



**Jorge Miguel Sá Pinto Torres**  
Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Melhoramento e Automatização de um Sistema de Revestimento com Laser**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas,  
Professora Auxiliar, FCT-UNL  
Co-orientadora: Professora Doutora Teresa Leonor Martins  
Morgado, Professora Adjunta, ESTA-IPT



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2015**



## **Copyright**

Copyright em nome de Jorge Miguel Sá Pinto Torres, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

À Professora Doutora Helena Navas, agradeço a excelente oportunidade de realizar este trabalho, pelos desafios, pelo apoio, pela sua orientação, empenho e motivação para a realização deste trabalho.

À Professora Doutora Teresa Morgado pela apresentação ao centro de investigação, pela sua orientação, paciência, apoio e motivação dadas desde o início.

Ao Professor Doutor Rui Vilar pela disponibilidade constante, pelos ensinamentos e sugestões que contribuíram para a realização deste trabalho, por disponibilizar o laboratório para o desenvolvimento deste trabalho.

À Professora Doutora Amélia Almeida pela sua disponibilidade e disponibilização de meios e pertinentes sugestões que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Engenheira Isabel Nogueira pela disponibilidade e apoio no laboratório.

A todos os colegas do centro de investigação, em especial ao Tiago Ribeiro, ao David Duarte, à Liliana Canguero, à Catarina Duarte e ao Fausto Catto pela amizade companheirismo e sugestões dadas.

À Ana por ter partilhado comigo os bons momentos e por todo o apoio nos menos bons. Pelo amor, amizade, compreensão e pelo apoio dados ao longo deste tempo.

Aos meus Pais e irmão, agradeço todo o carinho, educação, apoio e amor incondicional que sempre me transmitiram. Obrigada por acreditarem e confiarem em mim e sobretudo, por todo o esforço feito para que mais uma etapa na minha vida fosse concluída.

E por último, a todos com os quais me cruzei, por me ajudarem a aprender, crescer e alargar os meus horizontes.



## Resumo

O revestimento com laser permite criar revestimentos localizados pela adição de uma liga similar ou dissimilar. O revestimento visa melhorar as características da superfície metálica, tais como a dureza, a resistência ao desgaste por atrito, à corrosão e à fadiga térmica dos componentes sujeitos a condições adversas de trabalho por prolongados períodos de tempo.

Esta dissertação tem como objetivo o melhoramento da configuração, a automatização do sistema de revestimento com laser do Laboratório de Laser do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa, utilizado pelo Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados do Instituto Superior Técnico – CeFEMA e a realização de ensaios de deposições com o fim de validação.

Foram estudadas as configurações possíveis para o sistema de posicionamento da amostra, do laser e a configuração para o posicionamento com precisão do bocal de adição de pós ao banho de fusão. Após este estudo foram apresentadas e implementadas as propostas de melhoria do sistema inicial.

Para tornar o sistema funcional, foi desenvolvido um controlador para comandar as três guias motorizadas de movimento linear OWIS, o laser IPG YLR e o alimentador de pós PLASMA-TECHNIK. Para simplificar a utilização aos investigadores do CeFEMA foi ainda desenvolvida uma interface gráfica que permite ao utilizador definir os principais parâmetros do processo

Para a validação do trabalho desenvolvido foram realizados diversos ensaios de deposição da liga Ti52Ta num substrato de titânio. Através dos ensaios de deposição foi estudada a influência de alguns parâmetros do processo na geometria do revestimento obtido, como a altura, a profundidade, o ângulo do cordão, a diluição entre o material de adição e o substrato, tendo ainda sido estudada a influência dos parâmetros do processo na eficiência de deposição.

**Palavras-chave:** Revestimento com Laser; Automatização; Laser IPG YLR; Projeto Mecânico; Controlo de Processo



## **Abstract**

The laser cladding allows to create localized coating by the addition of a similar or dissimilar alloy. The coating aims to improving the characteristics of the metallic surface, such as hardness, wear and corrosion resistance, and thermal fatigue of components exposed to adverse working conditions for prolonged periods of time.

This dissertation has the aim to improving the configuration, automating of laser cladding system of the Laser Laboratory of the Instituto Superior Técnico (IST) at the University of Lisbon, used by Center of Physics and Engineering Advanced Materials - CeFEMA and performing deposition tests in order to system validation.

