Para além disso, serão expostos alguns valores de referência para os vários parâmetros, no tratamento das diversas ligas e na utilização de diferentes equipamentos.

4.1. Pré-Processamento

Com vista a maximizar o rendimento do processo de Laser Cladding ou até mesmo evitar problemas no tratamento de diferentes materiais, existe um conjunto de medidas que podem ser tomadas numa fase anterior à do processamento em si. Na secção que se segue são então expostas e explicadas algumas dessas medidas, especialmente relacionadas com o pré-aquecimento dos materiais.

4.1.1. Pré-Aquecimento dos Materiais

Numa fase inicial, antes da deposição em si, o tratamento térmico, tanto do material base, como do pó a ser injetado, pode revelar frutos no rendimento global do processo, evitando até mesmo problemas indesejáveis.

Material Base

No que diz respeito ao material base, um pré-aquecimento pode melhorar significativamente o rendimento do processo. As vantagens deste procedimento assentam na melhor condução de calor que é gerada na superfície da base [48]. Desta forma, é possível promover uma maior adesão das partículas de pó aquando da fase de deposição, como também a redução de tensões superficiais que podem levar ao aparecimento de fissuras [49].

Num estudo realizado pelo departamento de engenharia mecânica da universidade de Waterloo [32], é possível verificar as diferenças significativas entre os resultados obtidos com bases pré-aquecidas e não aquecidas. No processamento de uma liga de cobalto-crómio sobre uma base de aço ligado, a formação de fissuras é evidente para bases não aquecidas (Figura 29).

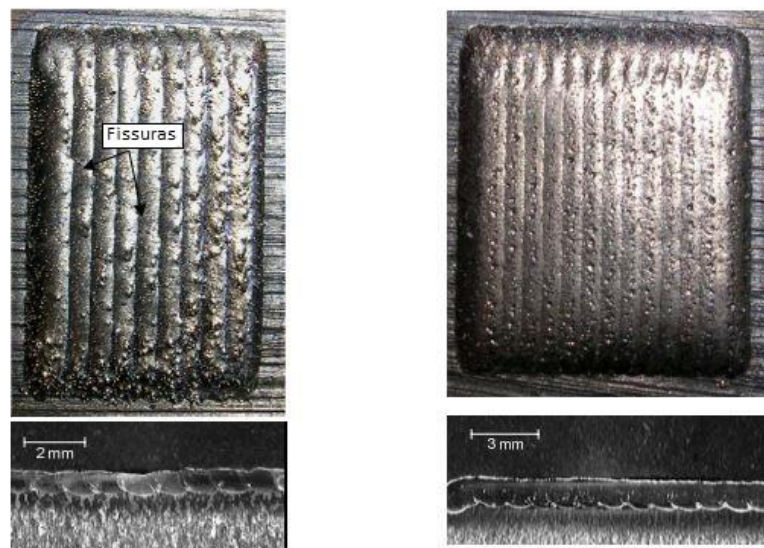


Figura 29 - Resultados obtidos para bases sem pré-aquecimento (à esq.) e bases pré-aquecidas (à dir.); adaptada de [32]

Através de um arrefecimento significativamente mais lento, como acontece nas placas pré-aquecidas, é possível obterem-se microestruturas mais homogêneas (Figura 30) e deposições mais consistentes, sendo o aparecimento de defeitos menos recorrente.

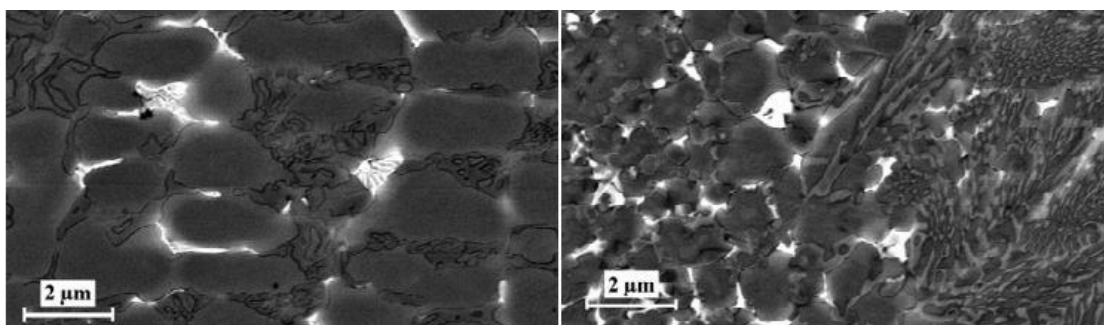


Figura 30 - Microestruturas obtidas para bases pré-aquecidas (à esq.) e bases sem pré-aquecimento (à dir.); adaptada da fonte [32]

Partículas de Pó

Relativamente ao pó administrado no processo de Laser Cladding, é de salientar que o seu pré-aquecimento pode, não só melhorar o rendimento do processo, como também prevenir eventuais bloqueios do *nozzle* durante a injeção. Ao efetuar-se uma secagem prévia, conseguem-se eliminar problemas de humidade entre as partículas, garantindo assim uma deposição consistente e, conseqüentemente, o bom funcionamento do processo [43] .

Várias experiências provam a eficácia do pré-aquecimento das partículas de pó (Tabela 11), contudo, não existe uniformidade nos parâmetros de temperatura e tempo de estágio do procedimento, podendo estes variar de liga para liga. Por outro lado, a secagem pode também ser realizada em locais diferentes, como por exemplo na câmara do alimentador de pó do sistema, ou até mesmo num forno, em vácuo.

Tabela 11 - Parâmetros de pré-aquecimento das partículas de pó

Liga Processada	Temperatura de Aquecimento (°C)	Tempo de Estágio (h)	Local de Secagem	Referência
Inconel 625	55	-	Câmara do Alimentador	[45]
Ti-6Al-4V	120	5	Forno (Vácuo)	[43]
Ni20	150	24	Forno (Vácuo)	[30]

4.2. Parâmetros de Processamento

Na fase de deposição da matéria-prima, os parâmetros mais relevantes podem ser agrupados nas categorias expostas na Figura 27. É de salientar que o resultado final pode não ser linearmente dependente de cada parâmetro por si só, mas sim da combinação entre eles. Desta forma, foi criada uma subsecção, intitulada “Parâmetros Combinados”, situada no final da secção, com o intuito de demonstrar a influência que a combinação dos diversos parâmetros pode ter no tratamento dos vários materiais.

4.2.1. Fonte de Energia

Relativamente à fonte de energia, mais propriamente, ao tipo de laser utilizado no sistema, são vários os parâmetros que merecem destaque pela importância que têm no processo, entre eles o comprimento de onda da radiação, a potência aplicada e o diâmetro do feixe.

Comprimento de Onda

O comprimento de onda da radiação emitida durante o processo está claramente associado ao tipo de laser utilizado. Nos processos de Laser Cladding a sua importância reside no facto de poder condicionar diretamente a potência a aplicar durante o procedimento.

Cada tipo de fonte de energia produz comprimentos de onda diferentes. A título de exemplo, no caso dos lasers Nd:YAG e lasers de fibra, o comprimento de onda é aproximadamente 1064 nm, ao passo que nos lasers de CO₂, o comprimento de onda gerado é dez vezes maior. Este fator tem repercussões diretas na percentagem de energia absorvida, ao ponto de esta ser bastante menor para o caso das fontes de CO₂. Consequentemente, para este tipo de lasers é frequentemente necessária a aplicação do dobro da potência, para se atingir a mesma taxa de deposição obtida pelas fontes de fibra e Nd:YAG.

Outro fator diretamente relacionado com o comprimento de onda do laser reside no modo de transporte do feixe, desde a fonte até à cabeça de Laser Cladding. Enquanto que os feixes produzidos por lasers Nd:YAG e lasers de fibra podem ser transportados por fibra ótica, aqueles produzidos por lasers de CO₂ têm de ser conduzidos por espelhos refletores. Esta característica é preponderante na flexibilidade do processo, pois no caso das fonte de CO₂, o feixe torna-se limitado de movimentos (feixe estacionário). Por outro lado, na condução de feixes por fibra ótica, existe maior liberdade de movimentação, sendo por isso possível tirar maior proveito desta situação num sistema CNC de vários eixos [50].

Potência Aplicada

A potência do laser introduzida no tratamento das diferentes ligas é talvez dos parâmetros mais importantes para o bom funcionamento do processo de Laser Cladding. A influência que tem sobre diversos fenómenos físicos que acontecem

durante o procedimento é notável. Contudo, este parâmetro, por si só, não demonstra toda a relevância que tem no processo, isto é, quando combinado com outros parâmetros de processamento, a sua preponderância fica mais exposta.

Apesar de tudo, é possível avaliar a influência da potência do laser aplicada nos processos de Laser Cladding. Em primeiro lugar, no tratamento das diversas ligas, é possível observar a importância da potência no perfil de temperaturas do material adicionado. Existe, à partida, uma relação óbvia a reter: com o aumento da potência introduzida no processo, a temperatura do pó adicionado sofre também um incremento. Essa relação pode ser verificada, por exemplo, através da observação da Figura 31, no tratamento de um aço de ferramentas [26].

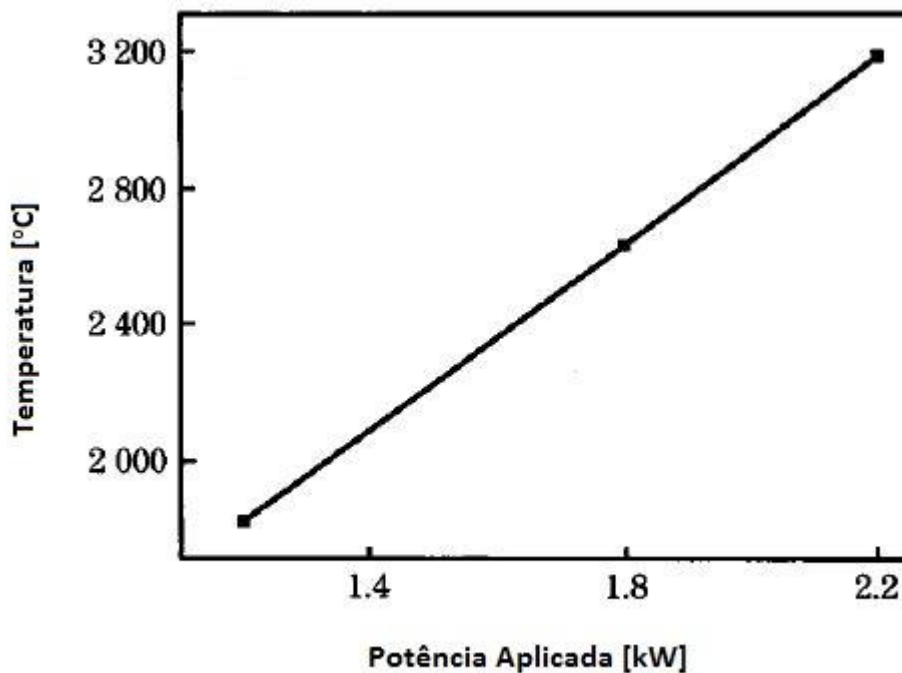
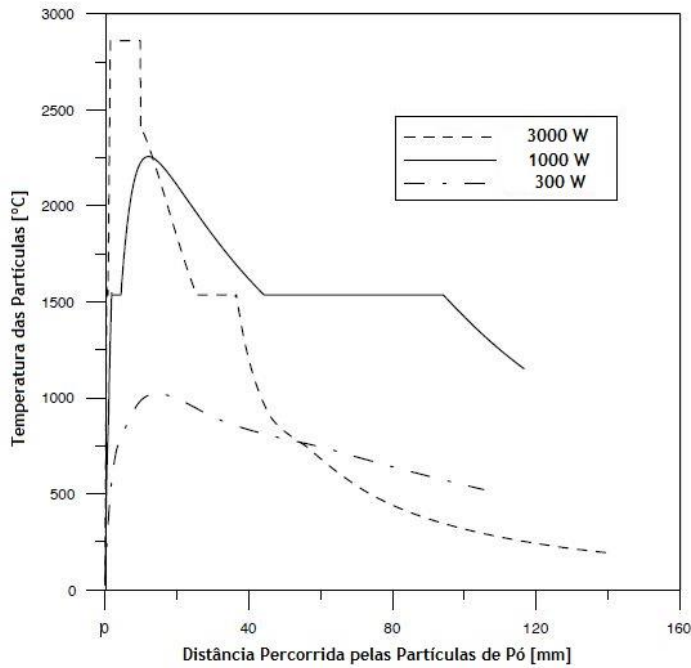


Figura 31 - Influência da potência aplicada na temperatura do pó; adaptada de [26]

Por outro lado, é também importante salientar que para determinar a qualidade do produto final, os parâmetros relativos ao aquecimento, arrefecimento e evaporação do pó devem ser extremamente controlados. É neste contexto que a potência do laser representa um papel bastante importante no perfil de temperaturas do fluxo de pó [16]. A aplicação de potência excessiva pode provocar grande evaporação das partículas, que por sua vez, pode induzir uma perda de massa de pó bastante significativa [21]. Este fator terá repercussões na taxa de deposição e, conseqüentemente, na eficiência global do processo.

Pela observação da Figura 32, é possível comprovar o efeito da aplicação excessiva de potência no perfil de temperaturas do pó, verificando-se uma ligeira discrepância para 3000 W. Neste caso, a solidificação das partículas ocorre mais rapidamente, efeito causado pela perda de massa de pó por vaporização do mesmo.



Nota: tamanho das partículas – 75 μm ; velocidade de alimentação do pó – 1m/s; velocidade do gás inerte – 3m/s.

Figura 32 - Influência da potência aplicada na temperatura do pó, em função da distância percorrida pelas partículas; adaptada de [21]

Também pela observação da Figura 33, verifica-se diretamente o peso da potência do laser na perda de massa das partículas, dado pelo rácio dos diâmetros final por inicial. Para potências mais elevadas e para os dois casos de tamanhos de partículas diferentes, é notória a perda de massa de pó.

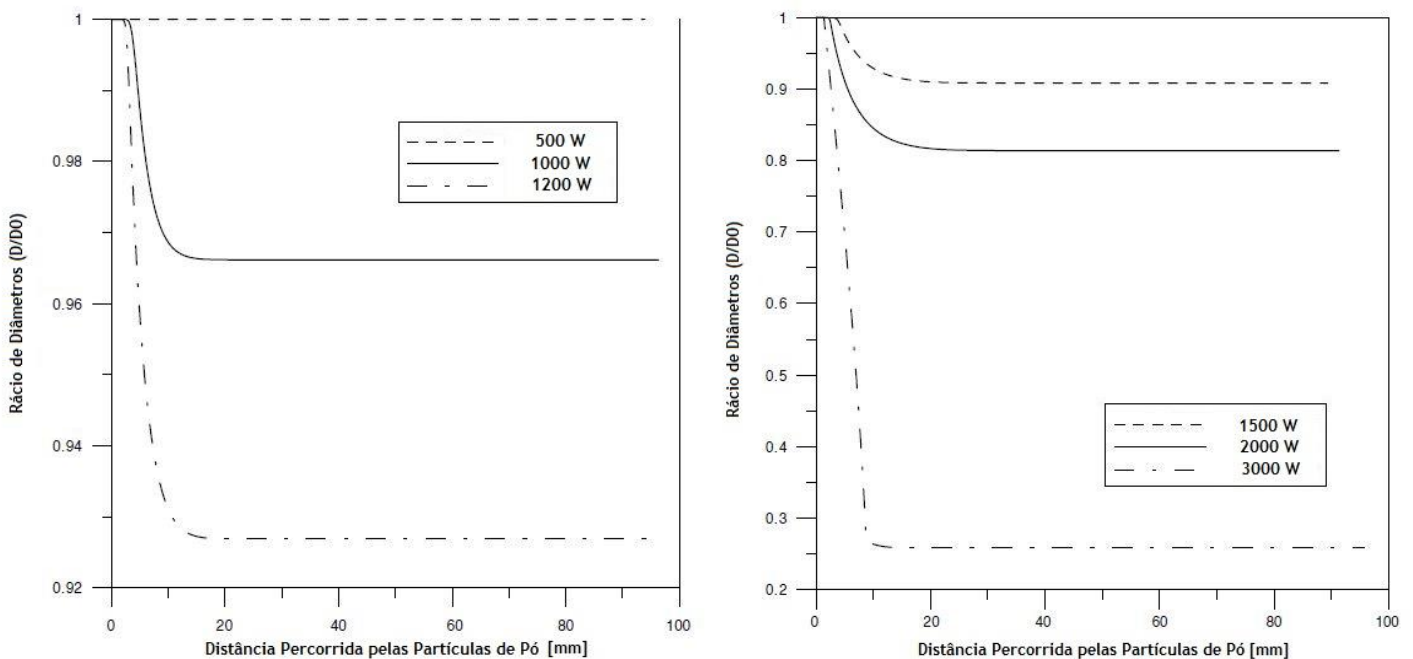


Figura 33 - Influência da potência aplicada na perda de massa das partículas, em função da distância percorrida; adaptada de [21]

Nota: tamanho das partículas – 45 μm (à esq.) e 75 μm (à dir.), velocidade de alimentação do pó – 1m/s, velocidade do gás inerte – 2m/s.

Comparando então os resultados das Figura 32 e 33, é possível concluir que a perda de massa dá-se maioritariamente para valores de temperatura superiores ao ponto de fusão do material (verificado pela análise das distâncias percorridas pelas partículas de pó em ambas as figuras). Deste modo, no tratamento de certas ligas, é recomendada a aplicação de potências mais baixas com períodos de aquecimento superiores. Aliado a este fator, a utilização de partículas de tamanho adequado pode prevenir o sobreaquecimento do pó durante o processo (possível de ser verificado pela análise da 33).

Por outro lado, para potências inferiores, o material adicionado pode não atingir o ponto de fusão e por esta razão pode não ser captado e absorvido tão eficazmente pelo material base ou pelo material já depositado. A aplicação de potências demasiado baixas, no processamento de certas ligas, pode então originar taxas de deposição inferiores, baixando assim o rendimento do processo para valores indesejáveis [51].

A título de exemplo, na tabela presente no **Anexo A**, são apresentados alguns valores de potência utilizados em processos de Laser Cladding, recolhidos a partir dos artigos estudados, bem como o equipamento utilizado e ligas processadas.

Diâmetro do Feixe Laser

A par da potência do laser, a alteração do diâmetro do feixe (*spot*), produz algumas variâncias nos resultados obtidos. No entanto, como já foi referido para o parâmetro anterior, mais à frente, na subsecção “Parâmetros Combinados” será também possível explicar a influência da combinação entre diâmetro e potência aplicada.

Apesar de tudo, a variação do diâmetro do feixe laser pode, por si só, provocar alterações em certos fenómenos físicos que ocorrem durante o processo. Em primeiro lugar, é possível estabelecer uma relação direta entre o *spot* utilizado e as dimensões/geometria do revestimento depositado, sendo a largura do *clad* aproximadamente equivalente ao diâmetro do feixe laser [16].

Se por um lado, com diâmetros superiores é possível depositar e solidificar mais material, ou seja, obterem-se taxas de deposição mais elevadas, por outro, é necessário ter em conta que a qualidade do produto gerado pode ser inferior, tanto em termos de rugosidade, como em termos de microestruturas obtidas [14].

Deste modo, é necessário salientar que um aumento excessivo do diâmetro do feixe laser pode originar problemas de desfocagem e, conseqüentemente, superfícies irregulares de material depositado. Pela análise da Figura 34, é possível verificar a influência da espessura das camadas depositadas no acabamento superficial das paredes do revestimento, sendo assim possível concluir que aumentando o *spot* e, por consequência, a espessura das camadas, a rugosidade será superior.

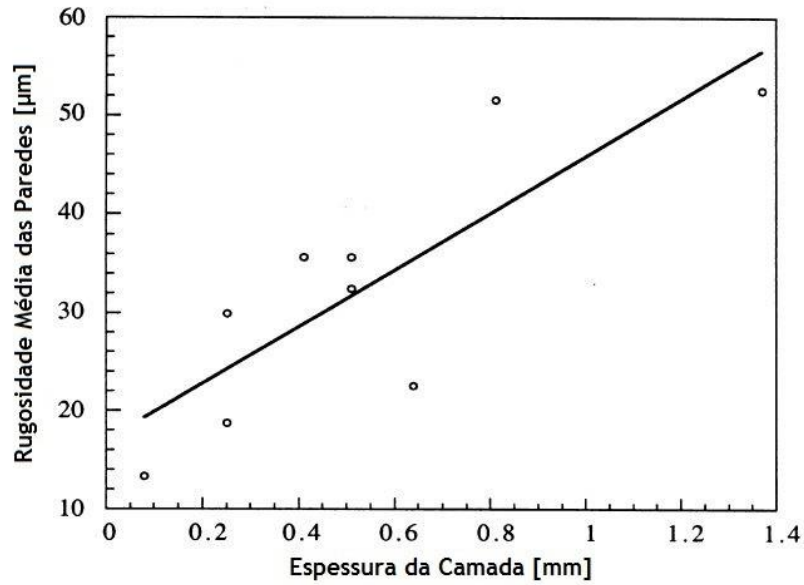


Figura 34 - Influência da espessura da camada depositada na rugosidade média das paredes; adaptada de [14]

Por outro lado, como já foi referido, diâmetros de feixe excessivos podem resultar em microestruturas indesejáveis. Com o aumento do *spot*, e conseqüente aumento da espessura, as velocidades de arrefecimento sofrem um decréscimo bastante acentuado (Figura 35), o que pode originar microestruturas com tamanho de grão menos refinado e por conseqüência propriedades mecânicas inferiores.

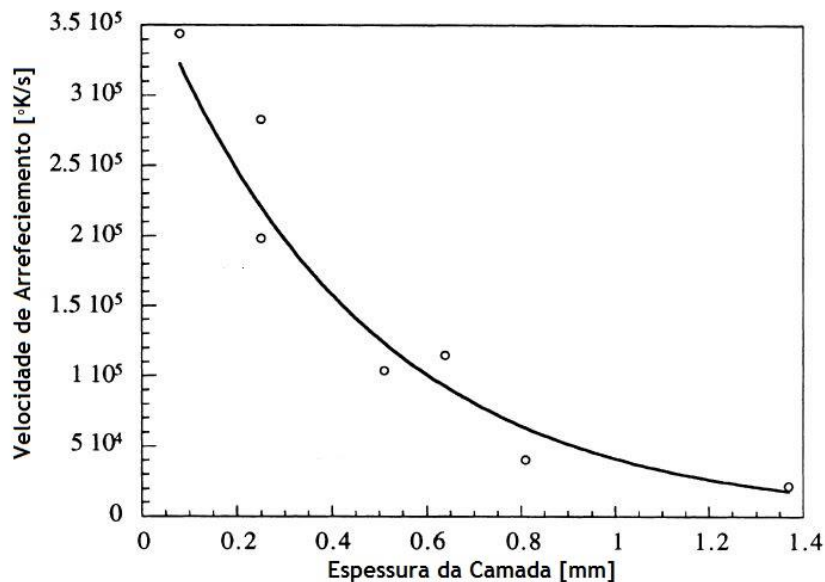


Figura 35 - Influência da espessura da camada depositada na velocidade de arrefecimento; adaptada de [14]

Na tabela presente no **Anexo B**, apresentam-se alguns valores de diâmetros de feixe utilizados para diferentes equipamentos e diversas ligas processadas.

Regime Contínuo vs. Regime Pulsado

No que diz respeito ao modo como o feixe é aplicado na superfície, é natural concluir que existem diferenças entre a sua aplicação contínua e o regime pulsado. Para este último, alguns parâmetros adicionais necessitam de ser tidos em conta. Entre eles, podem-se destacar a frequência, a largura e a energia do feixe.

Alguns estudos comprovam que a utilização do regime pulsado pode-se revelar vantajosa para determinadas aplicações (Figura 36). O trabalho realizado por *Gharbi et al.* [33], conclui que, no processamento de uma liga Ti-6Al-4V, a utilização de um laser de feixe pulsado pode melhorar significativamente o acabamento superficial do componente, justificando que para este regime ocorre uma redução dos gradientes térmicos na zona de fusão.

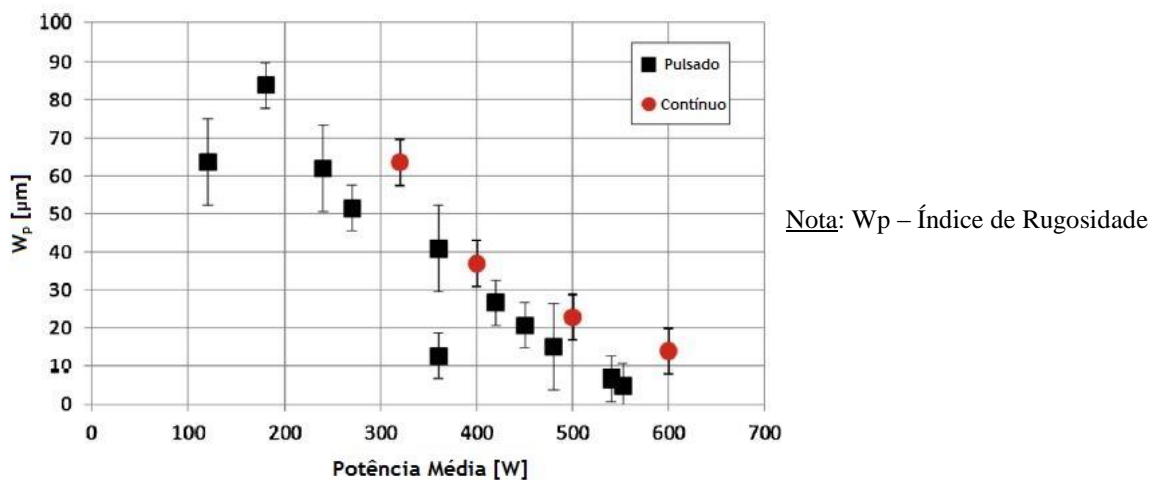


Figura 36 - Comparação entre rugosidades obtidas para regime contínuo e regime pulsado; adaptada de [33]

4.2.2. Sistemas de Distribuição do Pó e Especificações do *Nozzle*

No que diz respeito à seguinte secção, pretende-se demonstrar a influência que o fluxo de pó exerce no rendimento dos processos de Laser Cladding, podendo então a secção ser dividida em dois temas. O primeiro dirá respeito à velocidade de alimentação das partículas e ao modo como esta pode afetar a distribuição do fluxo de pó. O segundo abordará parâmetros como o ângulo de incidência, a distância à superfície de trabalho e, até mesmo, alguns detalhes relacionados com a geometria do próprio *nozzle*.

Velocidade de Alimentação

A par da administração do gás inerte, a velocidade de alimentação do pó tem um papel preponderante no perfil de distribuição da concentração das partículas. Essa distribuição, por sua vez, tem bastante influência na geometria do revestimento produzido e na taxa de deposição obtida. De um modo geral, é frequente obterem-se variações na altura e largura do *clad* com a alteração do fluxo de pó administrado.

Vários estudos comprovam que aumentando apenas a velocidade de alimentação, mantendo os restantes parâmetros constantes, consegue-se produzir um revestimento de maior altura e menor largura [22].

Através da análise das amostras da Figura 37, é possível observar o aumento da altura do *clad*, através do aumento gradual da velocidade de alimentação do pó. Ao utilizar valores constantes de parâmetros como a potência do laser, o diâmetro do feixe e a velocidade de varrimento (parâmetro abordado na próxima secção), pode-se verificar a relação direta entre velocidade de alimentação e altura do revestimento, sendo que a explicação mais indicada reside simplesmente no facto de existir maior quantidade de pó a ser adicionada e captada [31].

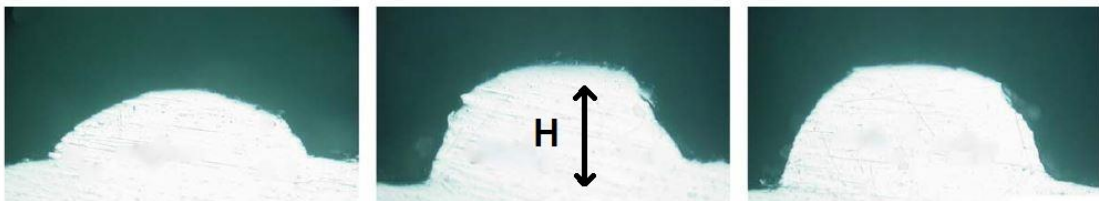


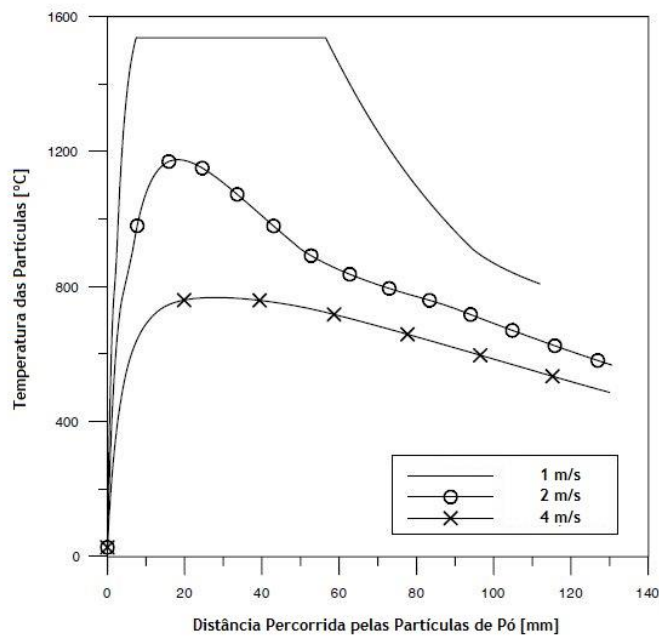
Figura 37 - Influência da velocidade de alimentação do pó na altura do revestimento, H; adaptada de [31]

Nota: Velocidades de alimentação – 7,8 g/min (à esq.) ; 8,8 g/min (ao cent.) ; 9,8 g/min (à dir.)

No entanto, como já foi verificado na secção anterior, existe um limite para cada parâmetro de processamento. Neste caso, a velocidade de alimentação do pó favorece taxas de deposição superiores, mas apenas até ao ponto em que a energia emitida pelo feixe laser deixa de ser suficiente para as aquecer.

Um aumento excessivo do fluxo de partículas de pó pode, até mesmo, ter o efeito inverso, provocando um bloqueio do feixe laser na zona de fusão. Este fator poderá então originar um decréscimo da absorção do laser e, conseqüentemente, um decréscimo na espessura da parede do revestimento (taxas de deposição inferiores). [51]

Analisando a Figura 38, pode-se verificar a influência da velocidade inicial das partículas no perfil de temperaturas do fluxo de pó, sendo expectável que para velocidades inferiores, a temperatura máxima atingida seja superior (maior tempo de contacto com o feixe laser). Deste modo, pela mesma figura, é possível concluir que é necessário ter um controlo cuidadoso com as velocidades de alimentação aplicadas, pois o ponto de fusão do material pode não chegar a ser atingido, como é o caso das partículas com velocidades de 2 e 4 m/s [21].



Nota: Potência do laser – 1000 W ;
tamanho das partículas - 75µm

Figura 38 - Influência da velocidade de alimentação no perfil de temperaturas do fluxo de pó; adaptada de [21]

Por último, para confirmar a relevância da distribuição do fluxo de pó na obtenção do produto final, pela observação da Figura 39, é possível avaliar o resultado de uma administração de pó pouco controlada, com a administração de um fluxo instável.

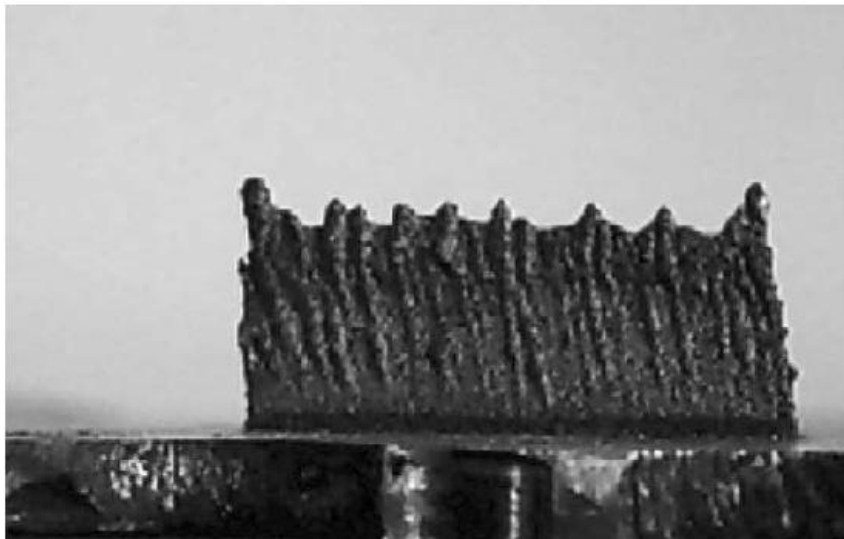


Figura 39 - Exemplo de resultado obtido para uma administração de pó pouco controlada; retirada de [22]

No caso da Figura 40, é também possível verificar a inconsistência do produto final, causada por um desvio no alinhamento das linhas de centro do fluxo de pó e do feixe laser.

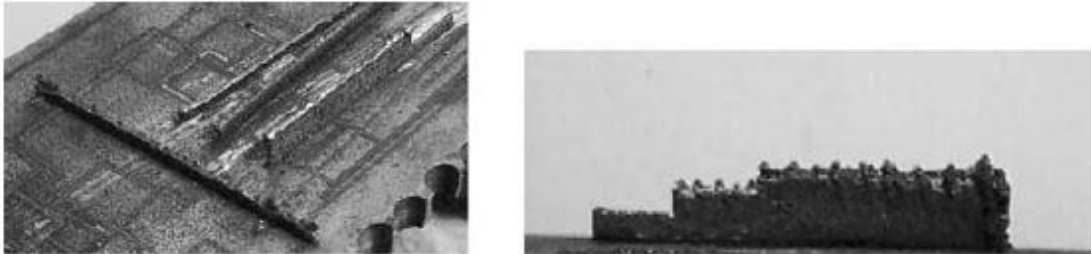


Figura 40 - Exemplo de resultado obtido para uma administração com um desvio no alinhamento das linhas de centro de fluxo de pó e feixe laser ; retirada de [22]

Na tabela presente no **Anexo C**, apresentam-se valores para o parâmetro de velocidade de alimentação de pó, recolhidos pela análise dos diversos artigos estudados. É de salientar que os valores recolhidos vêm normalmente expressos em [g/min] e não em [m/s]. No entanto, o termo adotado para este parâmetro foi o de “velocidade de alimentação” e não “taxa de alimentação” que, por vezes, pode ser confundido com “taxa de deposição”.

Ângulo de Incidência

O *nozzle* constitui uma das peças mais importantes nos processos de Laser Cladding, pela orientação que dá, tanto ao feixe laser, como ao jato de pó projetado. Neste sentido, é benéfica uma análise cuidada aos parâmetros que o envolvem.

Ao querer trabalhar em superfícies inclinadas é necessário estar ocorrente das dificuldades e desvantagens que tal procedimento acarreta. Ao variar o ângulo de incidência tanto das partículas de pó, como do feixe laser, estar-se-á a interferir com a absorção da energia, com a captação do pó e, por consequência, com a geometria do *clad* a produzir.

Em primeiro lugar, para compreender a influência do ângulo de incidência nos fenómenos físicos que ocorrem durante os processos de Laser Cladding, é necessário perceber que tanto os feixes laser, como as distribuições de fluxo de pó podem ser interpretados como curvas de Gauss. Neste pressuposto, é então possível entender a relevância do ângulo de incidência em ambos os perfis (Figura 41 e Figura 42). No caso das duas figuras e pela interpretação do estudo de *Lin e Hwang* [16], a concentração de pó e a intensidade do laser normalizadas são os dois parâmetros associados a uma distribuição normal, em que S representa a distância da linha de centro ao contorno do fluxo de pó e ao contorno do feixe laser, para cada figura, respetivamente.

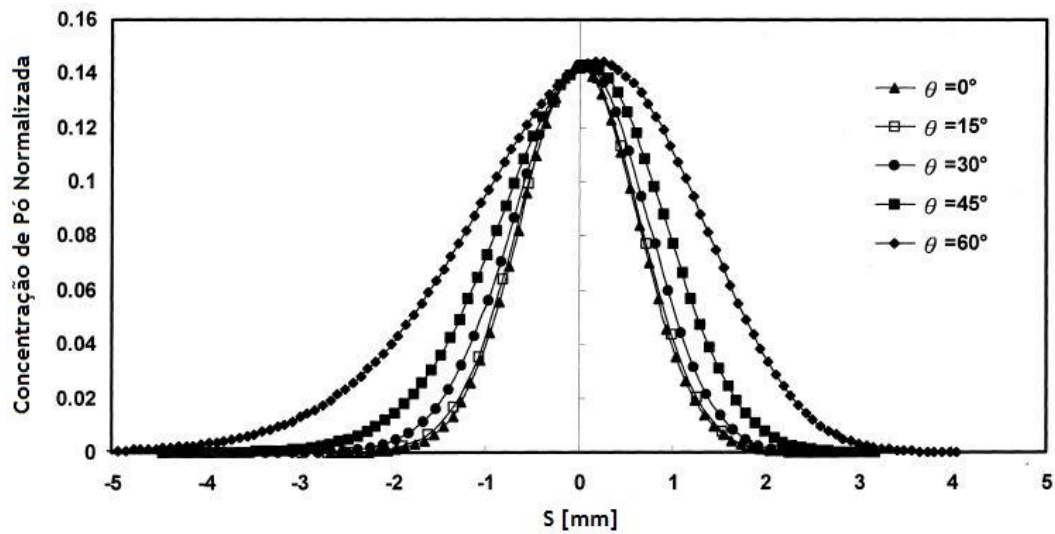


Figura 41 - Influência do ângulo de incidência no perfil do fluxo de pó; adaptada de [16]

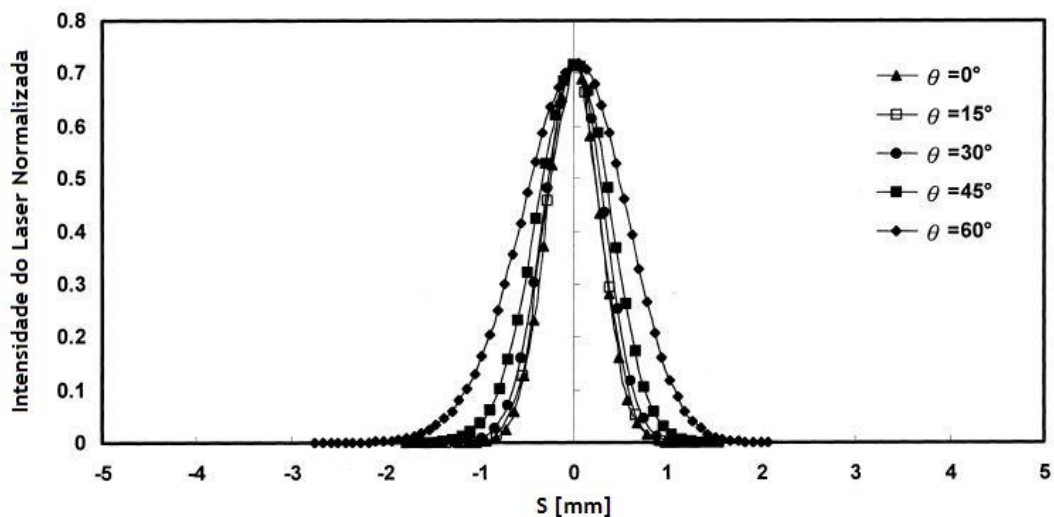


Figura 42 - Influência do ângulo de incidência no perfil do feixe laser; adaptada de [16]

Pela análise da Figura 41 e da Figura 42, é possível perceber que tanto a concentração de partículas de pó, como a intensidade do laser atingem o pico próximas da linha de centro. No entanto, é fácil verificar que à medida que o ângulo de incidência aumenta, começa a criar-se um desvio desse mesmo pico. Esse desvio vai então ser determinante na absorção do laser e na eficiência da captação do pó, como poderá ser verificado mais à frente.

No processamento de um aço inoxidável, com uma fonte de CO₂ e aplicando duas gamas de potências, 400 e 1100 W, *Lin e Hwang* [16] estudaram a influência do ângulo de incidência na absorção relativa da radiação – rácio entre a radiação absorvida numa superfície inclinada, de ângulo θ , e a radiação absorvida numa superfície horizontal. Os resultados podem ser observados na Figura 43.

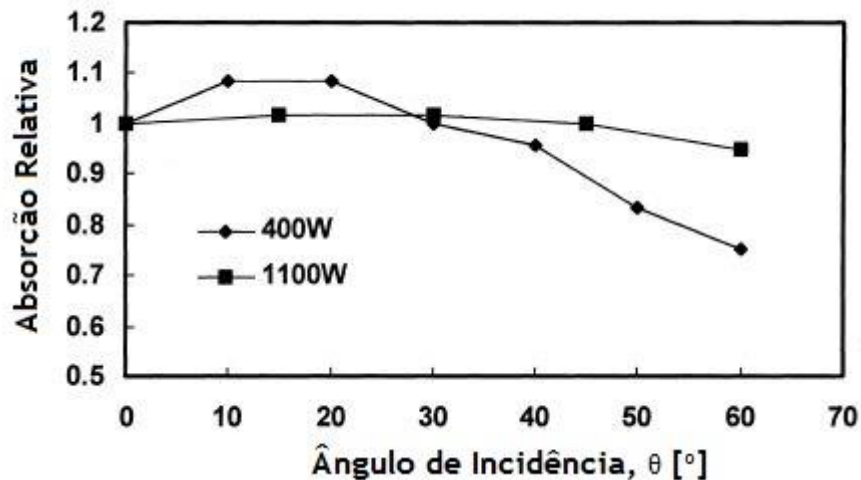


Figura 43 - Influência do ângulo de incidência na absorção relativa; adaptada de [16]

A figura apresentada demonstra que para uma potência mais baixa, um ângulo de incidência entre 0 e 30° pode ser favorável para uma maior absorção da radiação. No entanto, pode-se concluir, de um modo geral, que um aumento gradual do ângulo irá baixar a absorção do feixe laser.

Os mesmos autores estudaram também a eficiência relativa da captação do pó (rácio entre a quantidade de pó captada num plano inclinado face à quantidade de pó captada numa superfície horizontal) com a variação do ângulo de incidência (Figura 44). Sabendo à partida que a captação das partículas depende diretamente da absorção da radiação, seria esperado chegar-se à conclusão de que o ângulo de incidência reduziria a eficiência do processo. O estudo foi realizado para a deposição de uma e duas camadas de material, com uma velocidade de alimentação de 0,07g/s.

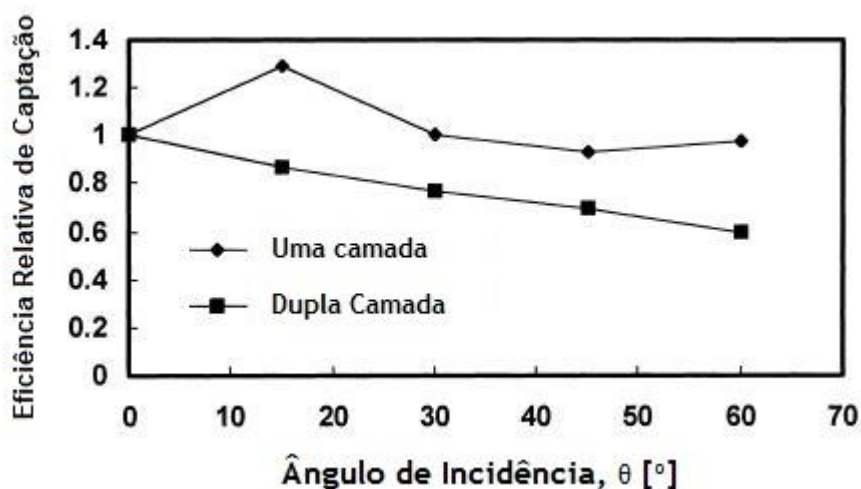


Figura 44 - Influência do ângulo de incidência na eficiência relativa de captação; adaptada de [16]

Por último, foi também confirmada a influência da absorção do laser e da captação de pó nas dimensões do *clad* gerado, podendo a partir daqui estabelecer uma relação direta entre o ângulo de incidência e a geometria do revestimento. Essa relação pode então ser observada pela visualização da Figura 45. As componentes vertical e horizontal de cada gráfico representam a altura e largura, em milímetros, de cada revestimento, respectivamente. Os gráficos à esquerda representam os resultados para a deposição de apenas uma camada, enquanto que os gráficos à direita apresentam os resultados para revestimentos de dupla camada.

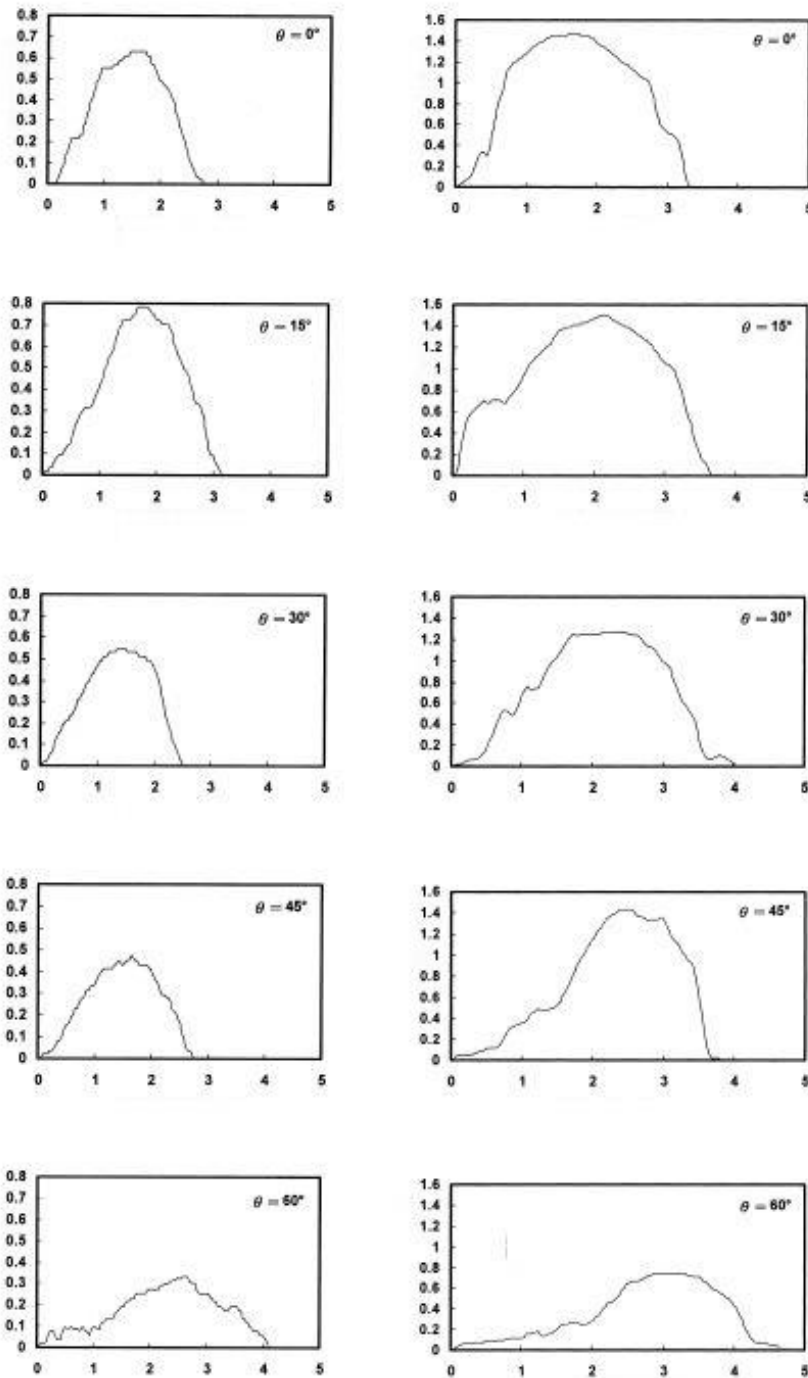


Figura 45 - Influência do ângulo de incidência na geometria do revestimento; adaptada de [16]

Distância à Superfície de Trabalho

O parâmetro de distância à superfície de trabalho (*standoff*) é normalmente determinado a partir da distância focal da lente inserida na cabeça de Laser Cladding. A par de outros parâmetros, a distância focal da lente, definirá o diâmetro do feixe laser projetado na superfície. Pela Figura 46, é possível perceber esta distância.

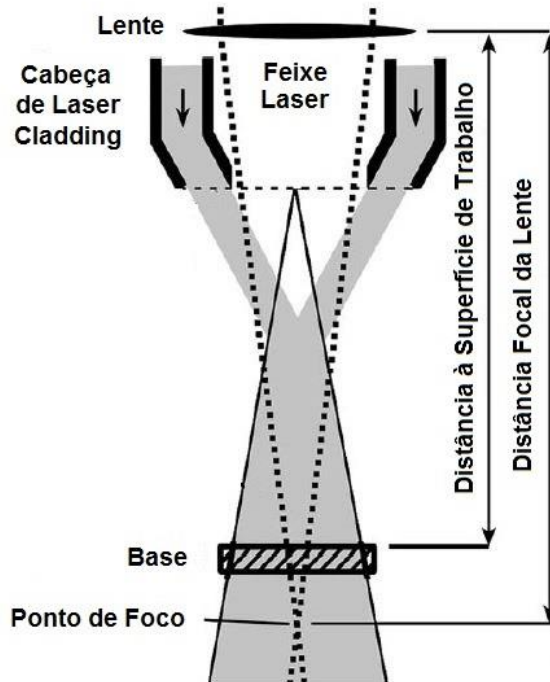


Figura 46 - Distância à superfície de trabalho (*standoff*); adaptada de [28]

Pela análise da Figura 47 (as retas apelidadas de *a* a *f* representam os resultados experimentais), é também possível observar a relevância do *standoff* na taxa de deposição de material, através da influência que este tem na eficiência da captação do pó.