The possible configurations for sample, laser and lateral nozzle positioning system were studied. After this study were presented and implemented the proposals for improvements of initial system.

In order to make this system functional, was developed a controller to drive three OWIS linear guides, IPG YLR laser and PLASMA-TECHNIK powder feeder. In order to simplify the use of equipment by CeFEMA researchers, was developed a user friendly graphical interface that allows to define the main process parameters.

For the validation of this work, were performed several deposition tests of Ti52Ta alloy, in a titanium substrate.

Through the deposition tests, was studied the influence of some process parameters on the coating geometry obtained, such as height, depth and angle of clads, dilution between powder particles and the substrate, having also been studied the influence of process parameters on the deposition efficiency.

**Keywords: Laser Cladding; Automation; Laser IPG YLR, Mechanical Design; Process Control**



## Índice de Matérias

Copyright.....	iii
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	ix
Índice de Matérias .....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
Índice da Tabelas.....	xvii
Abreviaturas .....	xix
Simbologia .....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e objetivos da dissertação.....	1
1.2. Estrutura da dissertação.....	1
1.3. Contributos da dissertação.....	2
2. Deposição de Pós Metálicos Assistida por Laser – O Estado da Arte .....	3
2.1. Introdução ao processo.....	3
2.2. Influência dos materiais dos componentes e da fonte de calor no processo de deposição .....	6
2.3. Vantagens e desvantagens dos revestimentos com laser .....	7
2.4. Aplicabilidade do processo de deposição assistida por laser .....	9
2.5. Formas de adição do material.....	10
2.5.1. Método dos pós pré-colocados .....	10
2.5.2. Método dos pós alimentados durante o processo .....	12
3. Sistema Inicial de Deposição Assistida por Laser Existente no CeFEMA .....	13
3.1. CeFEMA – Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados.....	13
3.2. Descrição do equipamento existente .....	13
3.3. Análise crítica do equipamento existente .....	15
4. Propostas de Melhoria.....	17

4.1. Remodelação da configuração da instalação.....	17
4.2. Medidas de garantia da estanquicidade da câmara de luvas.....	26
4.3. Desenvolvimento de um sistema de controlo dos equipamentos do processo .....	30
4.3.1. Estrutura de controlo dos equipamentos utilizados .....	30
4.3.2. Aplicação informática para o controlo do processo .....	34
4.3.3. As principais rotinas de controlo implementadas.....	36
5. Validação Experimental do Sistema Remodelado e Discussão dos Resultados.....	47
6. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	59
7. Bibliografia.....	61
8. Anexos.....	65
Anexo 1 - Manual de controlo do laser IPG YLR 200 AC .....	67
Anexo 2 - As principais funções de controlo das guias lineares .....	71
Anexo 3 - Excerto das definições para as funções de controlo .....	73
Anexo 4 - Rotina de controlo do processo de revestimento .....	77
Anexo 5 - Rotina para testar a emissão de radiação .....	79
Anexo 6 - Rotina de paragem de emergência do processo “STOP” .....	81
Anexo 7 - Rotina para localizar o ponto focal.....	83
Anexo 8 - Rotina de envio de dados para o Arduino .....	85
Anexo 9 - Código do Arduino para a receção dos dados de comando.....	87
Anexo 10 - Rotina de mover as guias X, Y e Z.....	89
Anexo 11 - Rotina que atualiza a posição relativa das guias de movimento linear.....	91
Anexo 12 - Rotina para deslocar X, Y e Z numa distância definida .....	93
Anexo 13 - Rotina para identificar os limites das guias lineares X e Y .....	95
Anexo 14 - Rotina de inicialização das guias lineares X,Y e Z .....	97
Anexo 15 - Rotina de desligar os motores das guias lineares X, Y e Z .....	99