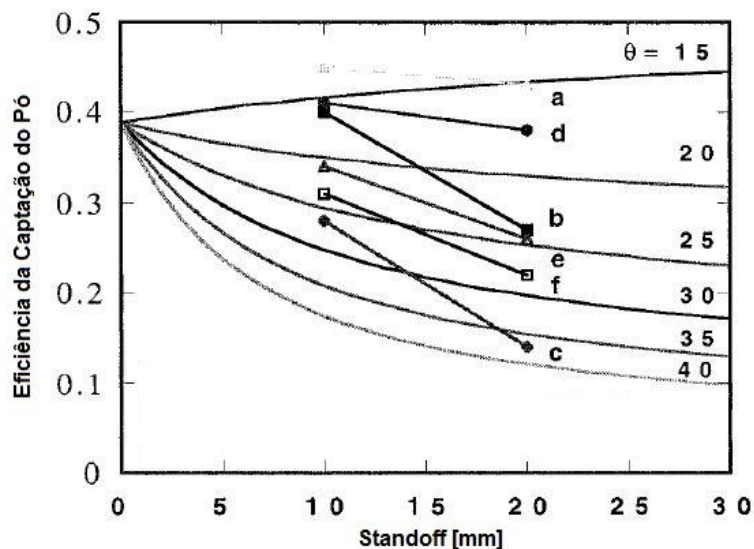


Figura 47 - Influência da distância à superfície de trabalho na captação do pó; adaptada de [15]

Durante a fase de deposição, existe a possibilidade de manter ou variar a distância à superfície de trabalho, aquando da sobreposição de uma nova camada. Num estudo experimental realizado por *Pinkerton e Li* [28], demonstrou-se que é possível obter boa consistência entre camadas depositadas, sem alterar a posição da cabeça ou da base. Para a aplicação de diferentes valores de potência, velocidade de alimentação e velocidade de varrimento, os resultados de deposições com incrementos fixos e incrementos variáveis de posição, produzem revestimentos com menores alturas, quando comparando com deposições sem incrementação.

Através de uma análise da adesão das partículas de pó, foi comprovado que alterando constantemente a distância à superfície, na deposição de cada camada, a eficiência seria reduzida em cerca de 10%, o que levaria à formação de revestimentos com geometrias menos consistentes.

Apesar de tudo, não existe muita concordância entre os autores dos diferentes estudos realizados quanto ao *standoff* e à sua variação. Em alguns casos, este parâmetro pode representar a distância desde a ponta do *nozzle* até à superfície de trabalho. Deste modo, torna-se difícil apresentar uma gama de valores de referência coerente, no tratamento das diferentes ligas. Em todo o caso, para se ter uma ideia, é frequente a utilização de lentes com distâncias focais entre 100 e 300mm.

Geometria do Nozzle

No que toca propriamente ao *nozzle* utilizado nos processos de Laser Cladding, basta apenas referir que alguns pormenores relativamente à sua solução construtiva podem ter alguma influência na eficiência do procedimento.

Em *nozzles* coaxiais, com ângulos e diâmetros de saída de pó mais reduzidos, conseguem-se formar distribuições de partículas mais concentradas, melhorando assim a adesão do pó no processo [52].

Deposições Combinadas de Pó com Fio Metálico

Alguns estudos comprovam que a deposição simultânea de pó e fio metálico (Figura 48) contribui vantajosamente para o rendimento do processo de Laser Cladding.

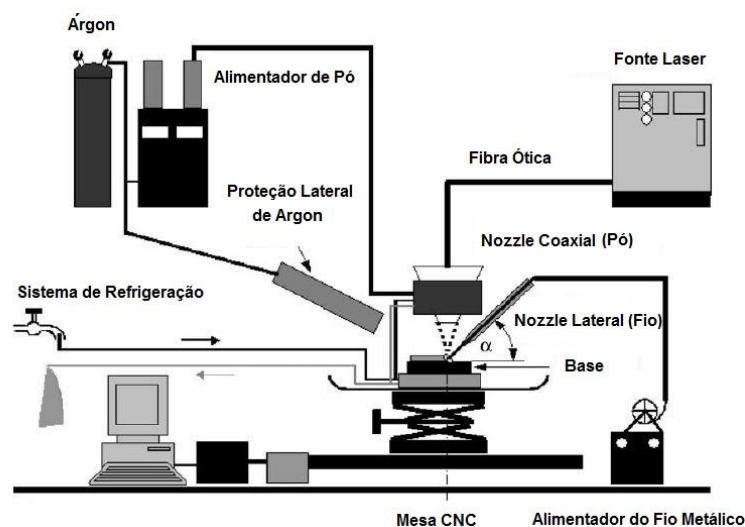


Figura 48 - Esquema ilustrativo de um processo com deposições combinadas de pó e fio metálico; adaptada de [24]

Numa situação normal, para captações de pó maiores, e consequentes taxas de deposição superiores, o acabamento superficial da peça torna-se pior. É neste contexto que a deposição combinada de partículas de pó e fio metálico pode interferir positivamente.

O estudo realizado por *Syed et al.* [24], demonstra uma alteração da influência da captação de pó no acabamento da peça, pela introdução simultânea dos dois sistemas de alimentação. Através da Figura 49 *b*, é possível observar que, para este caso, a rugosidade do componente vai diminuindo à medida que a eficiência da adesão de pó aumenta. Tal não acontecia para o caso comum de administração de pó (Figura 49 *a*).

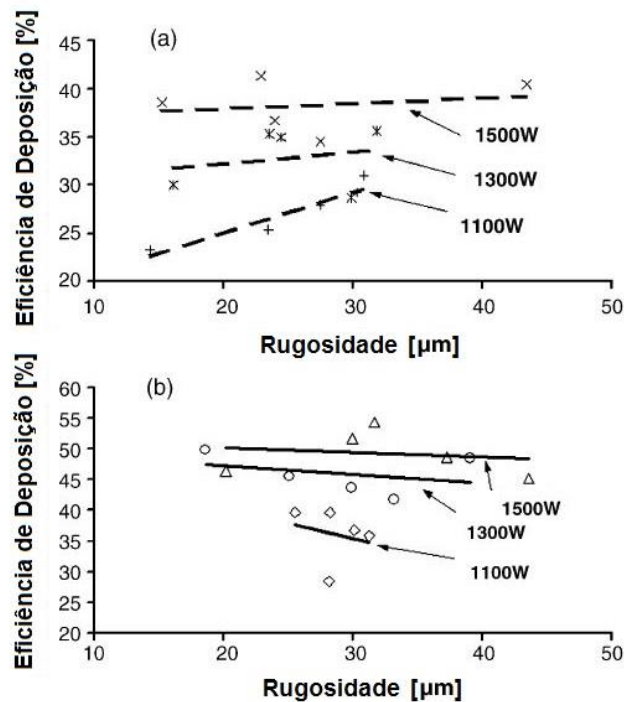


Figura 49 - Influência da deposição combinada de pó e fio metálico no acabamento obtido; adaptada de [24]

Por outro lado, com a combinação simultânea dos dois tipos de alimentação foi também possível observar uma redução da porosidade em 20 – 25%, resultado que se deve ao facto de se ter administrado menor quantidade de pó. Componentes produzidos pela administração singular de pó apresentam maiores índices de porosidade do que aqueles produzidos pela alimentação de fio metálico.

4.2.3. Movimentação

No capítulo da movimentação, existe apenas um parâmetro que é realmente relevante para o bom funcionamento do processo: a velocidade de varrimento. Como se sabe, estando o processo de Laser Cladding inserido num sistema CNC de vários eixos, é possível realizar-se a movimentação do procedimento através da cabeça ou da mesa

de operações. Em todo o caso, como já foi mencionado, aquando da utilização de fontes laser gasosas, nomeadamente de CO₂, a flexibilidade do processo torna-se reduzida, sendo a movimentação dada, principalmente, pela mesa.

A par dos parâmetros relativos à fonte de energia e também à velocidade de alimentação, a influência da velocidade de varrimento será também explicada na secção “Parâmetros Combinados”. No entanto, pode-se à partida explicitar alguns dos fenómenos físicos que ocorrem pela variação deste parâmetro.

Velocidade de Varrimento

Em primeiro lugar, a velocidade de varrimento terá principal influência na taxa de deposição. Como se deve calcular, para velocidades muito baixas, ocorrerá a fusão consecutiva do mesmo local, não sendo possível a formação de camadas consistentes.

Por outro lado, para velocidades muito elevadas, o material de adição não consegue ser depositado. Um aumento excessivo da velocidade resultará em captações de pó menores e, conseqüentemente, em taxas de deposição inferiores [51].

Para velocidades de varrimento demasiado elevadas, a captação do pó pode constituir um problema, especialmente nos contornos do revestimento. Nestas zonas, é frequente o aparecimento de defeitos, pela criação de espaços indesejáveis. Reduzindo então a velocidade de varrimento, torna-se possível eliminar a formação destes defeitos.

Na tabela presente no **Anexo D**, apresentam-se alguns valores para velocidades de varrimento utilizadas em processos de Laser Cladding.

4.2.4. Fluxo de Gás Inerte

Nos processos de Laser Cladding, a proteção de gases inertes é realizada com diversos objetivos, sendo o principal a prevenção contra a oxidação. Esta proteção tem enorme relevância no resultado final obtido, especialmente no tratamento de materiais mais reativos. O fluxo de gás inerte é dividido então por certos pontos do processo, como pode ser visualizado pelo esquema da Figura 48.

Em primeiro lugar, no caso da utilização de alimentadores com transporte por gás, o fluxo é direcionado para o alimentador de pó, com o objetivo de transportar as partículas desde a câmara de alimentação até ao *nozzle*, onde estas são projetadas.

Em segundo lugar, o fluxo é direcionado para o *nozzle*, de modo a ser aplicado nas partículas de pó. Desta forma, durante a deposição, as partículas podem ser transportadas até à superfície de trabalho. A par do transporte, é criada uma atmosfera localizada de gás inerte que irá proteger a superfície contra eventuais problemas de oxidação.

Por último, o fluxo de gás inerte é também distribuído diretamente para a cabeça de Laser Cladding, com a função de proteger as lentes contra a oxidação.

Em certos casos, o processo de Laser Cladding pode decorrer em ambiente controlado, isto é, em vez de se utilizar o fluxo de gás inerte para criar uma atmosfera

localizada, pode-se realizar o processo em vácuo, com a introdução de um gás, sendo este normalmente árgon, azoto ou hélio.

Na presente secção, tem-se como objetivos, estudar a influência do fluxo de gás inerte no tratamento dos diversos materiais, explicitando de forma clara a relevância que este tem na eficiência do processo, especialmente através do caudal com que é aplicado. Pretende-se, por outro lado, apresentar as diferenças entre a realização do processo em atmosfera localizada e ambiente controlado.

Caudal do Fluxo de Gás Inerte

O fluxo de gás inerte, como já foi mencionado, encontra-se encarregue de transportar as partículas de pó até ao contacto com a superfície de deposição. No que toca ao seu caudal, é necessário entender que este tem de ser cuidadosamente calculado para obter o maior rendimento do processo.

Por um lado, se na fase de deposição da matéria-prima, a velocidade das partículas for demasiado baixa, a taxa de deposição obtida pode ser inferior à esperada. Para além disso, é necessária a aplicação de um caudal mínimo que crie pressão suficiente para afastar o ar da atmosfera, e assim prevenir a superfície de oxidação. Por outro lado, se o valor do caudal for excessivamente elevado, podem ser originados distúrbios na zona de fusão [14].

Com o auxílio da Figura 50, é possível observar a influência do fluxo de gás inerte na projeção das partículas.

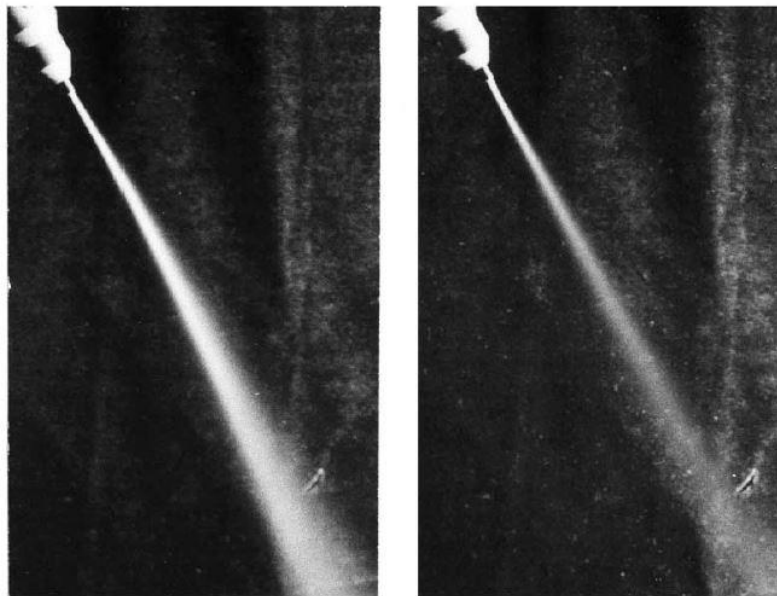


Figura 50 - Influência do gás inerte na projeção das partículas de pó; retirada de [30]

À esquerda, é facilmente perceptível que para fluxos demasiado baixos, o pó fica mais disperso e, conseqüentemente, a sua captação decresce. Por outro lado, na figura mais à direita, verificam-se caudais mais adequados, gerando um fluxo mais estreito e concentrado.

De qualquer modo, é possível avaliar o efeito do caudal de gás inerte na taxa de deposição, através da altura do revestimento gerada. A título de exemplo, pela análise da Figura 51, podem-se verificar as dimensões obtidas através da aplicação de diferentes caudais, no processamento de um aço inoxidável.

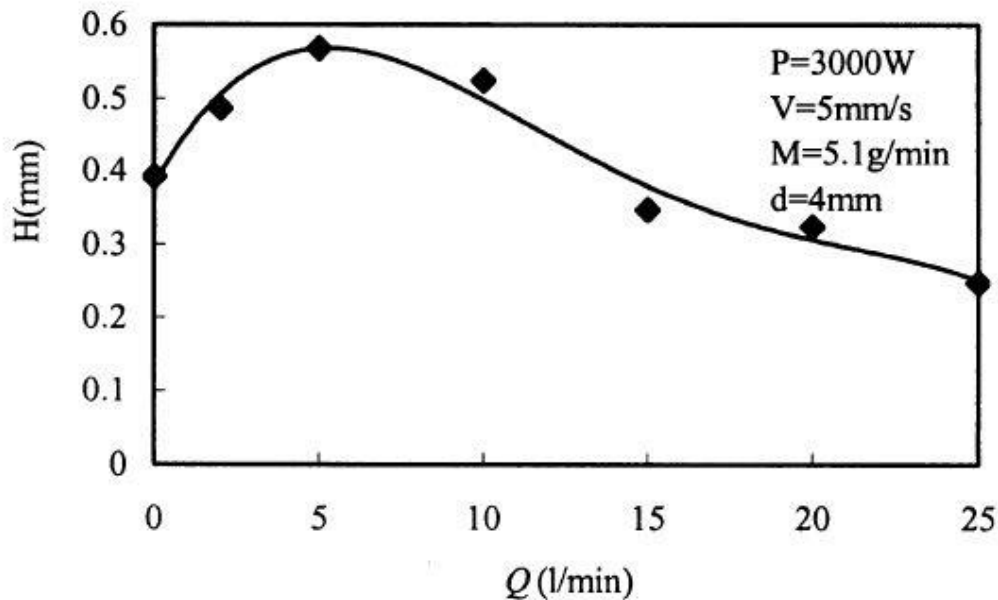


Figura 51 - Influência do caudal de gás inerte na altura do revestimento; retirada de [30]

Em primeiro lugar, é necessário explicar o porquê de o gráfico ter adquirido o seguinte formato. Para fluxos de gás superiores, a quantidade de pó injetado na zona de fusão é também superior. Contudo, as partículas de pó, ao serem sujeitas a caudais mais elevados, ficam sujeitas mais facilmente a ressaltos na superfície.

Pela análise da Figura 51, com o objetivo de depositar a maior quantidade de material possível, o caudal mais apropriado seria o de 5 l/min, aproximadamente. No entanto, não se pode descurar a principal função do fluxo de gás inerte, que é a de prevenir a oxidação superficial do produto gerado. No caso de o processo de Laser Cladding se realizar apenas com uma atmosfera localizada de gás inerte, é usual utilizarem-se valores de caudal superiores a 10 l/min, para evitar problemas de oxidação. Desta forma, é estimado que, para satisfazer as duas condições, isto é, para se obter uma razoável taxa de deposição e, ao mesmo tempo, evitar a oxidação, o fluxo de gás inerte deva variar entre 10 e 15 l/min [30].

Comparando a Figura 52 com a Figura 53, pode-se verificar que a oxidação da superfície pode ser traduzida em índices de rugosidades bastante elevados. No caso da Figura 52, a aplicação de um caudal de 2 l/min revelou não ser suficiente para evitar problemas de oxidação, sendo portanto verificado o mau acabamento do componente produzido.

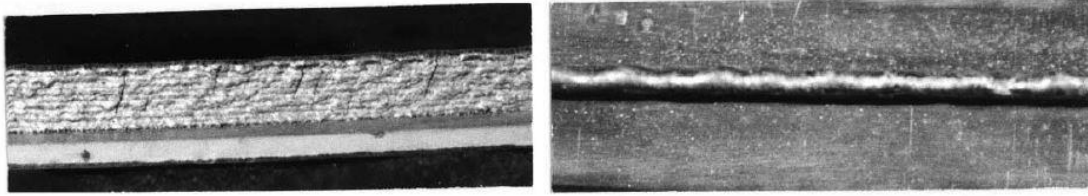


Figura 52 – Rugosidade provocada pela oxidação obtida, para um caudal de gás inerte de 2 l/min; retirada de [30]

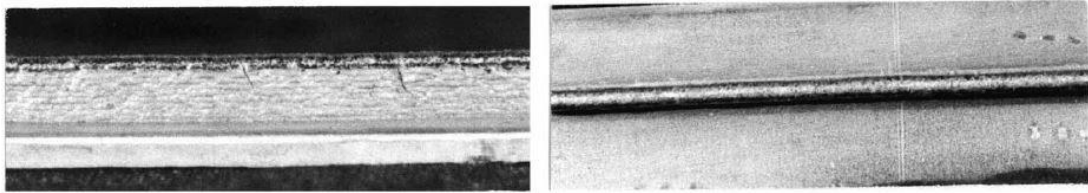


Figura 53 – Rugosidade provocada pela oxidação obtida para um caudal de gás inerte de 12 l/min; retirada de [30]

De outro ponto de vista, é também possível afirmar que o caudal pode ter influência na microestrutura obtida. O aparecimento de porosidade é bastante recorrente quando o fluxo de gás inerte é demasiado elevado. Durante a fase de deposição, mais concretamente, durante a fusão das partículas, é usual ocorrer infiltração do gás que, na solidificação, se traduz sob a forma de cavidades esféricas [38].

Na tabela presente no **Anexo E**, apresentam-se alguns valores de caudais de gás inerte utilizados no processamento de diversas ligas.

Atmosfera Localizada vs. Ambiente Controlado

Como foi previamente mencionado, a realização do processo de Laser Cladding apenas com atmosfera localizada de gás inerte, pode trazer consigo algumas desvantagens, no que toca ao rendimento do processo. Já foi verificado que, com a aplicação de caudais superiores, a oxidação da superfície pode até ser reduzida. No entanto, esses mesmos caudais podem provocar uma baixa de rendimento do processo, nomeadamente a nível de captação de pó, podendo levar também ao aparecimento de porosidade indesejada.

Neste sentido, uma alternativa às adversidades apontadas pode passar pela realização do processo em ambiente controlado, numa câmara de vácuo, com a redução dos níveis de oxigénio, através da introdução de um gás inerte (normalmente árgon, azoto ou hélio).

Pela análise da Figura 54, é possível observar um exemplo esquemático de um sistema de Laser Cladding com atmosfera controlada.

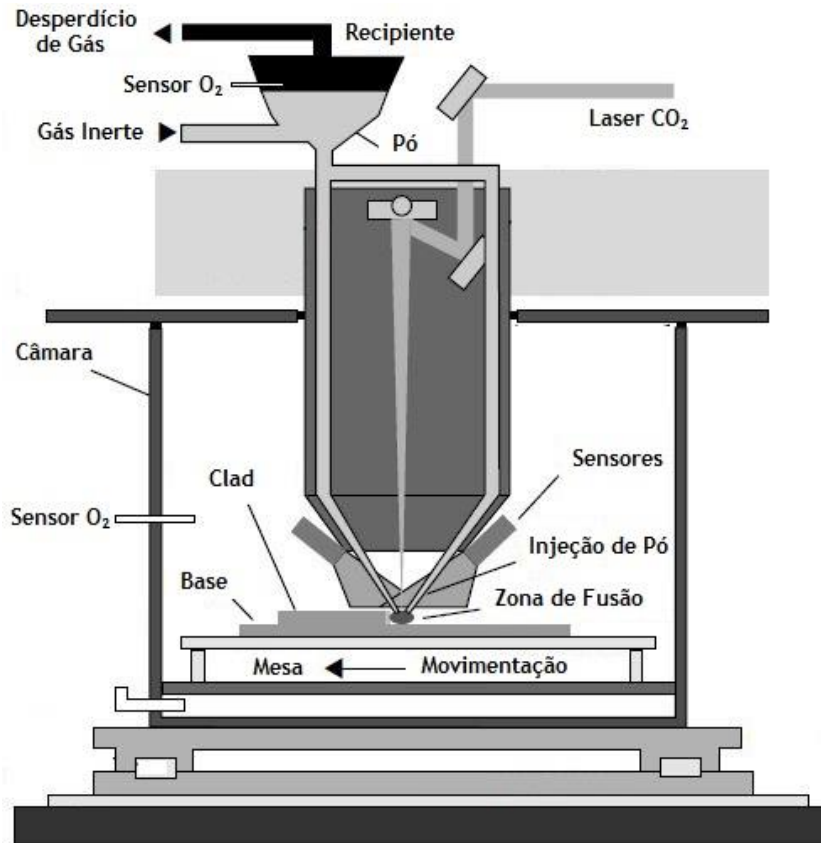


Figura 54 - Esquema ilustrativo de um sistema de Laser Cladding com atmosfera de gás inerte controlada; adaptada de [19]

Através da figura, é possível verificar que existe um controlo da quantidade de oxigénio no interior da câmara, com a introdução dos sensores na zona lateral. O nível de oxigénio é então reduzido, normalmente de 20-30 ppm (atmosfera local) para valores inferiores a 5 ppm [48, 53].

Nos processos de Laser Cladding, sejam eles realizados com atmosfera localizada de gás inerte ou em ambiente controlado, o nível de pureza do gás inerte constitui um parâmetro importante para o rendimento do processo. Nestes tipo de processos, o gás mais utilizado é o árgon, como pode ser verificado pela tabela do **Anexo E**. Para este gás, foi investigado o nível de pureza utilizado nos processos, tendo sido verificado o valor de 99,999% - gás de elevada pureza [25]. No entanto, é possível realizar-se o processo, de forma eficiente, com purezas mínimas de 99,995%.

A realização do processo de Laser Cladding num sistema semelhante ao da Figura 54, apresenta então algumas vantagens perante o uso apenas de uma atmosfera localizada, para além da redução da oxidação superficial. A primeira diz respeito aos níveis de captação de pó. Para o caso da realização do processo em ambiente controlado, ocorre uma redução das tensões superficiais nas camadas depositadas (derivada da redução da oxidação). Este fator vai então permitir uma maior adesão das partículas de pó na deposição das camadas seguintes, elevando assim os níveis de captação de pó e, conseqüentemente, a taxa de deposição [54].

O teor de oxigénio, no processamento de ligas mais reativas tem também uma grande influência nas propriedades mecânicas finais do produto. As microestruturas obtidas ao ar e em atmosfera de gás inerte revelam algumas diferenças entre elas nas suas composições, diferenças essas que, mais tarde, se podem traduzir em variações nas propriedades mecânicas do produto obtido [49].

Por último, uma outra vantagem reside na segurança do processo. Como se sabe, no tratamento de certos materiais, as partículas de pó podem causar problemas respiratórios para quem as inale. Deste modo, com um compartimento isolado, é possível evitar tais problemas e garantir a segurança no ambiente de trabalho.

A realização do processo em ambiente controlado apresenta poucas desvantagens. Entre elas, a mais óbvia, assenta no custo do equipamento que é necessário adquirir. Para além da câmara de vácuo, a compra de sensores de medição dos níveis de oxigénio é essencial para tirar o maior rendimento do processo. Deste modo, o investimento inicial pode atingir valores bastante elevados.

Por outro lado, uma outra desvantagem pode residir na flexibilidade da realização do processo. Com a introdução deste tipo de equipamento, há a possibilidade de existirem algumas limitações na movimentação da cabeça de Laser Cladding.

4.2.5. Parâmetros Combinados

Na seguinte secção, é realizada uma abordagem à influência que a combinação dos parâmetros anteriormente referidos pode ter, durante os processos de Laser Cladding, nomeadamente na obtenção dos *Outputs* expressos na Figura 28 da página 38. Entre as diferentes combinações possíveis, destacam-se duas: a densidade energética do laser, ou energia específica, E , e a concentração do pó depositado, G . A primeira pode ser expressa pela equação

$$E = P / (D * U) \quad (1)$$

em que P , D e U correspondem, respetivamente, à potência do laser aplicada, ao diâmetro do feixe e à velocidade de varrimento. Este parâmetro dá então uma medida de energia por unidade de área, podendo ser expresso em (J/mm^2). A segunda pode ser expressa por

$$G = M / (D * U) \quad (2)$$

em que M , corresponde à velocidade de alimentação das partículas de pó. O parâmetro G fornece uma medida de massa por unidade de área, podendo ser expresso em (g/m^2).

De um modo geral, para definir os limites a partir dos quais é possível produzir um revestimento sem problemas de diluição ou porosidade, pode-se ter em conta estes

dois parâmetros e também um outro relativo ao rácio entre a largura e a altura do revestimento (Figura 55).