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Processos de tratamentos superficial com laser .....	4
Figura 2.2 – Comparação entre os processos com adição de material .....	5
Figura 2.3 – Absorção de radiação de alguns materiais em função do comprimento de onda.....	7
Figura 2.4 – Métodos de adição de material no processo de revestimento com laser.....	10
Figura 2.5 – Contração do revestimento após a passagem do laser .....	11
Figura 3.1 – Configuração inicial do sistema de deposição assistida por laser.....	14
Figura 3.2 – Alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C .....	14
Figura 3.3 – Configuração da instalação inicial com a identificação das correções necessárias .....	15
Figura 3.4 – Configuração inicial da estrutura do sistema de movimentação.....	16
Figura 4.1 – Configurações possíveis de um equipamento com três GDL de movimento linear .....	17
Figura 4.2 – Alteração do suporte de canto.....	18
Figura 4.3 – Esboço do projeto da nova configuração do sistema de movimentação linear XYZ.....	19
Figura 4.4 – Subconjunto do laser montado.....	19
Figura 4.5 – Componentes iniciais do subconjunto de apoio do laser .....	20
Figura 4.6 – Alteração do suporte inferior do laser.....	20
Figura 4.7 – Alteração do casquilho.....	21
Figura 4.8 – Alteração do suporte do laser e porca de encosto .....	21
Figura 4.9 – Extremidade do laser IPG .....	22
Figura 4.10 – Configurações possíveis para a alimentação de pós .....	23
Figura 4.11 – Bocal utilizado para a adição de pós ao banho de fusão .....	23
Figura 4.12 – Sistema de posicionamento do bocal de adição de material .....	24
Figura 4.13 – Guias lineares e angular utilizadas para o posicionamento bocal .....	24
Figura 4.15 – Ajustes possíveis no sistema implementado .....	25
Figura 4.16 – Equipamento no interior da câmara de luvas após os primeiros ensaios de deposição.	26
Figura 4.17 – Ensaio de estanquicidade da câmara de luvas.....	27

Figura 4.18 – Número reduzido de grampos de fixação na chapa de acrílico.....	27
Figura 4.19 – Saliência da cabeça dos parafusos relativamente à superfície de acrílico .....	28
Figura 4.20 – Montagem final da chapa de acrílico .....	28
Figura 4.21 – Fixação da chapa de acrílico .....	29
Figura 4.22 – Procedimento para vedar os furos existentes .....	29
Figura 4.23 – Estrutura de controlo do processo de revestimento por laser.....	30
Figura 4.24 – Conector do alimentador de pós que permite o seu controlo remoto.....	31
Figura 4.25 – Esquema do controlador do alimentador de pós .....	31
Figura 4.26 – Esquema de controlo do alimentador de pós.....	32
Figura 4.27 – Esquema para o controlo remoto da rotação do disco 1 e 2.....	33
Figura 4.28 – Esquema de controlo local/remoto da rotação do disco 1 do alimentador de pós.....	33
Figura 4.29 – Aplicação informática da OWIS para o controlo dos eixos X, Y e Z.....	34
Figura 4.30 – Primeira versão da aplicação de controlo .....	35
Figura 4.31 – Rotinas de movimentação eixos X, Y e Z e as rotinas para o controlo do laser .....	35
Figura 4.32 – Versão com o controlo do alimentador de pós.....	36
Figura 4.33 – Identificação das principais rotinas.....	37
Figura 4.34 – Trajetória de deposição .....	38
Figura 4.35 – Fluxograma simplificado da rotina de deposição.....	39
Figura 4.36 – Fluxograma simplificado da rotina de testar a emissão de radiação .....	40
Figura 4.37 – Fluxograma simplificado da rotina de paragem de emergência.....	40
Figura 4.38 – Perfil convergente-divergente de um feixe de laser .....	41
Figura 4.39 – Exemplificação das emissões com o substrato a diferentes cotas.....	41
Figura 4.40 – Resultado da execução da rotina de identificação do foco do feixe de laser .....	42
Figura 4.41 – Registo das cotas para cada emissão de radiação.....	42
Figura 4.42 – Fluxograma simplificado da rotina para identificar o foco do feixe de laser.....	43
Figura 4.43 – Fluxograma simplificado da rotina de mover X, Y ou Z.....	44
Figura 4.44 – Fluxograma simplificado da rotina de mover a guia X, Y ou Z numa distância em $\mu\text{m}$ .....	45
Figura 4.45 – Fluxograma simplificado da rotina de procurar os limites das guias X e Y .....	46
Figura 5.1 – Equipamento utilizados para a preparação dos pós de revestimento .....	48