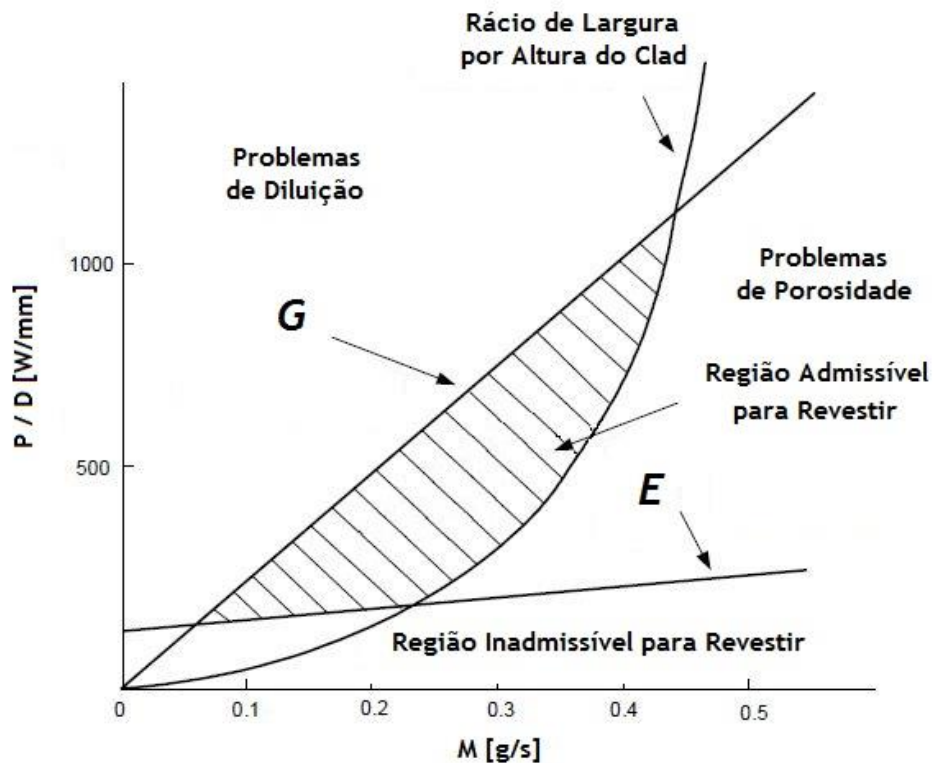


Figura 55 - Região admissível para trabalhar, mediante os parâmetros de densidade energética do laser e concentração de pó depositado; adaptada de [13]

Densidade Energética do Laser - Taxa de Deposição

A densidade energética do laser, ou energia específica, resulta da combinação entre potência aplicada, diâmetro do feixe laser e velocidade de varrimento. A aplicação de valores de densidade energética constantes e adequados permite a fusão completa do pó adicionado, condição que é essencial para o bom funcionamento do processo.

Em primeiro lugar, ir-se-á discutir a relevância deste parâmetro na taxa de deposição de material, através da influência que exerce na geometria do revestimento, começando então pela análise da altura de uma camada depositada. Para melhor compreender a importância do parâmetro, serão então abordadas as relações potência - diâmetro do feixe e potência - velocidade de varrimento.

Pela análise da Figura 56, retirada de um estudo realizado por *Li et al.* [30], é possível observar que, mantendo a velocidade de varrimento constante, valores superiores, tanto da potência como do diâmetro do feixe laser, favorecem alturas de revestimento superiores. A explicação para tal acontecimento pode residir no aumento da zona de fusão. Para além disso, é também de salientar, que o aumento da altura com o aumento da potência aplicada é mais notório para o caso de diâmetros menores.

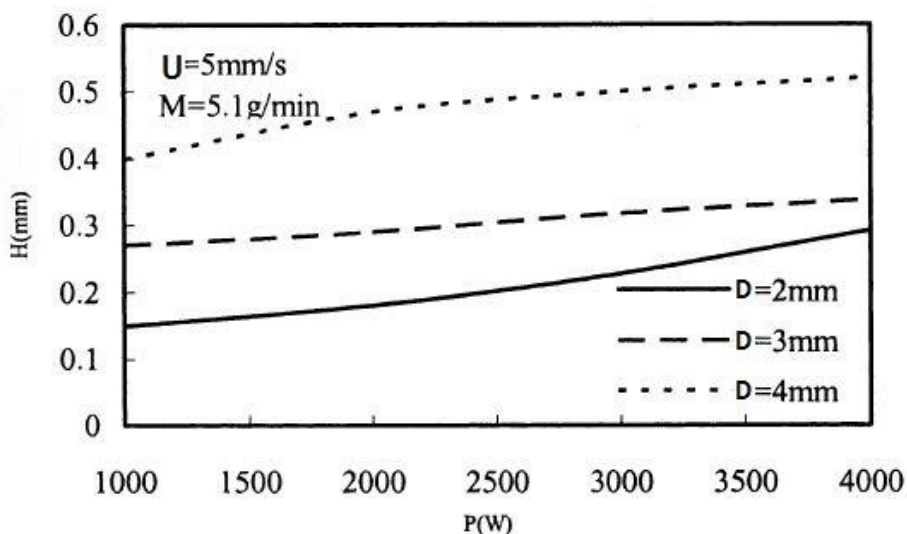


Figura 56 - Influência da densidade energética do laser (relação potência - diâmetro do feixe) na altura do revestimento; adaptada de [30]

Por outro lado, através da Figura 57, é possível observar que, mantendo tanto a velocidade de alimentação do pó (6,3 g/min), como o diâmetro do feixe constantes, um aumento da densidade energética do laser irá resultar em alturas de revestimento superiores. Para o caso da amostra da esquerda, foram aplicados 200 W com uma velocidade de varrimento de 6 mm/s. A amostra central foi produzida através da aplicação de uma energia específica menor ($P = 250 \text{ W}$; $U = 8 \text{ mm/s}$), enquanto que a da direita resultou de um valor de densidade energética superior ($P = 300 \text{ W}$; $U = 4 \text{ mm/s}$).



Figura 57 - Influência da densidade energética do laser (relação potência – velocidade de varrimento) na altura do revestimento; adaptada de [31]

Para além de ter especial importância na altura do revestimento, a energia específica tem também influência na largura do *clad*. Como já foi referenciado na secção respetiva ao diâmetro do feixe laser, a largura do revestimento produzido é equivalente ao *spot* aplicado. Deste modo, é fácil assumir que quanto maior for o diâmetro do feixe, maior será a largura do revestimento. No entanto, é interessante verificar como é que a largura depende da relação potência – velocidade de varrimento.

Através da análise da Figura 58, no processamento de uma liga de níquel, é possível verificar, em primeiro lugar, a relação anteriormente referida do *spot* com a largura do *clad*, sendo essa apenas inválida para potências demasiado baixas e velocidades de varrimento mais elevadas (figuras *b* e *c*). É também de salientar que, quando a potência do laser é suficiente, a largura do revestimento pode ser superior ao diâmetro do feixe.

Por outro lado, é também possível verificar a relação potência – velocidade de varrimento, demonstrada nas três imagens, mas especialmente na primeira (figura *a*). Para potências mais elevadas e velocidades de varrimento inferiores, a largura do revestimento, *W*, será maior.

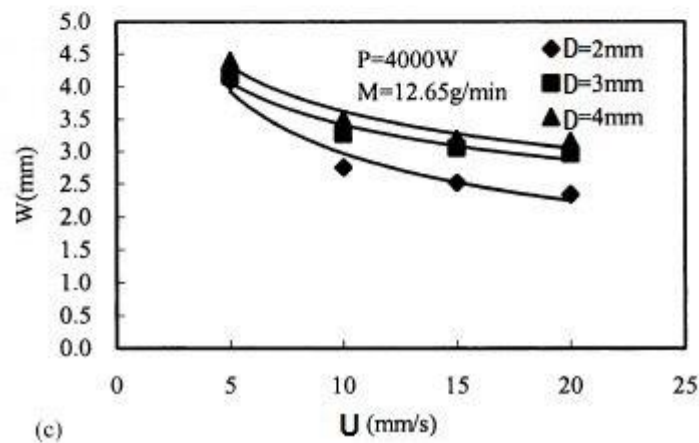
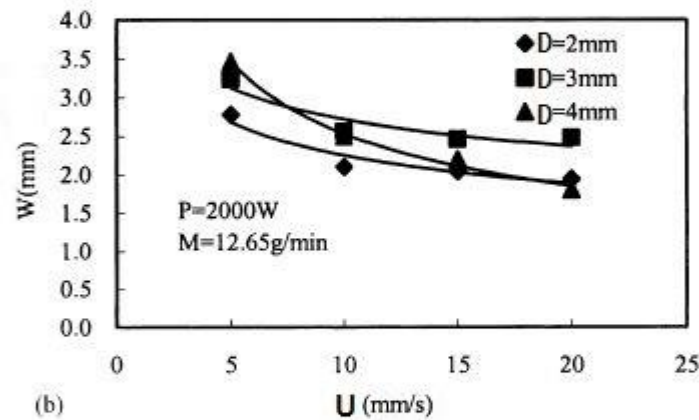
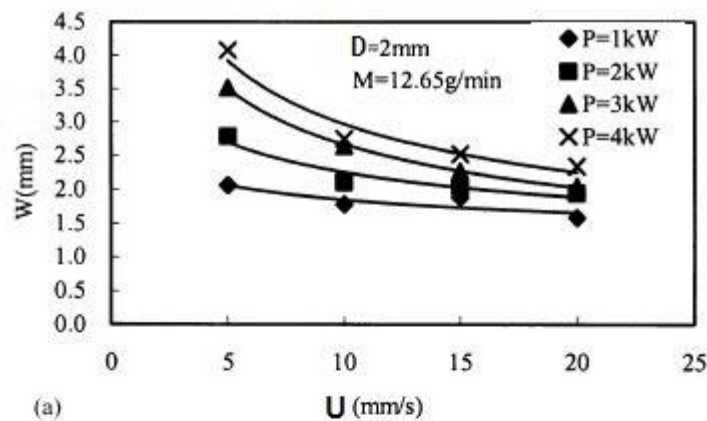


Figura 58 - Influência da densidade energética do laser na largura do revestimento; adaptada de [30]

Deste modo, é possível concluir que um aumento da energia específica aplicada, através do aumento do rácio entre potência e velocidade de varrimento (alturas e larguras de revestimento superiores) favorece taxas de deposição superiores.

Densidade Energética do Laser - Nível de Diluição

Para avaliar se a densidade energética do laser aplicada no processo é a mais apropriada, é recorrente estudar o nível de diluição do material de adição no material base. Para tal, estudam-se as dimensões principais do revestimento obtido, sendo elas a altura, H , a largura, W , e a profundidade, h (Figura 59).

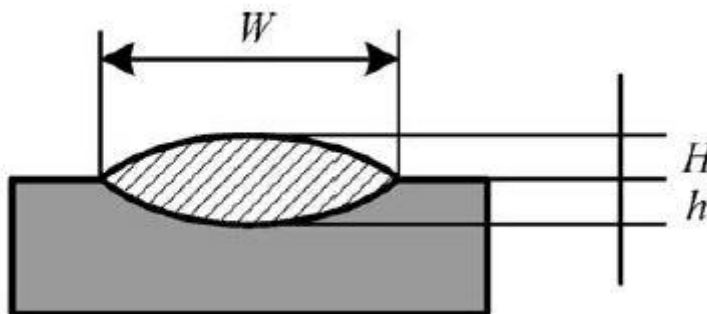


Figura 59 – Dimensões principais do revestimento produzido; retirada de [29]

Pelo estudo realizado por Peng et al. [29] é possível confirmar que, se o rácio de h por H for demasiado elevado, a ligação entre material de adição e material base sofre de diluição excessiva, condição que pode levar facilmente ao colapso na parte superior do componente. Por outro, se o rácio for demasiado baixo, existe o risco de a ligação entre materiais se encontrar muito fraca.

Em todo o caso, pela análise da Figura 60, especialmente da curva que aponta a evolução do rácio de h por H , pode-se verificar a influência da energia específica nas dimensões geradas e no nível de diluição. As imagens presentes no centro do gráfico indicam a evolução da ligação entre os materiais, para os diferentes valores de h / H .

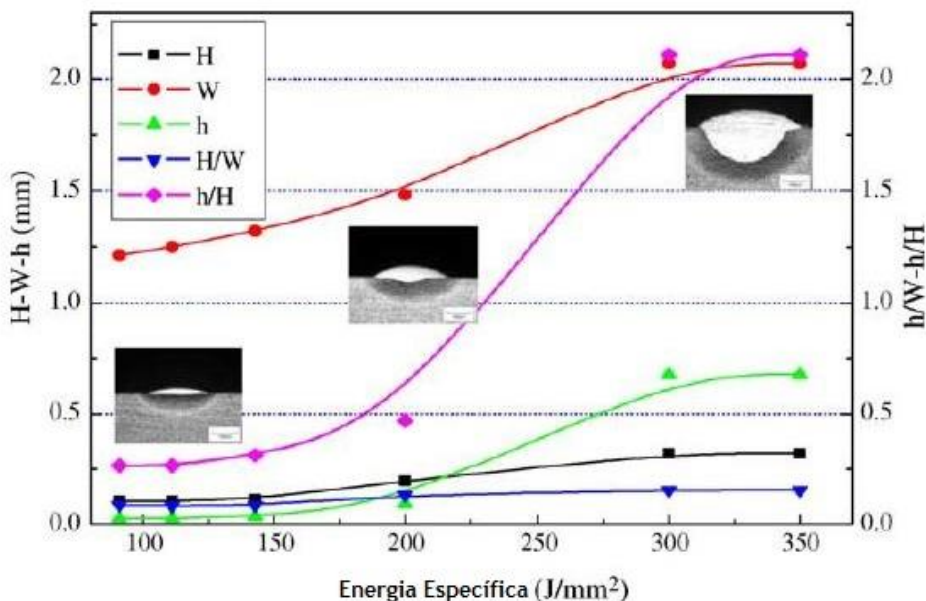


Figura 60 - Influência da densidade energética do laser no nível de diluição ; adaptada de [29]

A partir da figura anterior, conclui-se que o rácio de profundidade por altura do revestimento, ou seja, o nível de diluição, é proporcional à densidade energética do laser aplicada.

Densidade Energética do Laser - Acabamento Superficial

O parâmetro de densidade energética exerce também influência no acabamento superficial do componente produzido. Para energias específicas mais elevadas, a rugosidade obtida é menor, à custa, principalmente, da combinação entre baixas velocidades de varrimento e elevadas potências do laser [55].

Densidade Energética do Laser - Microestrutura

A energia específica é preponderante no tipo de microestrutura que se obtém. Em primeiro lugar, afeta a velocidade de arrefecimento de cada camada de material depositado, que como se sabe, tem influência direta na microestrutura e no seu tamanho de grão. Através da Figura 61, relativa ao tratamento de um aço de ferramentas, é possível verificar que, com o aumento da densidade energética aplicada, a velocidade de arrefecimento diminui linearmente.

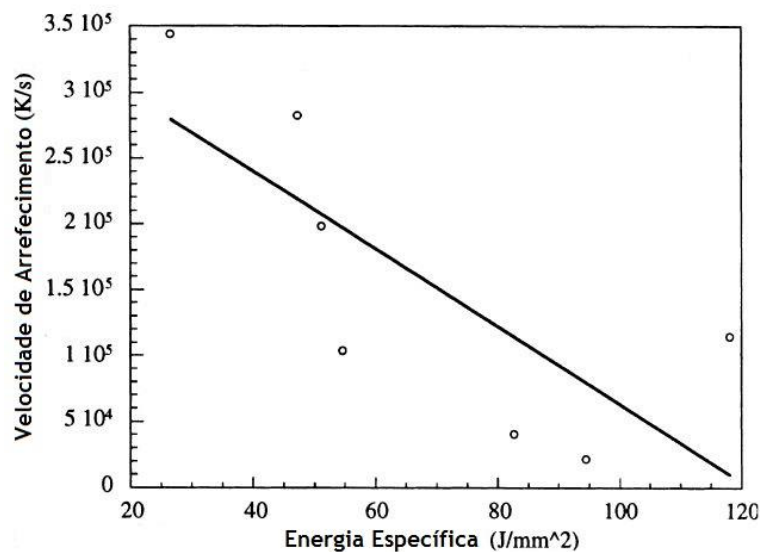


Figura 61 - Influência da densidade energética do laser nas velocidades de arrefecimento; adaptada de [31]

O estudo realizado por Kobryn et al. [23], referente ao processamento de uma liga Ti-6Al-4V, comprova também que a energia específica tem especial importância na microestrutura. No entanto, atribui maior relevância à velocidade de varrimento na determinação do tamanho de grão. Pela análise da Figura 62, verifica-se que um aumento deste parâmetro, para espessuras de base diferentes, provoca uma queda no tamanho de grão obtido.

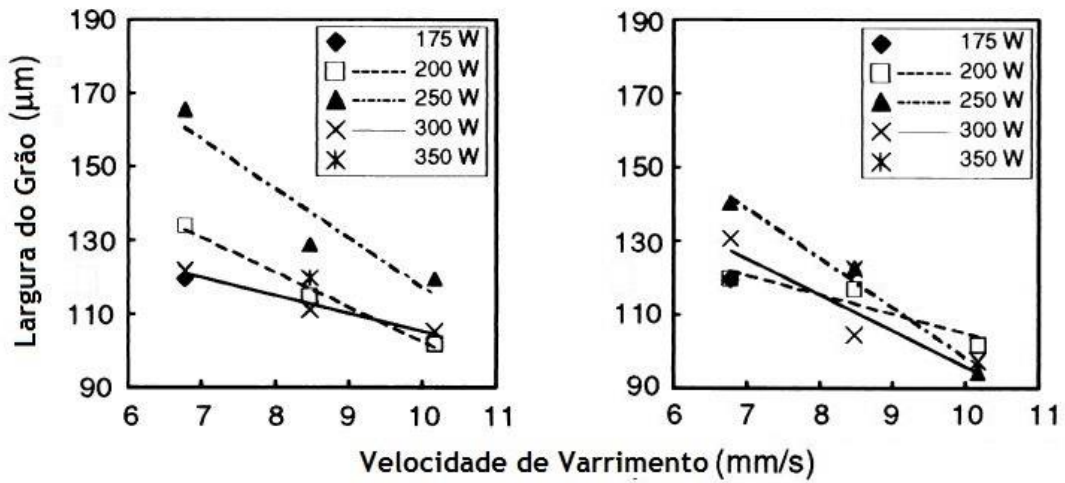


Figura 62 - Influência da densidade energética do laser (relação potência – velocidade de varrimento) no tamanho de grão; adaptada de [23]

Os resultados demonstrados na Figura 62 vão assim de encontro ao esperado, pelas mesmas razões já apontadas. Uma queda da densidade energética do laser, pelo aumento da velocidade de varrimento, provocará velocidades de arrefecimento superiores, que, por sua vez, produzirão grãos mais finos na microestrutura. A produção de grãos mais finos poderá então trazer algumas vantagens ao componente obtido, nomeadamente, a nível de resistência mecânica.

Densidade Energética do Laser - Zona Afetada pelo Calor

Para melhor compreender o que se entende por zona afetada pelo calor, na Figura 63, é possível visualizar as diferentes áreas num processo de Laser Cladding.

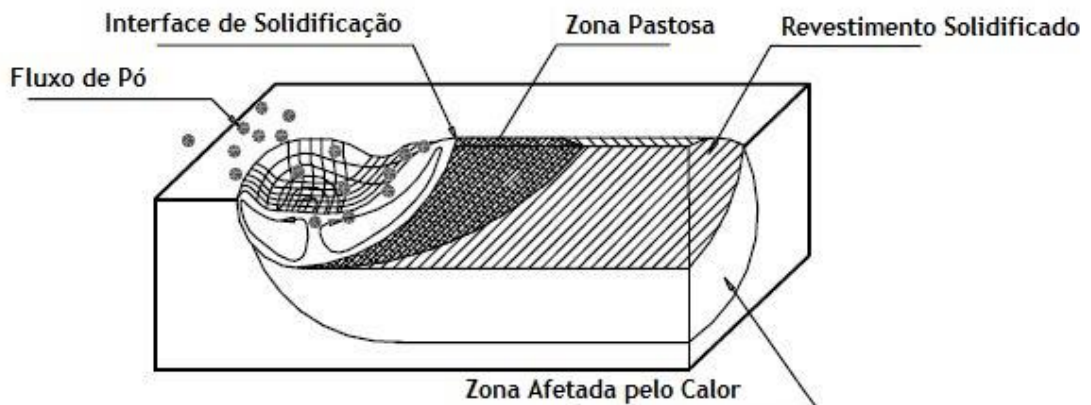


Figura 63 - Ilustração da zona afetada pelo calor presente no processo de Laser Cladding; adaptada de [13]

Durante a fase de deposição da matéria-prima, o calor gerado vai percorrer tanto o revestimento como a base, formando uma zona afetada pelo calor. Essa zona vai depender, não só das propriedades térmicas individuais de cada material, mas também da quantidade de energia incidente na superfície. Através da Figura 64, relativa ao processamento de um aço de ferramentas, é possível verificar a influência da densidade energética do laser nas dimensões da zona afetada pelo calor.

Através do estudo realizado por *Pinkerton et al.* [18], mantendo o diâmetro do feixe constante e fazendo apenas uma análise ao rácio entre potência do laser e velocidade de varrimento, através da figura observa-se que o parâmetro em questão não tem grande influência na profundidade. No entanto, a largura sofre alterações significativas aquando de um aumento da potência ou de uma redução da velocidade de varrimento.

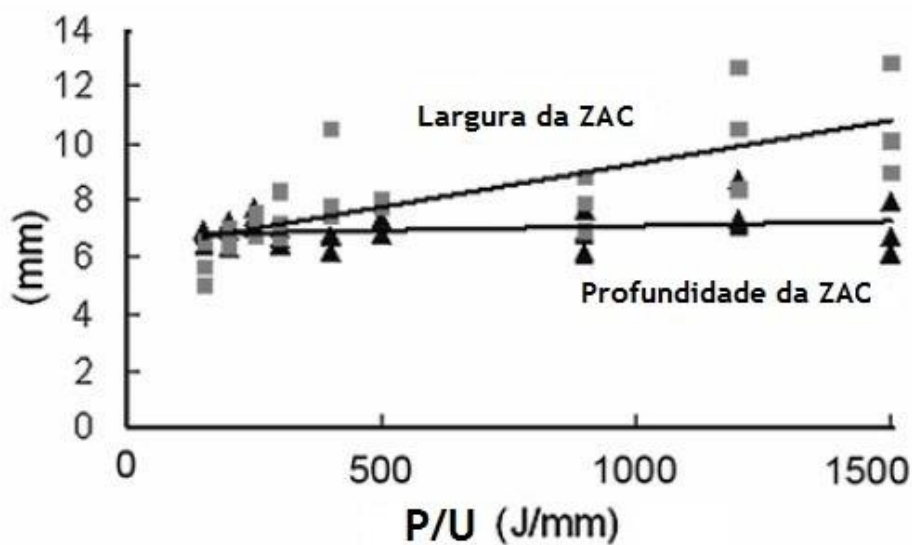


Figura 64 - Variação da largura e profundidade da zona afetada pelo calor com a densidade energética do laser (relação potência – velocidade de varrimento); adaptada de [18]

Densidade Energética do Laser - Porosidade

Uma das principais causas para o aparecimento de porosidade, em componentes fabricados pelo processo de Laser Cladding, reside na aplicação errada da densidade energética do laser.

A porosidade existente pode surgir em dois tipos. O primeiro, como já foi referido anteriormente, pode-se encontrar na ligação entre o material base e o material de adição. Nestes casos, é possível verificarem-se ligações fracas entre os dois materiais, através da falta de fusão em ambos, originando o aparecimento de espaços indesejados. Através da Figura 65, no tratamento de uma liga Ti-6Al-4V, pode-se observar a porosidade causada pela fusão insuficiente das partículas de pó.

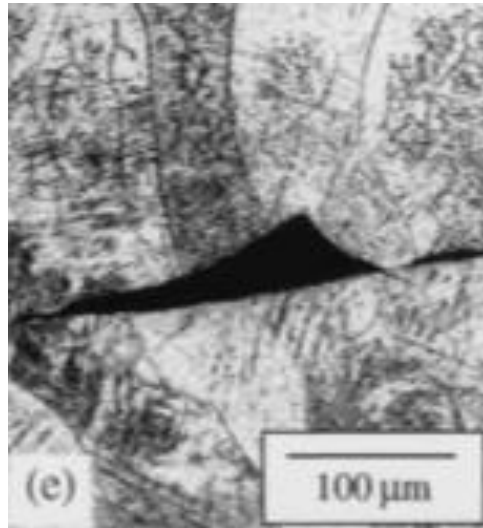


Figura 65 - Porosidade causada pela fusão insuficiente das partículas de pó de uma liga Ti-6Al-4V; retirada de [23]

O segundo tipo de porosidade, bastante recorrente na produção de componentes por este processo de fabrico, encontra-se sob a forma de cavidades esféricas (Figura 66). O seu aparecimento é provocado, principalmente, pela introdução de gás inerte durante o processo.

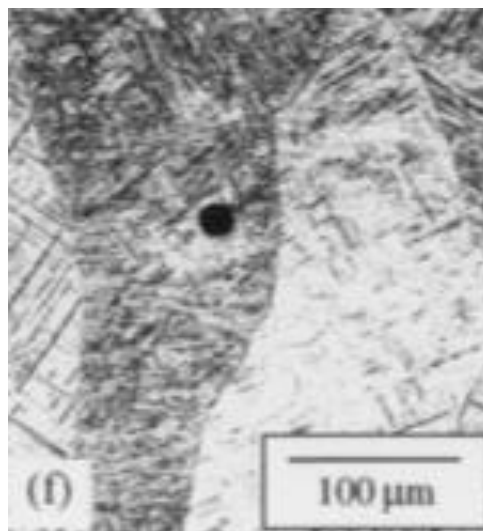


Figura 66 - Porosidade causada pela introdução de gás durante o processo no tratamento de uma liga Ti-6Al-4V; retirada de [23]

Para ambos os casos, é possível afirmar que, não existe uma relação direta entre a densidade energética do laser e a porosidade obtida. No entanto, verifica-se que, aumentando até certo ponto, tanto a potência do laser, como a velocidade de varrimento, o nível de porosidade decresce, o que comprova que existem gamas de energia específica próprias para o tratamento das diferentes ligas. Pela análise da Figura 67, podem-se observar as diferenças no nível de porosidade com as variações de potência e velocidade de varrimento, no processamento da mesma liga. De qualquer dos modos, crê-se que, no caso da aplicação de potências mais elevadas, uma diminuição da velocidade de varrimento possa ser favorável à redução da porosidade.

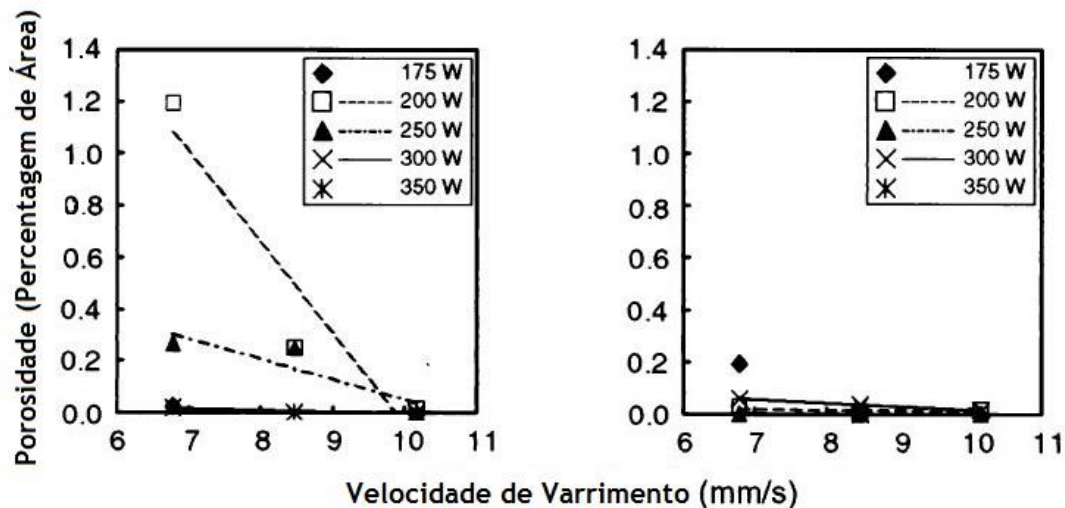


Figura 67 - Influência da densidade energética do laser (relação potência – velocidade de varrimento) na porosidade obtida, para bases de pequena espessura (à esq.) e bases de grande espessura (à dir.); adaptada de [23]

Concentração de Pó Depositado - Taxa de Deposição

A concentração de pó representa um peso considerável no resultado final obtido num processo de Laser Cladding. Como já foi mencionado, esta depende da velocidade de alimentação do pó, do diâmetro do feixe laser e da velocidade de varrimento. Grande parte da influência que este parâmetro combinado exerce já foi abordada nas secções referentes a cada parâmetro individualmente. No entanto, deve-se salientar a relevância que a combinação dos diferentes parâmetros pode ter na taxa de deposição, índice que fornece uma visão geral do rendimento do processo.

Através da Figura 68, no processamento de uma liga de níquel, é possível verificar a altura do revestimento obtida com a variação da velocidade de alimentação do pó e da velocidade de varrimento, mantendo constante o diâmetro do feixe laser.

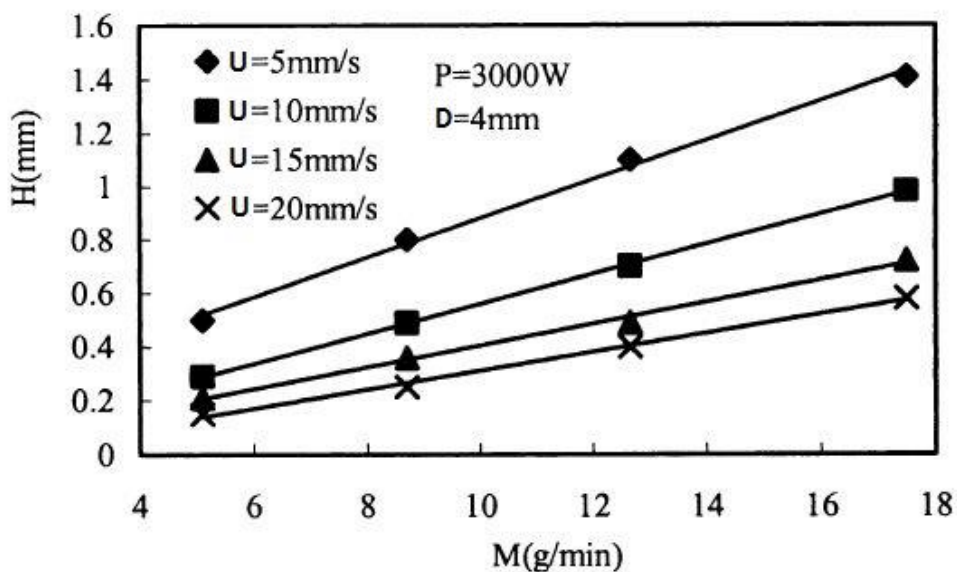


Figura 68 - Influência da concentração de pó depositado (relação velocidade de alimentação - velocidade de varrimento) na altura do revestimento; adaptada de [30]

Pela figura apresentada, observa-se que, tanto um aumento da velocidade de alimentação do pó, como uma redução da velocidade de varrimento, contribuem significativamente para alturas de revestimento superiores. Como seria de esperar, para um *spot* constante, quanto maior for o rácio entre estes dois parâmetros, maior será a altura do *clad* obtida e, conseqüentemente, a taxa de deposição será superior.

4.3. Pós-Processamento

A fase de pós-processamento diz respeito aos tratamentos térmicos e mecânicos realizados numa fase posterior à da deposição da matéria-prima, com o objetivo de melhorar o acabamento superficial e de reduzir as tensões residuais do componente.

No que diz respeito ao presente capítulo, é necessário referir que não existem parâmetros concretos de processamento. No entanto, é de salientar que existem algumas recomendações a ter em conta, para o bom funcionamento do processo de Laser Cladding.

Em primeiro lugar, a aplicação correta dos parâmetros abordados na secção anterior pode minimizar a realização desses tais processos posteriores. Através da Figura 69, é possível verificar os efeitos de uma aplicação não muito cuidada dos parâmetros de processamento, num revestimento de um componente.



Figura 69 – Exemplo de componente produzido com uma incorreta aplicação dos parâmetros de processamento, antes e depois do tratamento de acabamento; retirado de [25]

Em segundo lugar, o controlo cuidadoso das dimensões geradas no processo, pode ser traduzido numa redução significativa de custos, através da redução, tanto de processos de acabamento, como de tratamentos térmicos.

Por um lado, respeitando a aplicação correta de parâmetros como o diâmetro do feixe laser, a velocidade de alimentação do pó e o caudal de gás inerte, é possível, por si só, produzirem-se componentes com índices de rugosidade inferiores. Por outro, a introdução de sensores para controlo das dimensões geradas, reduz frequentemente a utilização de tratamentos mecânicos. Num estudo realizado por *Mazumder et al.* [14], conseguiu-se reduzir a rugosidade em média 14 a 20 %, só pela inclusão dos sensores de medição. Deste modo, evitam-se também erros na produção de componentes, como os observados na Figura 70, à direita.

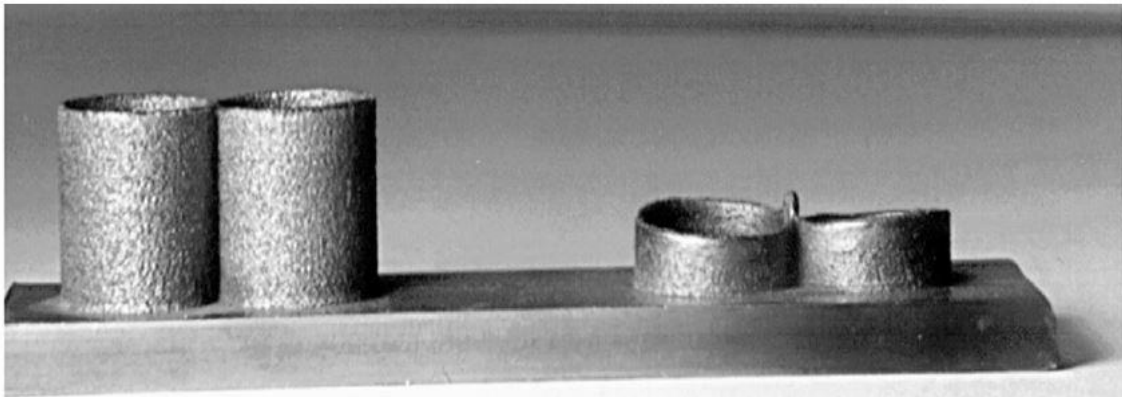


Figura 70 - Erros evidenciados na produção de componentes, por falta de controlo das dimensões do clad; retirado de [14]

No que toca a tratamentos térmicos, através de um controlo adequado das velocidades de arrefecimento, é possível manipular as microestruturas geradas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas obtidas, não sendo então necessário recorrer-se, muitas das vezes, a tratamentos para o alívio de tensões residuais. Por outro lado, mais uma vez, a introdução de sensores, neste caso, para a medição das temperaturas geradas no procedimento (Figura 71), pode ser vantajoso para se produzirem componentes sem a necessidade de tratamentos térmicos posteriores.



Figura 71 – Exemplo de sistema de controlo das temperaturas geradas no processo de Laser Cladding; retirado de [13]

5. Conceção de um Sistema de Laser Cladding a partir de um Sistema de Corte e Soldadura

Após uma revisão teórica dos conceitos que envolvem o processo de Laser Cladding, foi proposta a apresentação de um projeto de implementação do processo, através da adaptação de um sistema de corte e soldadura já existente.

Para tal, foi projetada uma metodologia simples para a introdução do sistema, podendo essa ser observada pela Figura 72. Através de uma avaliação inicial dos componentes presentes no sistema de corte e soldadura, foi possível passar à formulação de ideias para a introdução do processo de Laser Cladding. Foi então realizada a verificação das limitações existentes na adaptação do sistema de corte e soldadura para, por fim, apresentar uma ou mais soluções de implementação do novo sistema. A metodologia apresentada teve um carácter iterativo, sendo que, após o levantamento das limitações da adaptação, foi sempre ponderada a viabilidade do projeto.

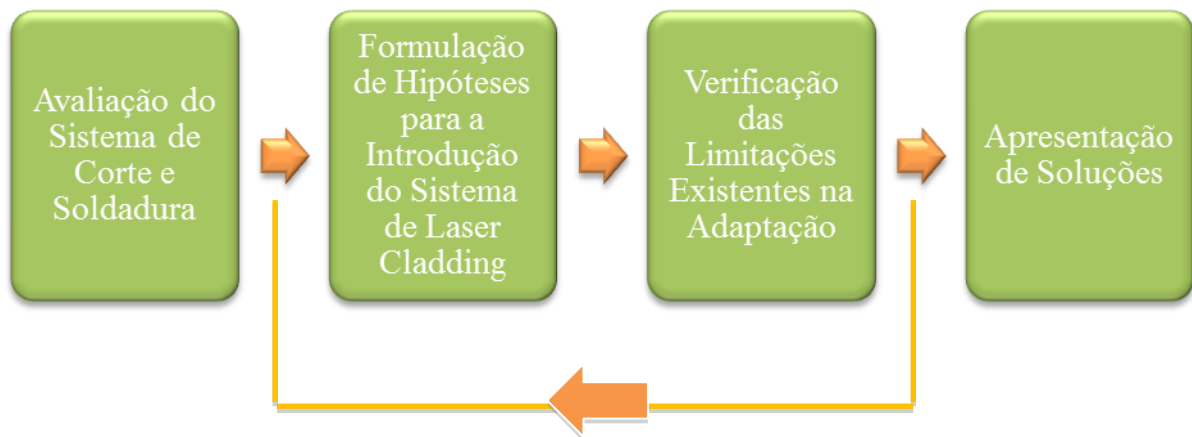


Figura 72 - Metodologia utilizada para a implementação do processo de Laser Cladding

Atualmente, o sistema possuído pelo INEGI é constituído por um robô CNC, de seis eixos, uma cabeça de corte e soldadura, uma mesa de operações e uma fonte de laser de fibra. Pela Figura 73, é possível observar o sistema, ainda em construção, com apenas o robô e os módulos periféricos que suportam a mesa de operações.



Figura 73 - Sistema robotizado atualmente em posse do INEGI

Na versão final, o sistema robotizado, já com a introdução do processo de Laser Cladding, terá um aspeto semelhante ao da Figura 74.

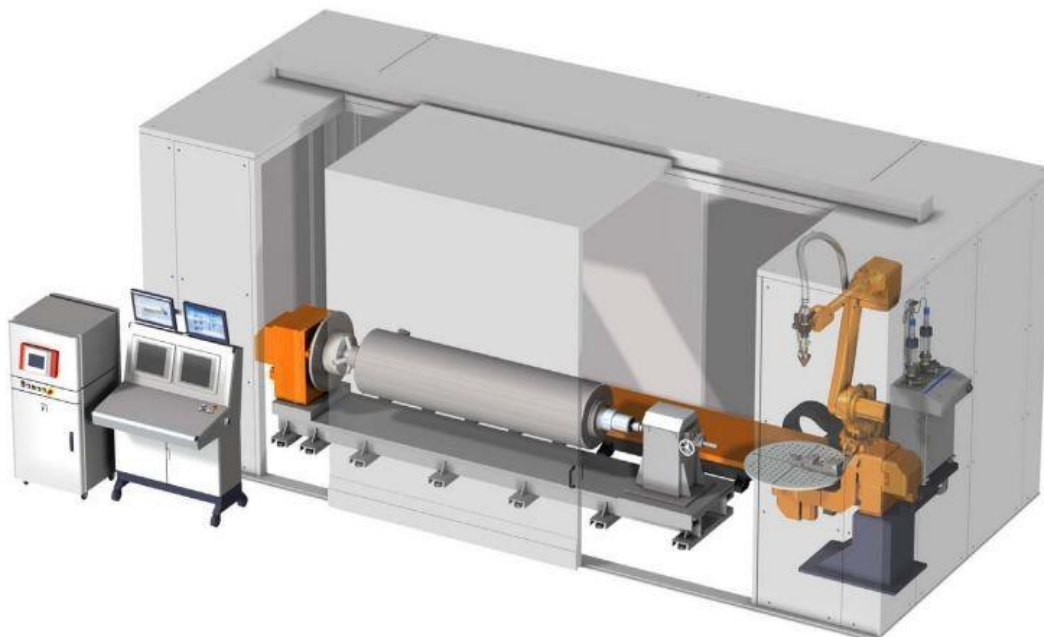


Figura 74 - Ilustração de um sistema de Laser Cladding robotizado; retirado de [5]

Através da Figura 75, é possível observar, de uma forma mais pormenorizada, um exemplo de um sistema de Laser Cladding em atuação.

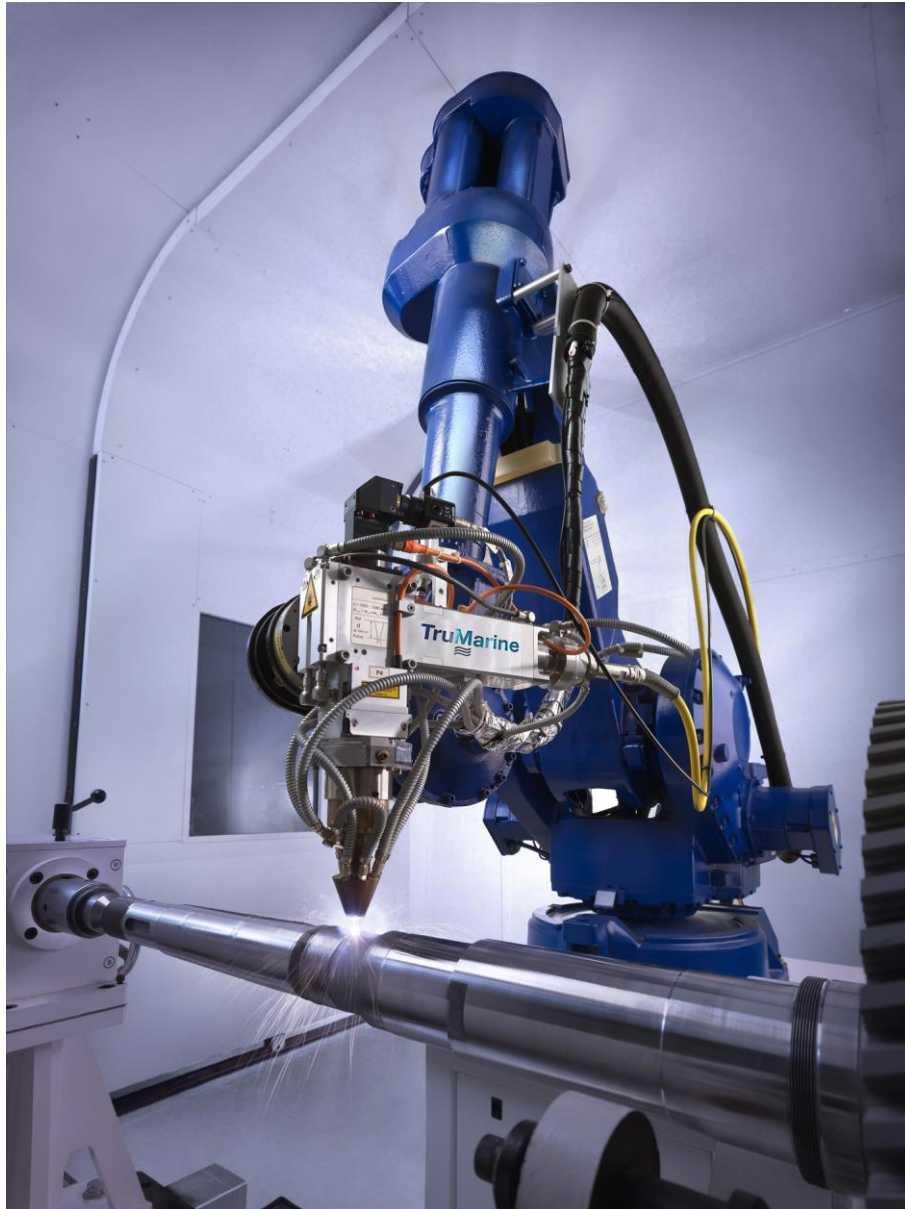


Figura 75 - Exemplo de um sistema d Laser Cladding em atuação; retirado de [10]

De forma a corresponder aos requisitos impostos para a adaptação do sistema foram iniciados contactos com diferentes entidades, entre elas o Instituto Fraunhofer. Desta forma, foi possível recolher informações relevantes quanto às diversas possibilidades de implementação do processo de Laser Cladding

5.1. Descrição do Sistema de Corte e Soldadura e seus Componentes

O sistema de corte e soldadura atualmente em posse pelo INEGI é composto por diferentes elementos, podendo estes ser divididos nas cinco categorias expostas nesta secção. Com uma avaliação sucinta aos diferentes componentes do sistema, tem-se como objetivo perceber qual o equipamento que se poderá manter na adaptação para a implementação do processo de Laser Cladding. Nesta secção serão apenas mencionados os parâmetros e especificações mais relevantes para o projeto de adaptação.

5.1.1. Fonte de Energia

A fonte de energia utilizada no sistema já existente é constituída por um laser de fibra Rofin FL 030, com 3 kW de potência máxima (Figura 76).



Figura 76 - Fonte de Laser Rofin FL 030 – versão compacta; retirada de [2]

É necessário ter em conta principalmente as seguintes especificações:

- comprimento de onda produzido de 1064 nm;
- gama de potências nominais possíveis de aplicar - entre 300 a 3000 W.

5.1.2. Cabeça de Corte e Soldadura

O modelo da cabeça implementado no sistema atual e apresentado na Figura 77 é um combo Laserfact F2-Y, capaz de desempenhar as funções de corte e soldadura. As suas especificações principais podem ser verificadas no **Anexo F**, anexo que terá importância para uma secção futura.

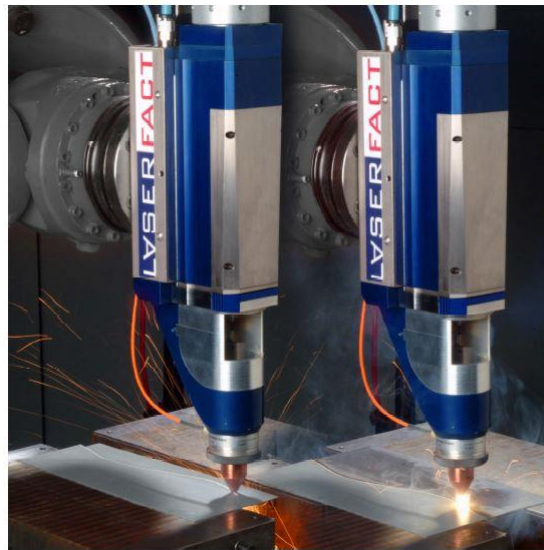


Figura 77 - Cabeça de corte e soldadura Laserfact F2-Y; retirada de [8]

5.1.3. Robô

O robô presente no sistema de corte e soldadura é o modelo RV60-40 da Reis Robotics, apresentado na Figura 78. Possui seis eixos com diferentes ângulos de trabalho, como pode ser observado no **Anexo G**, e uma flange de ligação a uma cabeça de processamento (especificações descritas no **Anexo H**).



Figura 78 - Robô de seis eixos Reis RV60-40, com pormenor ampliado da flange de ligação

5.1.4. Mesa de Operações

A mesa de operações presente no sistema de corte e soldadura encontra-se segura por dois módulos periféricos Reis RDM11 (Figura 79). Relativamente a este componente, é necessário apenas referir que apenas possui um eixo de rotação horizontal.



Figura 79 - Módulos periféricos Reis RDM11

5.1.5. Outros

Para além dos componentes até então mencionados, é importante acrescentar outros dois: as fibras óticas e o colimador (Figura 80).

No sistema de corte e soldadura, as fibras utilizadas têm dois diâmetros diferentes: 100 e 400 μm . Mediante o material que está a ser processado, o utilizador pode alternar entre os dois diâmetros, através de um *beam switch*. As fibras são então conectadas ao colimador através de uma baioneta estilo QB.

Por outro lado, o colimador, possui um encaixe standard d50 (M58x1) na cabeça de processamento e, entre outros, uma distância focal de 120 mm [3].



Figura 80 - Colimador Optoskand com montagem de baioneta QB (à esq.) e fibras óticas Optoskand (à dir.); retirados de [3, 4]

5.2. Formulação de Hipóteses para a Introdução do Sistema de Laser Cladding

Após a avaliação dos diferentes componentes presentes no sistema de corte e soldadura, passou-se então para a fase de formulação de hipóteses para a introdução do processo de Laser Cladding por injeção de pó.

É de salientar que, na presente fase do projeto, teve-se em conta o maior aproveitamento possível dos componentes presentes no sistema de corte e soldadura, com o objetivo de existir uma redução de custos na implementação final do novo processo.

Como seria de esperar, a hipótese mais óbvia seria a de substituir a cabeça de corte e soldadura por uma cabeça de Laser Cladding. No entanto, optou-se, em primeiro lugar, por estudar a hipótese da substituição de um componente mais simples: o *nozzle*.

5.2.1. Alteração do *Nozzle* da Cabeça de Corte e Soldadura

A hipótese de alteração do *nozzle* da cabeça de corte e soldadura surge pela aparente simplicidade da sua adaptação. Através da substituição deste componente e da junção de um alimentador de pó, o sistema passaria a poder desempenhar as funções do processo de Laser Cladding (Figura 81).

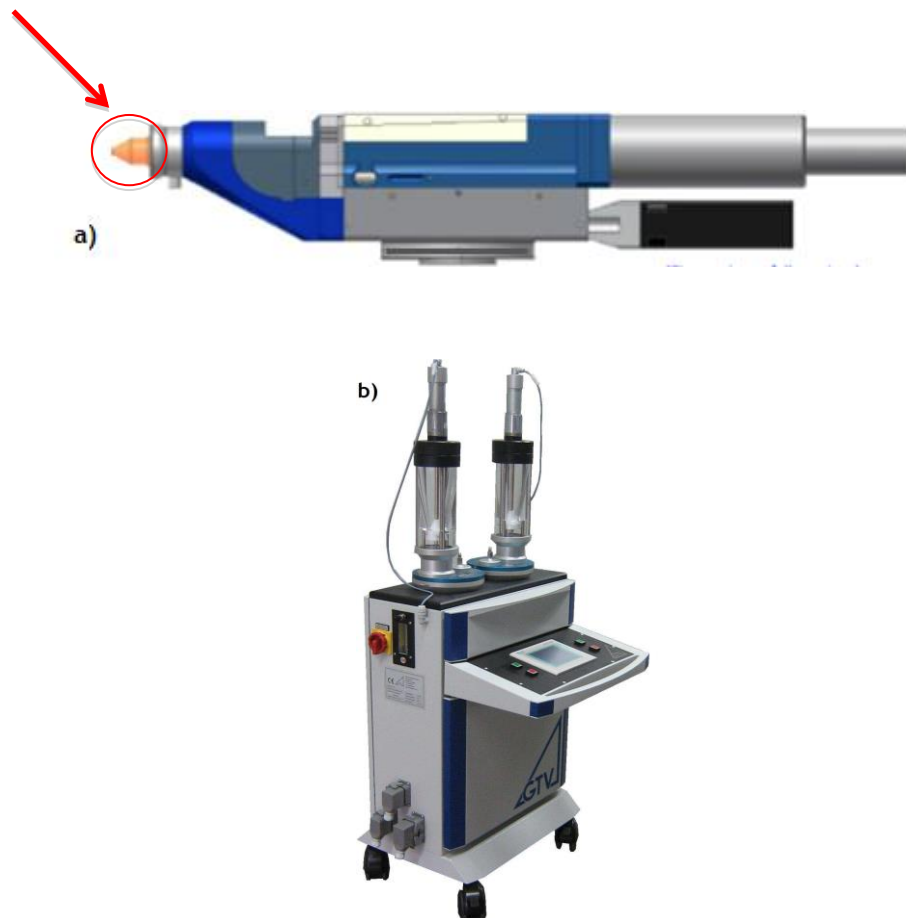


Figura 81 - Primeira hipótese de introdução do sistema de Laser Cladding: a) substituição do *nozzle*; b) introdução de um alimentador de pó (retirado de [11])

Recordando os esquemas de funcionamento do processo de Laser Cladding, expostos no capítulo 3, pode-se afirmar que, com esta adaptação, o percurso do feixe laser se manteria intacto (Figura 10 da página 14). Por outro lado, visto que no sistema de corte e soldadura o percurso da matéria-prima é diferente, através desta adaptação poder-se-ia obter algo semelhante ao esquema apresentado na Figura 11, da página 15.

Com a introdução de um tipo de *nozzle* semelhante ao apresentado na Figura 82, os custos na adaptação do sistema seriam bastante menores, pois seria possível manter-se a maior parte dos componentes do sistema prévio. No entanto, a seguinte solução apresentou um conjunto de restrições que levou ao abandono desta hipótese.



Figura 82 - Nozzle coaxial de Laser Cladding; retirada de [12]

Ao verificar as dimensões da cabeça de corte e soldadura, chegou-se à conclusão de que estas eram significativamente inferiores às esperadas e, deste modo, seria bastante difícil ostentar um *nozzle* mais robusto, próprio de um processo de Laser Cladding.

Por outro lado, verificou-se que, entre a alternância entre os processos de corte e soldadura e o processo de Laser Cladding, teria de ocorrer um processo extensivo de calibragem do *nozzle*. Para além do tempo perdido na montagem e desmontagem dos componentes, seria verificada uma perda acrescida para este procedimento. Relativamente ainda à calibragem, ainda se verificariam alguns custos associados, não só pelo tempo perdido, mas também pela mão-de-obra acrescida, necessária para a manutenção do sistema.

Outra desvantagem desta hipótese estudada residia nas distâncias à superfície de trabalho. Ao realizar a troca entre processos, teria de existir um ajuste na posição da cabeça em relação à mesa de operações. Desta forma, para se garantir o bom funcionamento do processo de Laser Cladding teria de ser realizado um conjunto de testes para definir a distância de trabalho mais apropriada.

Por último, foi também estudada a hipótese de introdução de um *nozzle* lateral, mantendo a cabeça de corte e soldadura intacta. No entanto, esta solução foi rapidamente abandonada devido a uma série de fatores.

Em primeiro lugar, como já foi mencionado no capítulo 3, na secção referente aos diversos sistemas de distribuição de pó, a utilização de um *nozzle* lateral, num processo de Laser Cladding, apresenta uma dependência posicional da administração de pó em relação à aplicação do feixe laser. A partir deste ponto, é possível assumir que, para este caso, ocorre tanto uma perda de flexibilidade do processo, como um aumento da necessidade de controlo do mesmo.

Com a introdução do *nozzle* lateral, seria impossível contornar o aumento do equipamento presente na área de trabalho. Como é colocado à parte, teria de existir também um centro de comando que controlasse a posição do *nozzle*, para este poder produzir os parâmetros de processamento mais adequados. O aumento do equipamento, seria obviamente traduzido em custos acrescidos.

Na Tabela 12, são apresentadas, de um modo resumido, os problemas e restrições da primeira hipótese de introdução do sistema de Laser Cladding.

Tabela 12 – Restrições e desvantagens associadas à introdução de um *nozzle* de Laser Cladding

	Tipo de <i>Nozzle</i>	Restrições e Desvantagens
Introdução de um <i>Nozzle</i> de Laser Cladding	Coaxial	<p>Dimensões excessivas do <i>nozzle</i> em relação à cabeça de corte e soldadura;</p> <p>Tempo e custos de calibragem excessivos, na troca entre <i>nozzles</i>;</p> <p>Ajustes necessários da distância à superfície de trabalho.</p>
	Lateral	<p>Perda de flexibilidade do processo em relação a outras soluções construtivas;</p> <p>Aumento da necessidade de controlo aos parâmetros de processamento;</p> <p>Custos acrescidos relativamente ao aumento de equipamento necessário.</p>

5.2.2. Nova Cabeça de Laser Cladding

Posta de parte a hipótese de substituição do *nozzle*, passou-se para a análise de uma possível introdução da cabeça de Laser Cladding no sistema (Figura 83). À partida, sabe-se que, no caso de se adotar esta opção, os custos relativos à aquisição do produto serão superiores. No entanto, estes poderão ser ofuscados pela qualidade do produto final obtida. Por outro lado, é possível afirmar que a maior parte dos restantes componentes do sistema poderá manter-se intacta, não sendo necessária a sua substituição.



Figura 83 - Segunda hipótese de introdução do sistema de Laser Cladding – cabeça de Laser Cladding; retirada de [9]

A escolha de uma cabeça própria para desempenhar as funções de Laser Cladding, apesar de ser a mais óbvia, apresenta um conjunto de limitações que serão necessárias contornar.

5.3. Verificação das Limitações Existentes na Adaptação do Processo

Com a introdução de uma cabeça de Laser Cladding, existe um conjunto de limitações que, se não forem tidas em conta, não permitirão a adaptação correta do sistema prévio. O conjunto de limitações pode ser repartido pelos quatro grupos apresentados na Figura 84.

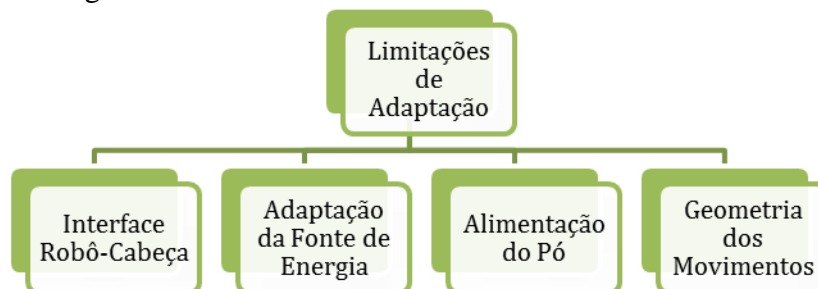


Figura 84 - Conjunto de Limitações de Adaptação

Os dois primeiros, dependentes da solução de adaptação implementada, dizem respeito ao interface robô-cabeça e à adaptação da fonte de energia. Os restantes, de um caráter mais geral, são relativos à alimentação do pó e à geometria dos movimentos.

Interface Robô-Cabeça

Com a solução de implementação do sistema de Laser Cladding, pela introdução de uma nova cabeça, levanta-se, à partida, uma questão pertinente: como se consegue o acoplamento da cabeça no robô?

Adaptação da Fonte de Energia

No que diz respeito à adaptação da fonte de energia, são três as principais preocupações que se devem ter em conta.

Em primeiro lugar, é necessário verificar se o tipo de laser utilizado é o mais apropriado para a aplicação do processo de Laser Cladding, tendo em conta o comprimento de onda que emite e a potência que fornece.

Em segundo lugar, é importante saber se é possível manter o colimador já utilizado no sistema prévio, analisando pelo menos o tipo encaixe requerido para a ligação.

Por último, é necessário verificar se os diâmetros de fibra utilizados no sistema de corte e soldadura podem ser utilizados para produzir deposições eficientes.

Alimentação do Pó

Relativamente à alimentação do pó durante o processo, a escolha do alimentador constitui um passo importante no projeto de adaptação. É então necessário verificar qual o tipo de alimentador mais adequado, através da análise das diferentes soluções construtivas apresentadas também no capítulo 3.

Geometria dos Movimentos

No que toca à geometria dos movimentos necessária para a realização do processo de Laser Cladding, é necessário verificar, de um modo sucinto, se a mesa de operações utilizada no sistema prévio, com apenas um eixo de rotação, é suficiente para produzir componentes de geometria mais complexa.

5.4. Apresentação de Soluções de Adaptação

No presente capítulo de apresentação de soluções, tem-se como objetivo apresentar respostas às questões colocadas na secção anterior, apresentando também algumas soluções sob a forma de modelação 3D. Para tal, foram aplicados os conhecimentos adquiridos no estudo teórico apresentado nos capítulos 3 e 4, recorrendo ao software *Solidworks* para a conceção dos modelos 3D.

Mais uma vez, salienta-se que teve-se como objetivo manter a maior parte dos componentes do sistema de corte e soldadura.

5.4.1. Cabeça de Laser Cladding

A primeira fase do projeto de adaptação passa pela escolha da cabeça que viria a substituir aquela presente no sistema de corte e soldadura. Desta forma, iniciou-se contacto com o Instituto Fraunhofer para poder perceber quais as cabeças de Laser Cladding que poderiam desempenhar as funções do processo do modo mais eficiente possível, tendo em conta o sistema atual adquirido pelo INEGI. Entre outras soluções, foi aconselhado o modelo *VarioClad* da Reis Lasertec, com capacidade de produzir diferentes larguras de revestimento, sem alteração do ponto focal [9].

Tendo em vista um modelo semelhante ao aconselhado, foi concebido um desenho tridimensional, com o auxílio do software *Solidworks*. Através da Figura 85, é possível verificar a modelação esquemática da cabeça, na qual estão salientes dois dos componentes mais importantes: o colimador, por onde entra o feixe laser, e o *nozzle*, ponto de entrada do fluxo de pó.

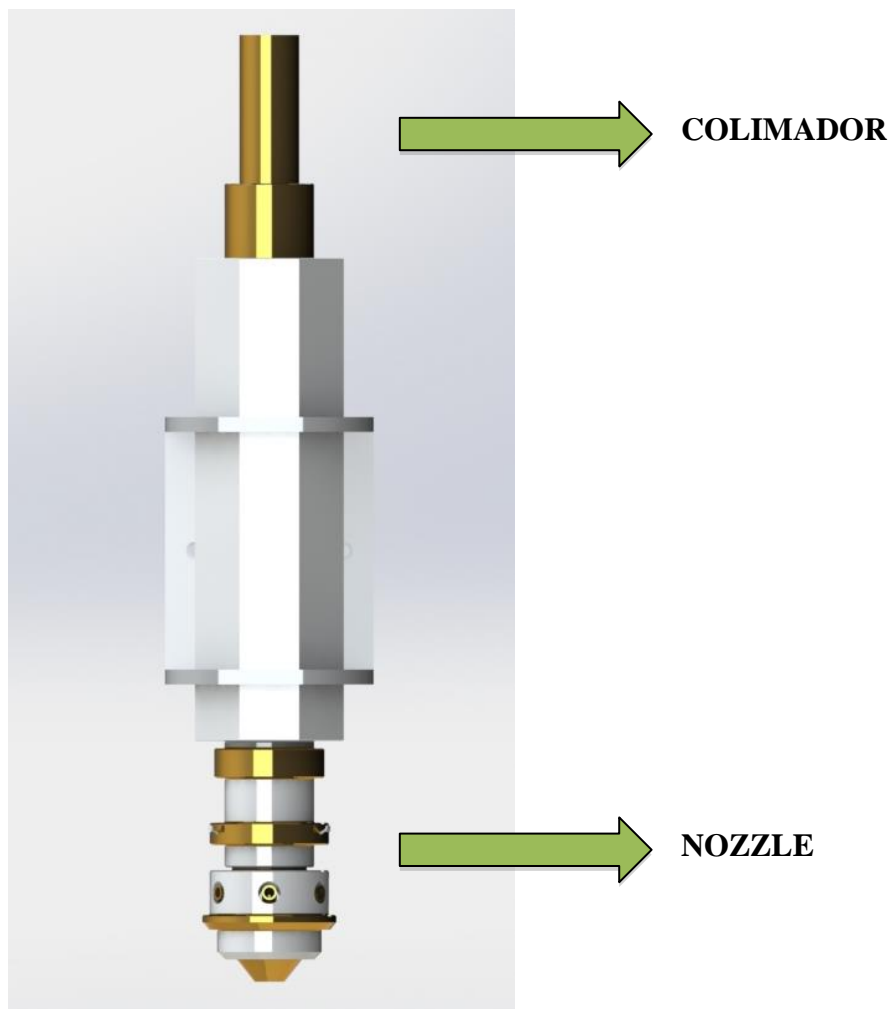


Figura 85 - Cabeça de Laser Cladding modelada

Numa vista pormenorizada do *nozzle* (Figura 86), é possível verificar o ponto de entrada das tubagens que transportam as partículas de pó. É de salientar que nem todas as entradas são ocupadas apenas pela matéria-prima. Algumas são reservadas para o fluxo de gás inerte, com o objetivo de proteger o revestimento contra a oxidação e auxiliar a projeção das partículas, na viagem até à superfície de trabalho.

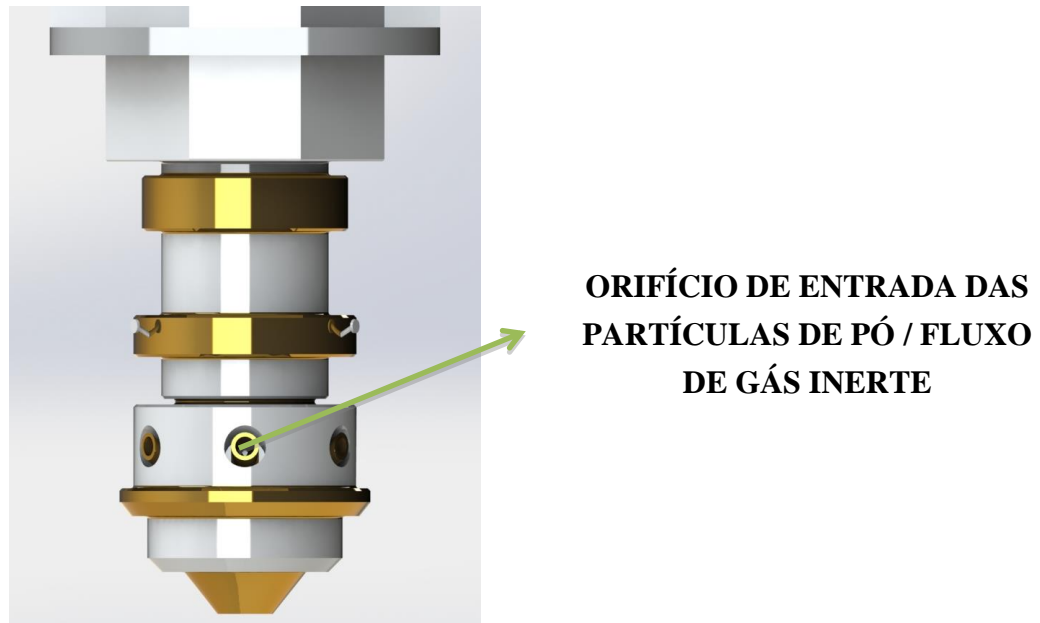


Figura 86 - Vista pormenorizada do *nozzle* modelado

Pela Figura 87, é possível observar um esquema do interior da cabeça modelada, mais propriamente do *nozzle*, com o objetivo de perceber a distinção entre os percursos do feixe laser e das partículas de pó.

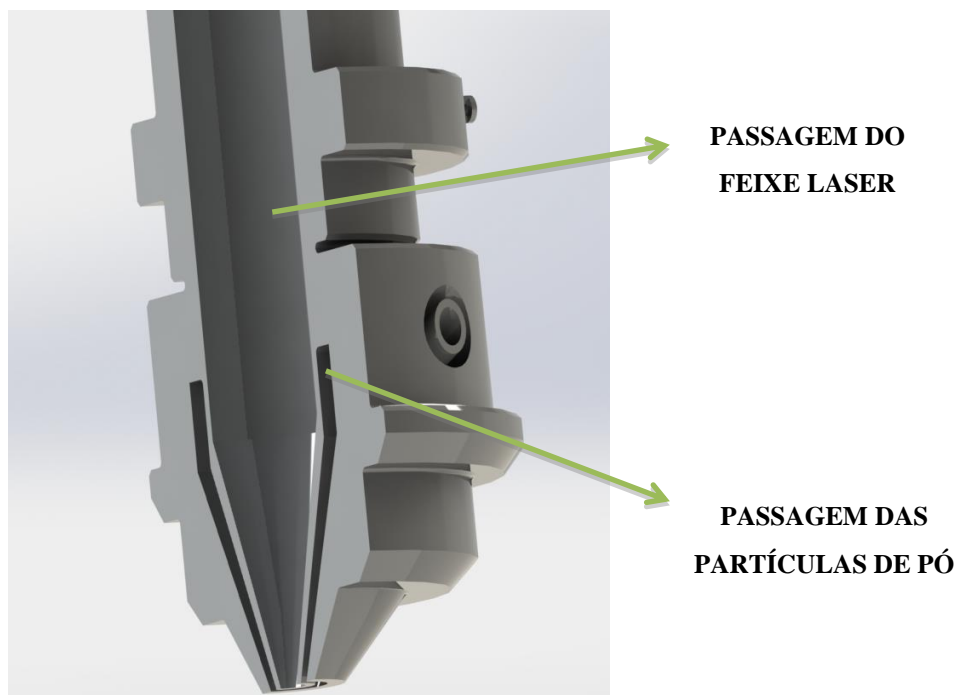


Figura 87 - Esquema do interior da cabeça modelada

5.4.2. Interface Robô-Cabeça

Com o modelo da cabeça já assumido, põe-se a questão de como se realiza o acoplamento da mesma no robô. Numa situação normal, o fabricante da cabeça cria o interface mediante o sistema robotizado do cliente. Para estes casos, o interface pode ser standard ou customizado.

Posto este problema, decidiu-se modelar um suporte que estabelecesse a fixação da flange do robô na cabeça de Laser Cladding. Desta vez, a modelação não foi baseada em nenhum modelo existente. Teve-se apenas por base as especificações referentes à flange do robô, presentes no **Anexo H**.

Pelo sistema anterior, a fixação no robô é dada por uma flange de adaptação ligada diretamente à cabeça (verificado pelo **Anexo F**). Demonstrado também no **Anexo H**, respetivo à flange do robô, encontram-se também as tolerâncias para a montagem. É possível verificar que, para o sistema robotizado em questão, a montagem deverá ocorrer de acordo com a norma DIN 9409-1. A ligação dar-se-á através de seis parafusos M8, com a adição de um pino para centragem interna e externa dos componentes.

Com o auxílio do software *Solidworks*, foi então criado um sistema intermédio de fixação que permite o acoplamento dos dois componentes. Através da Figura 88, é possível visualizar o acoplamento do mesmo na cabeça.

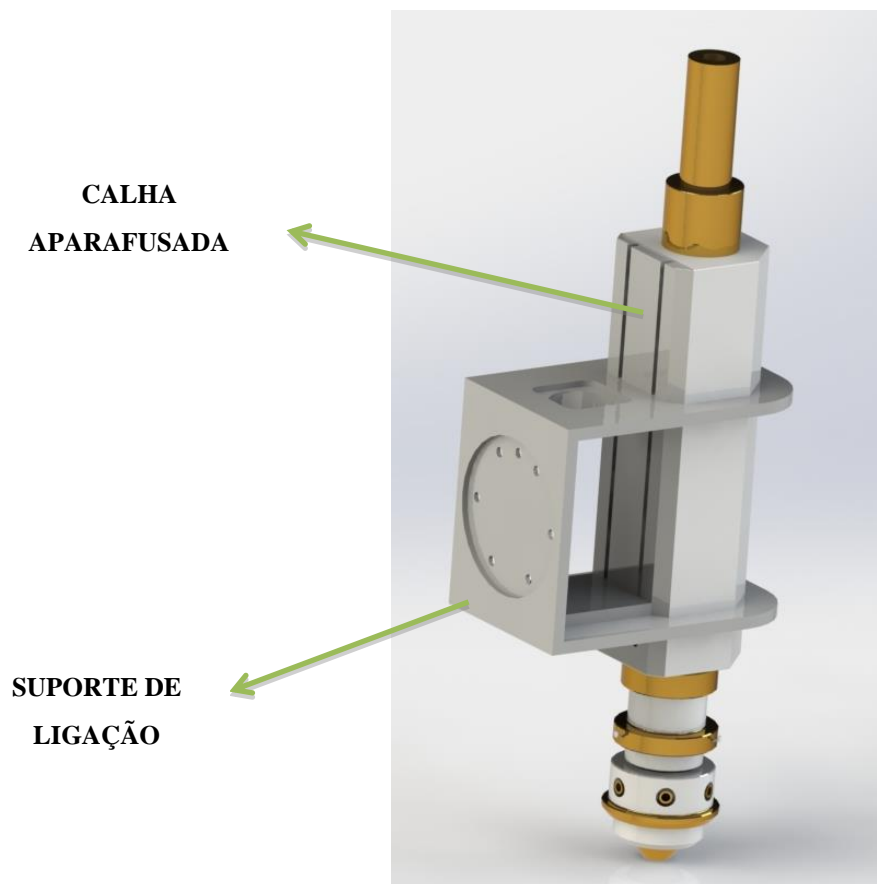


Figura 88 - Sistema de ligação entre robô e cabeça de Laser Cladding

O sistema concebido assenta num princípio simples de deslizamento. Ao fixar uma calha à cabeça de Laser Cladding e acrescentando um suporte intermédio que deslize sobre ela, é possível criar um espaço que poderá ser utilizado para apertar os parafusos M8 ao robô. Através da Figura 89, é possível observar, de outro ângulo, o espaço criado para o aperto dos parafusos. É de salientar que, na modelação efetuada, deixou-se um excesso de espaço por utilizar, na eventualidade de se querer adicionar componentes suplementares.

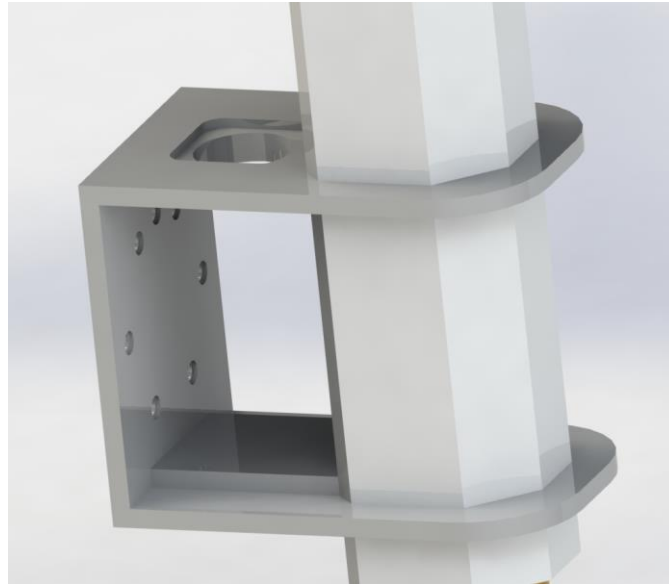


Figura 89 - Zona de aperto dos parafusos M8 e do pino de centragem

Pela análise da Figura 90, é possível observar o interface robô-cabeça. Pela imagem da esquerda, verifica-se a zona do suporte maquinada para acoplar a flange do robô. Por outro lado, a imagem da direita mostra os furos que marcam a entrada dos parafusos e anilhas.

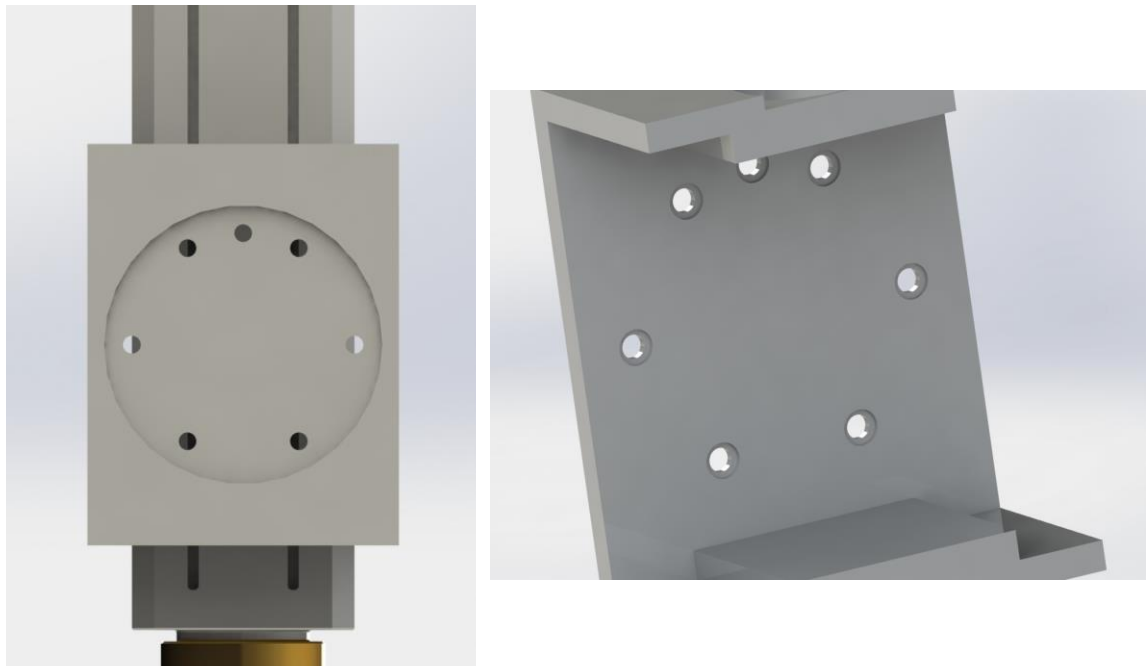


Figura 90 - Interface robô-cabeça

Para melhor compreender o encaixe da cabeça no robô, será exposto um conjunto de imagens, apresentado na secção “Conjunto final”.

5.4.3. Adaptação da Fonte de Energia

Segundo o estudo referente ao estado da arte e aos parâmetros de funcionamento da fonte de energia, é possível concluir que a utilização de lasers de fibra constitui uma grande vantagem, não só pela flexibilidade que conferem ao processo de Laser Cladding, como também pela redução na potência necessária para a aplicação.

Por outro lado, é também necessário reconhecer que a gama de potências que a fonte Rofin FL 030 consegue produzir (entre 300W até 3000W) se encontra dentro da gama dos valores recolhidos apresentados no **Anexo A**.

Em todo o caso, como já foi mencionado no capítulo 3, em casos extremos é possível contornar valores de potência menos adequados, com as alterações da velocidade de varrimento ou do diâmetro do feixe, produzindo assim valores de densidade energética do laser mais apropriados.

No que diz respeito ao colimador utilizado, após se verificar que o encaixe na cabeça de processamento é standardizado, não deverá existir qualquer problema na adaptação.

Apesar de não ser um fator decisivo para perceber se a escolha do colimador se pode manter, as distâncias focais produzidas pelas lentes nele inseridas irão interferir com o diâmetro do feixe laser. No entanto, será difícil chegar a uma conclusão uma vez que seria necessário conhecer a altura da cabeça de Laser Cladding adotada. Em qualquer dos casos, é possível gerar diâmetros de feixe aceitáveis, através da adaptação da distância à superfície de trabalho.

Relativamente à fibra ótica mais recomendada, pode-se afirmar que ambos os diâmetros disponíveis podem ser aplicados no processo de Laser Cladding. O diâmetro da fibra, a par das distâncias focais do colimador e das lentes presentes no interior da cabeça, irá apenas influenciar o diâmetro do feixe laser e, conseqüentemente, a largura do revestimento produzido. No entanto, será sempre boa opção dispor dos dois diâmetros, para poder originar camadas depositadas de larguras diferentes, aumentando assim a flexibilidade do processo.

Desta forma, e pela falta de mais informação relativa à cabeça a adquirir, é possível afirmar que os três componentes relativos à fonte de energia e ao feixe laser (fonte, colimador e fibra), podem ser mantidos de um sistema para o outro.

5.4.4. Alimentação do Pó

No que diz respeito à alimentação do pó, é necessário ter em conta um aspeto bastante influente no processo de Laser Cladding: a gravidade. Desta forma, a escolha do alimentador e o seu posicionamento na área de trabalho terão de ser bem calculados. Pela informação recolhida, é possível afirmar que todas as soluções construtivas de alimentadores, expostas no capítulo 3, conseguem proporcionar um fluxo de pó estável.

No entanto, a alimentação das partículas de pó por transporte por gás, apesar de ser, à partida, uma solução mais encarecedora, consegue fornecer um fluxo estável com um alcance grande de velocidades de alimentação. A grande vantagem desta solução reside na enorme flexibilidade de escolha do posicionamento do alimentador. Como a influência da gravidade nestes sistemas é mínima, a colocação do alimentador passa para segundo plano, libertando assim espaço para possíveis equipamentos adicionais. Através da Figura 91, é possível observar a colocação do alimentador junto à base do robô, sem necessidade de elevá-lo para evitar problemas de gravidade.

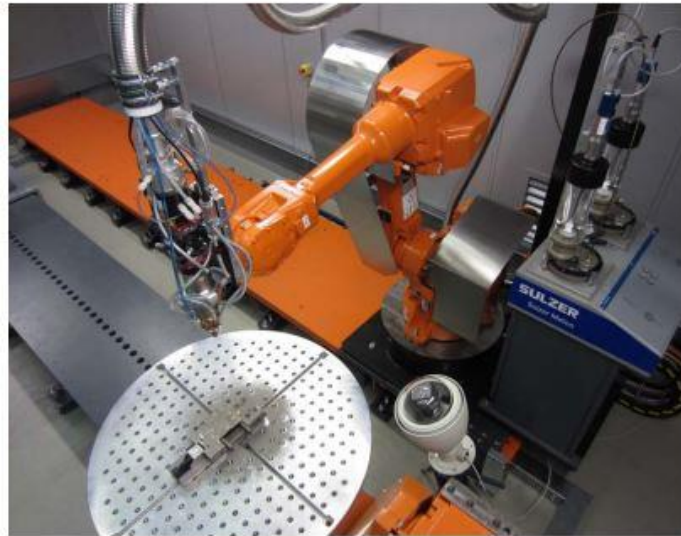


Figura 91 - Colocação do alimentador de pó junto à base do robô; retirado de [5]

Entre outros fabricantes de sistemas de alimentação de pó, destacam-se a Sulzer-Metco [5] e a GTV [11], pela fácil adaptação a diferentes sistemas robotizados. Para ambos os fabricantes, existem gamas de alimentadores de bastante interesse. Destacam-se os alimentadores de dupla câmara de alimentação, pela possibilidade que oferecem de deposição de múltiplos materiais. Na Figura 92, apresentam-se dois alimentadores de dupla câmara de alimentação. À esquerda, um produto da Sulzer-Metco e à direita um da GTV.



Figura 92 - Alimentadores de pó Twin 10-C da Sulzer-Metco (à esq.) e GTV PF 2/2 (à dir.); retirado de [11, 27]

5.4.5. Geometria dos Movimentos

Apesar de o robô presente no sistema possuir seis eixos de trabalho (**Anexo G**), o facto de a mesa de operações possuir apenas um eixo de rotação horizontal pode limitar a aplicação do processo de Laser Cladding. No entanto, existem algumas soluções que podem contornar este problema.

Em primeiro lugar, a solução mais óbvia será a de acrescentar mais um eixo de trabalho, através da introdução de um novo módulo periférico. Esse módulo permitirá assim a rotação da peça em torno de um novo eixo vertical. Através da Figura 93, é possível observar dois exemplos de módulos a adotar. Dos fabricantes ABB, o modelo IRBP A-250/500/750 [56] e da Panasonic o modelo RJR 41 .



Figura 93 - Módulos periféricos de dois eixos de trabalho

5.5.6. Adaptações Adicionais

De modo a aumentar a eficiência do processo de Laser Cladding, existe um conjunto de medidas que pode ser implementado. Através da seguinte secção, é possível apresentar duas das mais importantes.

Sistema de Reciclagem de Pó

A introdução de um sistema de reciclagem de pó, aumentaria consideravelmente a eficiência do processo de Laser Cladding. Com esta adaptação, seria possível recuperar o pó que não fosse depositado durante o processo, derivado do ricochete causado na sua projecção.

Pela introdução de um reservatório por baixo da mesa de operações e conectando-o, se possível, a um sistema de aspiração, seria então possível acumular as partículas de pó não utilizadas num simples compartimento.

Através da Figura 94, é possível observar uma ilustração de um sistema de reciclagem de pó, com a coleta das partículas a partir de diversos compartimentos.

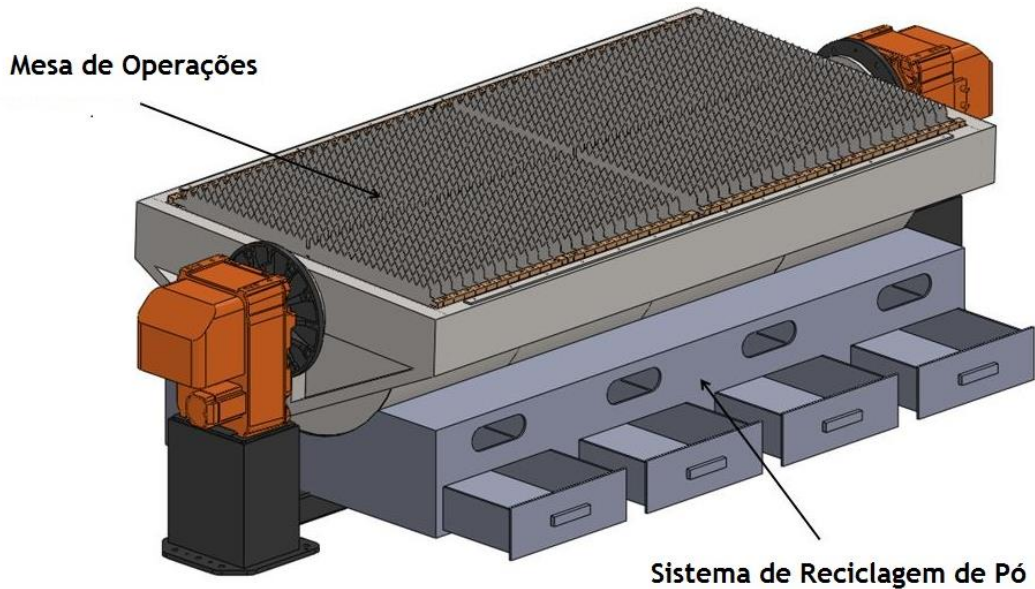


Figura 94 - Ilustração de um sistema de reciclagem de pó; adaptado de uma imagem fornecida pelo INEGI

Dispositivos de Controlo de Dimensões e de Temperaturas

Como foi anteriormente mencionado no capítulo 4, a utilização de dispositivos de controlo das dimensões e temperaturas na fase de deposição, pode melhorar significativamente a eficiência do processo. Apesar do custo acrescido na obtenção deste tipo de equipamento, poderá existir facilmente uma compensação significativa pela redução dos tratamentos térmicos e mecânicos posteriores.

5.5.7. Conjunto Final e Sumário de Adaptações

Na seguinte secção, apresenta-se um sumário das diversas adaptações sugeridas e um conjunto de diferentes vistas do sistema robotizado com a introdução da cabeça de Laser Cladding. Através da Tabela 13, é possível observar o conjunto de medidas a serem implementadas para a introdução do processo. Por outro lado a Tabela 14, apresenta as adaptações adicionais para melhorar a eficiência do processo.

Tabela 15 - Conjunto de possíveis adaptações para a implementação do processo de Laser Cladding

Limitação Existente		Adaptação a Realizar
Interface robô-cabeça (acoplamento)		Criação de um interface personalizado
Fonte de energia	Tipo de fonte a utilizar	Manter a mesma fonte
	Tipo de colimador a utilizar	Manter o mesmo colimador
	Diâmetros de fibra a utilizar	Manter os mesmos diâmetros de fibra
Alimentação do pó	Tipo de alimentador a utilizar	Utilização de um alimentador de transporte por gás
	Posição do alimentador	Qualquer posição (independente da gravidade)
Geometria de movimentos dada pela mesa de operações de um só eixo		Aquisição de um módulo periférico de dois eixos

Tabela 16 - Conjunto de adaptações opcionais para melhorar a eficiência do processo

Adaptações Opcionais
Sistema de Reciclagem de Pó
Dispositivos de Controlo de Dimensões e Temperaturas

Apresentam-se agora algumas imagens da modelação tridimensional do sistema robotizado (fornecido pelo INEGI) com a introdução da cabeça de Laser Cladding (Figuras 95-98). É de salientar que não estão representados alguns dos componentes, mas ainda assim, é possível ter uma ideia do funcionamento do processo.

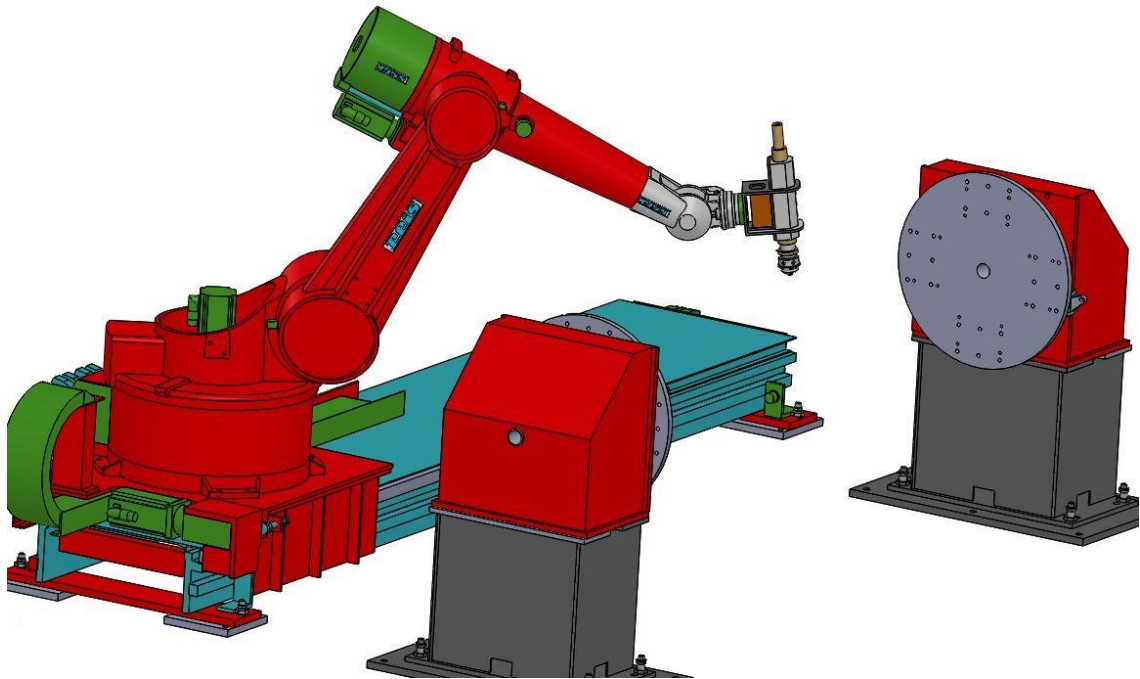


Figura 95 - Vista geral do sistema robotizado

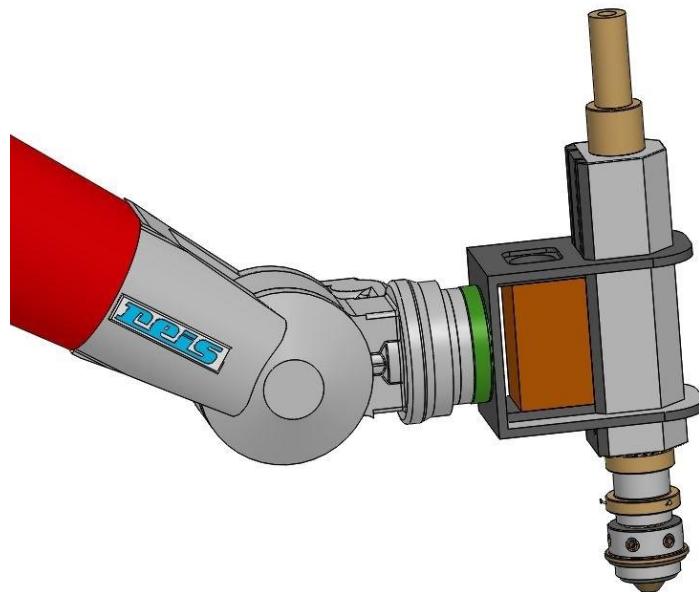


Figura 96 - Vista do acoplamento da cabeça no robô

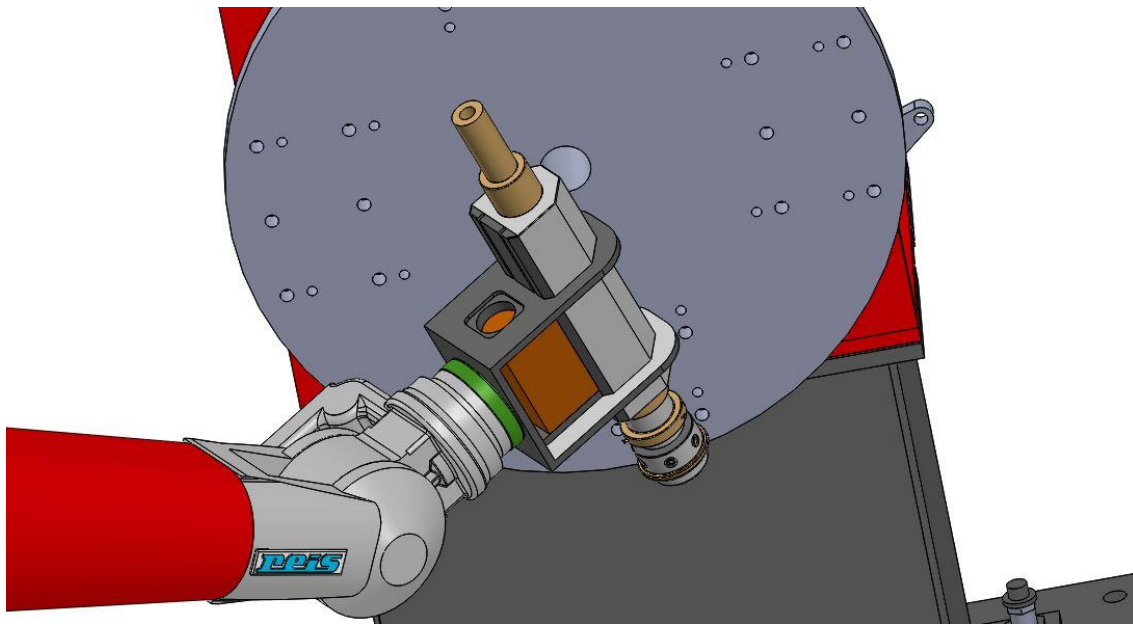


Figura 97 - Vista alternativa do acoplamento da cabeça no robô

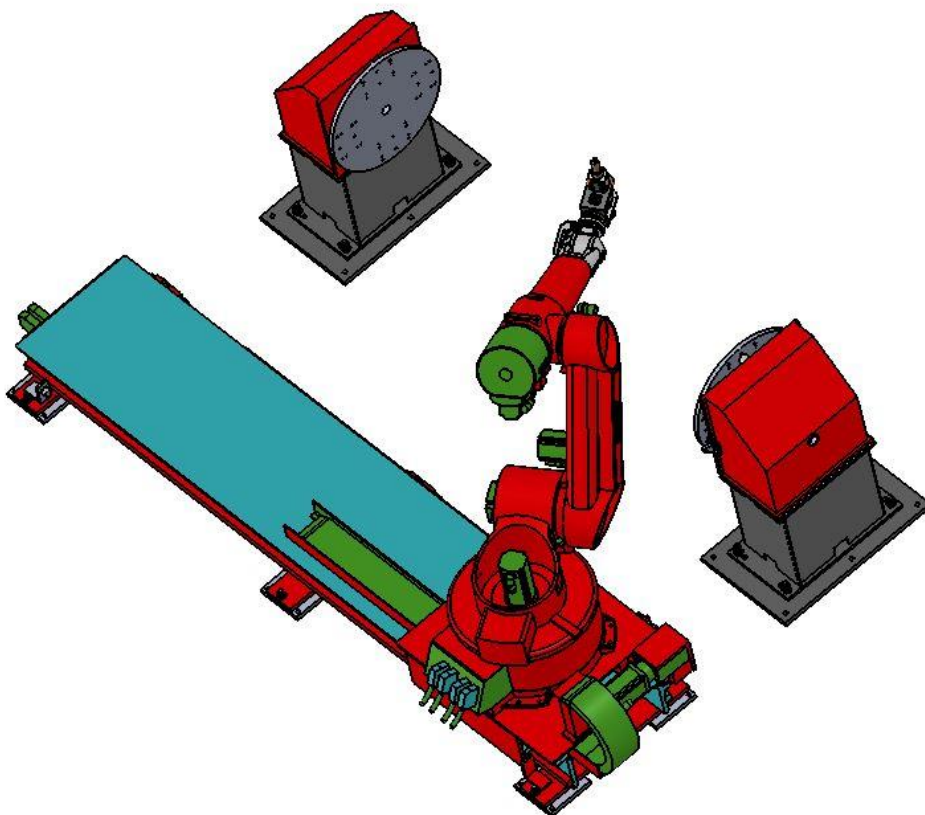


Figura 98 – Vista de topo do sistema robotizado

6. Considerações Finais

6.1. Conclusões

No que diz respeito ao trabalho realizado, existem algumas considerações que podem ser retidas como conclusão da dissertação.

Em primeiro lugar, referente ao capítulo 3, é possível verificar uma enorme variedade de escolha entre equipamentos a utilizar. No entanto, algumas soluções destacam-se pela maior eficiência que conferem ao processo de Laser Cladding. Entre elas salientam-se os lasers de fibra e de díodo de elevadas potências, os alimentadores de pó de transporte por gás e os *nozzles* coaxiais.

Por outro lado, é também importante destacar a competitividade dos processos de Laser Cladding com outros processos de fabrico, tanto aditivos como tradicionais. No que diz respeito a aplicações, fica então provada a grande potencialidade do processo, pelo enorme número de setores abrangidos. No campo das vantagens e aplicações, destaque para a recuperação de componentes de elevado valor acrescentado e para a possibilidade de adição de mais do que um material durante a fase de deposição.

É necessário também evidenciar os bons índices de qualidade fornecidos por esta gama de processos. Pela aplicação dos processos de Laser Cladding, é possível obterem-se componentes com boas propriedades mecânicas, provenientes do controlo cuidadoso das microestruturas desenvolvidas. Com o domínio das temperaturas do processo, torna-se possível obter-se baixos níveis de diluição, distorção e de tensões residuais.

Numa vertente oposta, os processos de Laser Cladding apresentam ainda desvantagem, relativamente ao investimento inicial e à eficiência das fontes laser. No entanto, estima-se que, com o desenvolvimento e investigação na área dos processos de fabrico por laser, as restrições apresentadas pelo processo possam ser eliminadas. A introdução de fontes como lasers de fibra e a contratação de mão-de-obra qualificada pode constituir um ponto de partida para o avanço desta categoria de processos.

Relativamente ao capítulo 4, é possível, em primeiro lugar, constatar a enorme quantidade de parâmetros de processamento influentes no resultado final do processo. Fica então provado, pela análise da dissertação apresentada, que, se não existir o controlo correto dos diversos parâmetros, os resultados obtidos podem não ser favoráveis.

É também possível afirmar que não existem valores definidos para nenhum parâmetro de processamento. Contudo, existem sim intervalos mais apropriados para o tratamento dos diferentes materiais.

Por outro lado, é possível contornar resultados deficientes não apenas a partir de um só parâmetro, mas também a partir da combinação entre vários, como é o caso da densidade energética do laser e da concentração do pó depositado.

No que diz respeito a capítulo 5, ficou apresentado um conjunto de medidas para a implementação do processo de Laser Cladding no sistema de corte e soldadura já existente. Em falta de maior informação por parte de fabricantes, pôde-se concluir que as medidas apresentadas para a introdução de uma nova cabeça de Laser Cladding seriam suficientes.

Mantendo a mesma fonte, o mesmo colimador e os mesmos diâmetros de fibra, concluiu-se que seria possível dar continuidade ao projeto sem custos acrescidos para estes componentes. Com a adição de um alimentador de pó de transporte por gás e com um interface mecânico personalizado para o acoplamento da cabeça no robô torna-se então possível implementar o novo processo.

Por último, foram também sugeridas duas medidas para ampliar a eficiência do processo de Laser Cladding: um sistema de reciclagem de pó e um conjunto de dispositivos para controlo de dimensões e temperaturas do processo.

6.2. Trabalhos Futuros

Como trabalhos complementares aconselha-se, principalmente um estudo mais aprofundado da variação da microestrutura com os diferentes parâmetros de processamento. Apesar de ter sido mencionado em algumas ocasiões durante o trabalho, é de extrema importância perceber a evolução dos constituintes, durante o processo de Laser Cladding.

Para poder aproveitar o maior conhecimento possível de um trabalho como o apresentado, é também fundamental o contacto direto com fabricantes de sistemas de Laser Cladding, de modo a existir maior envolvimento num projeto de implementação de um sistema como este.

Por último, e no que toca à industrialização do processo de Laser Cladding, estima-se que, num futuro não muito distante, os respetivos sistemas surjam em maior número no mercado. O ponto de viragem para o aumento da utilização destes sistemas poderá passar por uma maior divulgação de soluções híbridas, misturando assim as vantagens de ambos os tipos de fabrico: o aditivo e o convencional.

REFERÊNCIAS

1. USA, F. *Laser Cladding*. 2010 [cited 2014 25/04]; Available from: http://www.ccl-laser.fraunhofer.org/en/laser_cladding.html.
2. Rofin. *ROFIN FL Series*. 2014 [cited 2014 3/04/2014]; Available from: http://www.rofin.com/en/products/fiber_lasers/fl_series/.
3. Optoskand, *Prealigned External Optics D50*, Optoskand, Editor. 2014.
4. Optoskand, *QB Fiber Optic Cables*, Optoskand, Editor. 2010.
5. Metco, S., *MetcoClad™ Laser Cladding Systems*, S. Metco, Editor. 2013.
6. HaydenCorp. *Laser Cladding Services*. 2014; Available from: http://www.haydencorp.com/content.php?p=laser_metal_deposition.
7. Wohlers, T.T., *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*. 2013.
8. GmbH, L., *Laserfact F2-Y - The combi-head for solid-state lasers*, L. GmbH, Editor. 2007.
9. GmbH, R.L., *VarioClad - Laser Metal Deposition with Variable Spot Sizes*, R.L. GmbH, Editor. 2011.
10. Motorship, T. *Laser technology provides 'green' alternative to scrapping components*. 2014 [cited 2014 07/05]; Available from: <http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/laser-technology-provides-green-alternative-to-scrapping-components>.
11. Inc, S.T. *Powder Feeders for Thermal Spray and Laser Cladding*. 2014 [cited 2014 24/05/2014]; Available from: <http://www.spraywerx.com/equipment/powder-feeders-copy/>.
12. Nowotny, S., et al., *Integrated laser cell for combined laser cladding and milling*. Assembly Automation, 2010. **30**(1): p. 36-38.
13. Toyserkani, E., A. Khajepour, and S. Corbin, *Laser cladding*. 2005, Boca Raton, FL. :: CRC Press. xiii, 260 p. :-xiii, 260 p. :.
14. Mazumder, J., et al., *Closed loop direct metal deposition: art to part*. Optics and Lasers in Engineering, 2000. **34**(4-6): p. 397-414.
15. Lin, J., *A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding*. Optics & Laser Technology, 1999. **31**(3): p. 233-238.
16. Lin, J. and B.-C. Hwang, *Coaxial laser cladding on an inclined substrate*. Optics & Laser Technology, 1999. **31**(8): p. 571-578.
17. Palčić, I., et al., *Potential of Laser Engineered Net Shaping (LENS) Technology*. Materials and Manufacturing Processes, 2009. **24**(7-8): p. 750-753.
18. Pinkerton, A.J., W. Wang, and L. Li, *Component repair using laser direct metal deposition*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008. **222**(7): p. 827-836.
19. Arcella, F. and F.H. Froes, *Producing titanium aerospace components from powder using laser forming*. JOM, 2000. **52**(5): p. 28-30.

20. Rosochowski, A. and A. Matuszak, *Rapid tooling: the state of the art*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **106**(1-3): p. 191-198.
21. Liu, C.-Y. and J. Lin, *Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding*. Optics & Laser Technology, 2003. **35**(2): p. 81-86.
22. Liu, J. and L. Li, *Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding*. Optics & Laser Technology, 2005. **37**(4): p. 287-292.
23. Kobryn, P.A., E.H. Moore, and S.L. Semiatin, *The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V*. Scripta Materialia, 2000. **43**(4): p. 299-305.
24. Syed, W.U.H., A.J. Pinkerton, and L. Li, *Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping*. Applied Surface Science, 2006. **252**(13): p. 4803-4808.
25. Tabernero, I., et al., *Optimal Parameters for 5-axis Laser Cladding*. Procedia Engineering, 2013. **63**(0): p. 45-52.
26. Luo, F., et al., *Effect of Laser Power on the Cladding Temperature Field and the Heat Affected Zone*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011. **18**(1): p. 73-78.
27. Thomasnet.com. *TWIN 10-C Powder Feeders*. 2012 [cited 2014 10/06]; Available from: <http://www.thomasnet.com/productsearch/item/10025680-13318-1015-1027/oerlikon-metco/twin-10c-powder-feeders/>.
28. Pinkerton, A.J. and L. Li, *The significance of deposition point standoff variations in multiple-layer coaxial laser cladding (coaxial cladding standoff effects)*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(6): p. 573-584.
29. Peng, L., et al., *Direct laser fabrication of nickel alloy samples*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005. **45**(11): p. 1288-1294.
30. Li, Y., et al., *The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming*. Materials Science and Engineering: A, 2003. **360**(1-2): p. 18-25.
31. Lu, Z.L., et al., *The prediction of the building precision in the Laser Engineered Net Shaping process using advanced networks*. Optics and Lasers in Engineering, 2010. **48**(5): p. 519-525.
32. Fallah, V., et al., *Impact of localized surface preheating on the microstructure and crack formation in laser direct deposition of Stellite 1 on AISI 4340 steel*. Applied Surface Science, 2010. **257**(5): p. 1716-1723.
33. Gharbi, M., et al., *Influence of a pulsed laser regime on surface finish induced by the direct metal deposition process on a Ti64 alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. **214**(2): p. 485-495.
34. Nowotny, S., et al., *Laser Beam Build-Up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition*. Journal of Thermal Spray Technology, 2007. **16**(3): p. 344-348.
35. Lugscheider, E., H. Bolender, and H. Krappitz, *Laser cladding of paste bound hardfacing alloys*. Surface Engineering, 1991. **7**(4): p. 341-344.
36. Kim, J.-D. and Y. Peng, *Plunging method for Nd: YAG laser cladding with wire feeding*. Optics and lasers in engineering, 2000. **33**(4): p. 299-309.
37. Lin, J., *Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding*. Optics & Laser Technology, 1999. **31**(3): p. 251-257.
38. Lewis, G.K. and E. Schlienger, *Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition*. Materials & Design, 2000. **21**(4): p. 417-423.
39. Vayre, B., F. Vignat, and F. Villeneuve, *Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects*. Mechanics & Industry, 2012. **13**(02): p. 89-96.
40. Metco, O. *Laser Cladding Process*. 2013 [cited 2014 10/06]; Available from: <http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/laser-cladding/laser-cladding-processes/>.
41. Tabernero, I., et al., *Modeling of the geometry built-up by coaxial laser material deposition process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. **70**(5-8): p. 843-851.

42. Hofmeister, W. and M. Griffith, *Solidification in direct metal deposition by LENS processing*. JOM, 2001. **53**(9): p. 30-34.
43. Sun, Y. and M. Hao, *Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser*. Optics and Lasers in Engineering, 2012. **50**(7): p. 985-995.
44. Navas, C., et al., *Laser coatings to improve wear resistance of mould steel*. Surface and Coatings Technology, 2005. **194**(1): p. 136-142.
45. Sexton, L., et al., *Laser cladding of aerospace materials*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **122**(1): p. 63-68.
46. Kathuria, Y., *Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry*. Surface and Coatings Technology, 2000. **132**(2): p. 262-269.
47. CES EduPack. 2013.
48. Thoma, D.J., et al., *Rapid fabrication of materials using directed light fabrication*. 1997. Medium: ED; Size: 9 p.
49. Wu, X., et al., *Direct laser fabrication and microstructure of a burn-resistant Ti alloy*. Materials & Design, 2002. **23**(3): p. 239-247.
50. Mudge, R.P. and N.R. Wald, *Laser engineered net shaping advances additive manufacturing and repair*. WELDING JOURNAL-NEW YORK-, 2007. **86**(1): p. 44.
51. Liu, J. and L. Li, *Effects of process variables on laser direct formation of thin wall*. Optics & Laser Technology, 2007. **39**(2): p. 231-236.
52. Pan, H., et al., *The Investigation of Gravity-Driven Metal Powder Flow in Coaxial Nozzle for Laser-Aided Direct Metal Deposition Process*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005. **128**(2): p. 541-553.
53. Milewski, J.O., et al., *Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition*. Journal of Materials Processing Technology, 1998. **75**(1-3): p. 165-172.
54. Keicher, D.M. and J. Smugeresky, *The laser forming of metallic components using particulate materials*. JOM, 1997. **49**(5): p. 51-54.
55. Gharbi, M., et al., *Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 2013. **213**(5): p. 791-800.
56. Group, A., *ABB Arc Welding Products New Generation Positioners*, A. Group, Editor. 2010.
57. Bi, G., et al., *Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition*. Surface and Coatings Technology, 2006. **201**(6): p. 2676-2683.
58. Costa, L. and R. Vilar, *Laser powder deposition*. Rapid prototyping journal, 2009. **15**(4): p. 264-279.
59. Gebhardt, A., *Rapid prototyping*. 2003: Munich Hanser.
60. Grimm, T., *Direct Metal on the Rise*. Manufacturing Engineering, 2004. **133**(4).
61. Gu, D.D., et al., *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms*. International Materials Reviews, 2012. **57**(3): p. 133-164.
62. Kreutz, E.W., et al., *Rapid prototyping with CO2 laser radiation*. Applied Surface Science, 1995. **86**(1-4): p. 310-316.
63. Kumar, S. and J.P. Kruth, *Composites by rapid prototyping technology*. Materials & Design, 2010. **31**(2): p. 850-856.
64. Laeng, J., J.G. Stewart, and F.W. Liou, *Laser metal forming processes for rapid prototyping - A review*. International Journal of Production Research, 2000. **38**(16): p. 3973-3996.
65. Levy, G.N., R. Schindel, and J.P. Kruth, *RAPID MANUFACTURING AND RAPID TOOLING WITH LAYER MANUFACTURING (LM) TECHNOLOGIES, STATE OF THE ART AND FUTURE PERSPECTIVES*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2003. **52**(2): p. 589-609.
66. Lewis, G.K. and D.A. Cremers, *Overview of laser technology at Los Alamos National Laboratory*. 1994. Medium: ED; Size: 12 p.
67. Lewis, G.K., et al., *Directed light fabrication*. 1994. Medium: ED; Size: 11 p.
68. Milewski, J.O., et al., *Development of a Near Net Shape Processing Method for Rhenium Using Directed Light Fabrication*. Materials and Manufacturing Processes, 1998. **13**(5): p. 719-730.

69. Miranda, R.M., et al., *Rapid prototyping with high power fiber lasers*. Materials & Design, 2008. **29**(10): p. 2072-2075.
70. Nowotny, S., S. Scharek, and A. Schmidt, *Advanced laser technology applied to cladding and buildup*. WELDING JOURNAL-NEW YORK-, 2007. **86**(5): p. 48.
71. Peng, L., et al., *Direct laser fabrication of thin-walled metal parts under open-loop control*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(6): p. 996-1002.
72. Pham, D.T. and R.S. Gault, *A comparison of rapid prototyping technologies*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998. **38**(10-11): p. 1257-1287.
73. Santos, E.C., et al., *Rapid manufacturing of metal components by laser forming*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. **46**(12-13): p. 1459-1468.
74. Sears, J.W., *Direct laser powder deposition - 'State of the Art'*. 1999. Medium: P; Size: 16 pages.
75. Smurov, I., *Laser cladding and laser assisted direct manufacturing*. Surface and Coatings Technology, 2008. **202**(18): p. 4496-4502.
76. Zhu, G., et al., *The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition*. Optics & Laser Technology, 2012. **44**(2): p. 349-356.
77. GmbH, R., *Reis Peripheral modules*, R. GmbH, Editor. 2010.
78. MORI, D., *Additive Manufacturing in Milling Quality*, D. MORI, Editor. 2013.
79. IWS, F., *Laser Cladding and Additive Manufacturing*, F. IWS, Editor. 2013.
80. ILT, F.I.f.L.T., *Coaxial Powder Nozzles For Higher Laser Output Powers*, F.I.f.L.T. ILT, Editor. 2013.
81. GmbH, R., *RV60-16, RV60-26, RV60-40, RV60-60 Technical Data*, R. GmbH, Editor. 2012.

ANEXOS

Anexo A - Valores Recolhidos de Potências do Laser Aplicadas

Tipo de Laser	Potência Aplicada [W]	Material Processado	Referência
Fibra	200 - 600	Aço Inoxidável	[25]
CO₂	400 - 1100	Aço Inoxidável	[16]
Díodo	600	Aço Inoxidável ; Aço Rápido	[44]
CO₂	700 - 1200	Aço de Ferramentas	[14]
Nd:YAG	400	Aço Inoxidável	[53]
CO₂	1000	Liga de Níquel	[45]
Nd:YAG	400 - 600	Liga de Titânio	[43]
CO₂	1200 - 2200	Aço de Ferramentas	[26]
Díodo	900 - 1100	Liga de Níquel ; Aço de Ferramentas	[41]
CO₂	800 - 1100	Aço Inoxidável	[28]
CO₂	500 - 3000	- *	[21]
Nd:YAG	150 - 300	Aço Inoxidável	[31]
CO₂	250 - 700	Liga de Titânio	[49]
Nd:YAG	160	Liga de Níquel ; Aço Inoxidável ; Liga de Titânio	[38]
CO₂	700 - 1300	Liga de Níquel	[29]
Nd:YAG	175 - 350	Liga de Titânio	[23]

Yb:YAG	320 - 500	Liga de Titânio	[33]
CO₂	220 - 300	Aço Inoxidável	[51]
CO₂	1000 - 4000	Aço Inoxidável ; Liga de Níquel	[30]
CO₂	190 - 350	Aço Inoxidável	[15]
Díodo	900 - 1500	Aço de Ferramentas	[18]

* Dado não mencionado

Anexo B - Valores Recolhidos de Diâmetros do Feixe Laser

Tipo de Laser	Diâmetro do Feixe [mm]	Material Processado	Referência
Díodo	1,6	Aço Inoxidável ; Aço Rápido	[44]
Nd:YAG	1	Aço Inoxidável	[53]
CO₂	4	Aço de Ferramentas	[26]
CO₂	0,2 - 0,6	Aço Inoxidável	[51]
CO₂	2 - 4	Aço Inoxidável ; Liga de Níquel	[30]

Anexo C - Valores Recolhidos de Velocidades de Alimentação do Pó

Velocidade de Alimentação do Pó [g/min]	Material Processado	Referência
6,9 – 9,4	Aço Inoxidável	[25]
4,2	Aço Inoxidável	[16]
3 – 4	Aço Inoxidável ; Aço Rápido	[44]
4 – 8	Aço de Ferramentas	[14]
2	Aço Inoxidável	[53]
3,8 – 4,2	Liga de Níquel	[45]
4,1 – 6,3	Liga de Níquel ; Aço de Ferramentas	[41]
8,2 – 16,3	Aço Inoxidável	[28]
10	- *	[48]
2,2 – 13,1	Aço Inoxidável	[31]
8 - 10	Liga de Titânio	[49]
9	Liga de Níquel ; Aço Inoxidável ; Liga de Titânio	[38]
3 – 5,8	Liga de Níquel	[29]
2,75	Liga de Titânio	[23]
5,2 – 17,5	Aço Inoxidável ; Liga de Níquel	[30]
14,2 – 42,6	Aço de Ferramentas	[18]
18 - 30	Aço Inoxidável ; Liga de Cobalto-Crômio	[75]

* Dado não mencionado

Anexo D - Valores Recolhidos de Velocidades de Varrimento








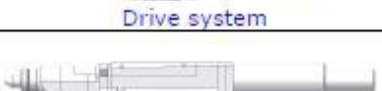

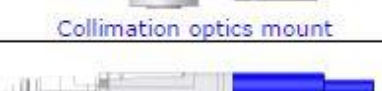
Velocidade de Varrimento [mm/min]	Material Processado	Referência
200 – 400	Aço Inoxidável	[25]
100	Aço Inoxidável	[16]
400	Aço Inoxidável ; Aço Rápido	[44]
510 – 1525	Aço de Ferramentas	[14]
1260	Aço Inoxidável	[53]
500 - 700	Liga de Titânio	[43]
900	Liga de Níquel ; Aço de Ferramentas	[41]
290 - 480	Aço Inoxidável	[28]
60 - 3000	- *	[48]
120 - 600	Aço Inoxidável	[31]
150 - 450	Liga de Titânio	[49]
760	Liga de Níquel ; Aço Inoxidável ; Liga de Titânio	[38]
240 – 720	Liga de Níquel	[29]
410 – 610	Liga de Titânio	[23]
400	Liga de Titânio	[33]
300 – 1200	Aço Inoxidável ; Liga de Níquel	[30]
180 – 600	Aço Inoxidável	[15]
60 – 360	Aço de Ferramentas	[18]
300 – 900	Aço Inoxidável ; Liga de Cobalto-Crómio	[75]

* Dado não mencionado

Anexo E - Valores Recolhidos de Caudais de Gás Inerte

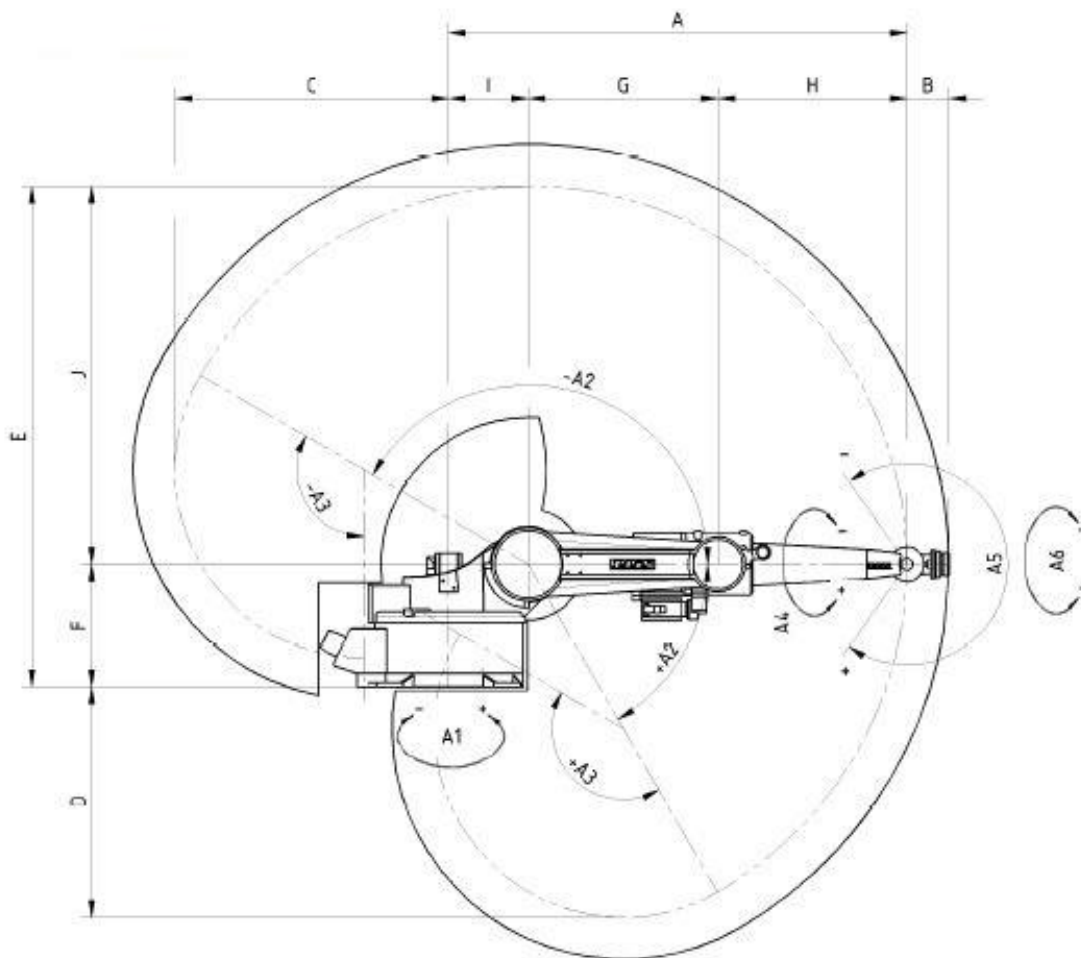
Gás Inerte Utilizado	Caudal de Gás Inerte [l/min]	Material Processado	Referência
Árgon	5,5	Aço Inoxidável	[25]
Árgon	30	Aço Inoxidável ; Aço Rápido	[44]
Árgon	4,7 – 9,4	Aço de Ferramentas	[14]
Árgon	9,4	Aço Inoxidável	[53]
Árgon	2,5	Liga de Níquel	[45]
Azoto	8	Aço Inoxidável	[31]
Azoto	8,33	Aço Inoxidável	[22]
Árgon	8	Liga de Níquel	[29]
Árgon	0 - 25	Aço Inoxidável ; Liga de Níquel	[30]
Árgon	6	Aço Inoxidável	[15]
Árgon	40,2	Aço de Ferramentas	[18]

Anexo F – Especificações da Cabeça Laserfact F2-Y

 <p>(Figure shows full version)</p>	
 <p>Nozzle module</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Autonomous nozzle (patent Fraunhofer ILT) • Cutting pressures up to 30 bar possible • Capacitive height sensor • Nozzle easy to change
 <p>Crossjet</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Integrated crossjet • Effective protection of optics • Multijet technique
 <p>Cover slide drawer</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Water cooled cover slide drawer • Cover slide easy to change • Drawer is interlocked • Optical monitoring of the degree of contamination (option)
 <p>Quicksnap optics module</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Focal lengths from 200 to 300 mm • Quick change feature of optics module • Adjusting range of focal position 25mm • High laser powers possible (standard up to 5 kW)
 <p>Height axis</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fast response z-axis • ± 15mm drive path • Internal connection lines for gases, water and controls • Integrated xy-adjustments for beam alignment • Guides and drive with ball-bearings
 <p>Drive system</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Synchronous motor with holding brake • Digital drive control device • 0,5 g acceleration
 <p>Adapter flange</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Available with all typical mounting flanges • Option: customized adapter flanges
 <p>Collimation optics mount</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Available with all typical mounting flanges • Option: customized adapter flanges
 <p>Collimation optics</p>	<p>3 options:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integration of typical standard collimation optics • Provision by the customer • application-specific design adapted to type of laser and fiber

Referência [8]

Anexo G – Área e Eixos de Trabalho do Robô Reis RV60-40

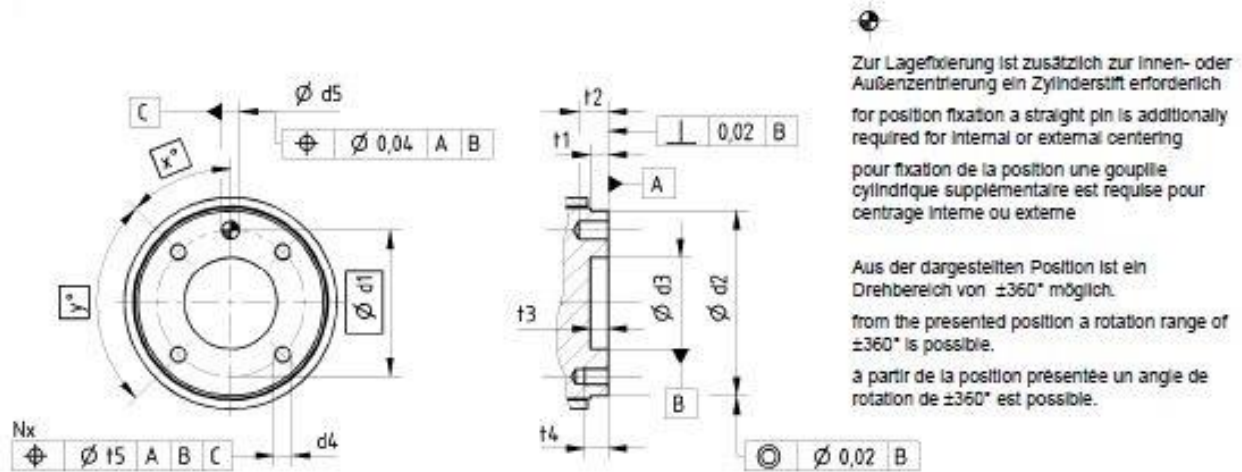


- A1 = 0°
- A2 = 0°
- A3 = 0°
- A4 = -90°
- A5 = 0°
- A6 = 0°

Verfahrbereich Achse 1 bis 6 range axis 1 to 6 / zone axe 1 jusqu' à 6	A1		A2		A3		A4		A5		A6	
RV60-16	±180		+60 / -150		+150 / -120		±210		±123		±360	
RV60-26	±180		+60 / -150		+150 / -120		±210		±125		±360	
RV60-40	±180		+60 / -150		+150 / -120		±210		±125		±360	
RV60-60	±180		+60 / -150		+150 / -120		±210		±125		±360	
Arbeitsraum work envelope / zone de travail	[mm]											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
RV60-16	2450	100	1441	1206	2685	670	1035	980	435	2015		
RV60-26	2800	200	1791	1556	3035	670	1035	1330	435	2365		
RV60-40	2500	230	1491	1256	2735	670	1035	1030	435	2065		
RV60-60	2250	230	1241	1006	2485	670	1035	780	435	1815		

Referência [81]

Anexo H – Tolerâncias da Flange do Robô Reis RV60-40



Typ Type	nach / acc. to / selon DIN9409-1-d1-N-d4	d ₁ [mm]	d ₂ h ₈ [mm]	d ₃ H/ [mm]	d ₄ [mm]	N	d ₅ H/ [mm]	x [°]	y [°]	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	M [*] [Nm]
RV60-16	DIN9409-1-63-4-M6	63	80	40	M6	4	6	45	90	6	6	6	8	0,2	10
RV60-26	DIN9409-1-80-6-M8	80	100	50	M8	6	8	30	60	6	8	6	10	0,4	25
RV60-40	DIN9409-1-100-6-M8	100	125	63	M8	6	8	30	60	6	8	6	12	0,4	25
RV60-60	DIN9409-1-100-6-M8	100	125	63	M8	6	8	30	60	6	8	6	12	0,4	25

* Schraubengüte min. 8,8
* screws of quality min. 8,8
* qualité de vis min. 8,8

Referência [81]