Figura 5.3 – Calibração do alimentador de pós para a liga Ti52Ta.....	50
Figura 5.5 – Principais parâmetros da geometria do revestimento produzido .....	51
Figura 5.6 – Microscópio utilizado para obter as imagens das secções transversais das amostras.....	51
Figura 5.7 – Secção transversal de um dos revestimentos produzidos.....	52
Figura 5.8 – Penetração e da altura do revestimento com $\vartheta = 5,0$ mm/s .....	53
Figura 5.9 – Penetração e da altura do revestimento com $\vartheta = 7,5$ mm/s .....	53
Figura 5.10 – Penetração e da altura do revestimento com $\vartheta = 10,0$ mm/s .....	54
Figura 5.11 – Ângulo do revestimento .....	55
Figura 5.12 – Diluição entre o material de adição e o substrato .....	56
Figura 5.13 – Eficiência de deposição.....	57



## **Índice da Tabelas**

Tabela 2.1 – Comparação qualitativa de vários processos de deposição de material.....	8
Tabela 2.2 – Comparação quantitativa de vários processos de deposição de material.....	9
Tabela 5.1 – Gama de valores de rotação do disco do alimentador de pós escolhidos. ....	49
Tabela 5.2 – Parâmetros de deposição escolhidos.....	50
Tabela 5.3 – Características da geometria das deposições produzidas.....	52



## Abreviaturas

am	Material de adição
bm	Material de base
CeFEMA	Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados
DAC	Conversor digital analógico
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EBW	<i>Electron beam welding</i> (soldadura por feixe de elétrons)
ESD	<i>Electron spark deposition</i>
FCAW	<i>Flux cored arc welding</i> (MIG)
GDCS	<i>Gas dynamic cold spray</i>
GDL	Grau de liberdade
GTAW	<i>Gas tungsten arc welding</i>
HVOF	<i>High velocity oxy-fuel coating spraying</i>
IST	Instituto Superior Técnico
LBD	<i>Laser based deposition</i> (deposição por laser)
PS	<i>Plasma spraying</i>
PTAW	<i>Plasma transferred arc welding</i>
SAW	<i>Submerged arc welding</i>
SMAW	<i>Shielded metal arc welding</i>

## Simbologia

$A_{Dil.}$	Área de diluição entre o material de adição e o substrato
$A_{Rev.}$	Área do revestimento
$A_{Total}$	Área total do revestimento
C	Comprimento do revestimento
d	Distância da extremidade do bocal de adição ao feixe de laser
D	Profundidade do revestimento
F	Distância do substrato ao foco do feixe de laser
H	Altura do revestimento produzido

L	Largura do revestimento produzido
$\dot{m}$	Caudal mássico
P	Potência do laser
$v$	Velocidade de deposição
$\alpha$	Ângulo de incidência do fluxo pós ao banho de fusão
$\beta$	Ângulo do cordão de revestimento
$\lambda$	Comprimento de onda da radiação no vácuo



# Introdução

## 1.1. Enquadramento e objetivos da dissertação

Esta dissertação foi realizada no âmbito de um estágio, proposto pela Professora Doutora Helena Navas e a Professora Doutora Teresa Morgado, no Laboratório de Laser do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. O objetivo deste estágio e da dissertação consistiu na melhoria do sistema de deposição assistida por laser deste laboratório e na realização de alguns ensaios de deposição.

Este trabalho envolveu a revisão bibliográfica do processo de deposição assistida por laser, a identificação do equipamento existente no laboratório e a sua análise crítica, para serem apresentadas as propostas de melhoria, que envolveram a área de projeto mecânico. Para realizar os testes de deposição foi necessário desenvolver o sistema de controlo dos equipamentos utilizados neste processo de revestimento.

Os ensaios de deposição realizados foram essenciais para melhorar as propostas apresentadas e para conhecer a influência dos parâmetros do processo no resultado do revestimento.

## 1.2. Estrutura da dissertação

A presente dissertação foi dividida em seis capítulos, compostos por vários subcapítulos.

O primeiro capítulo designado por “*Introdução*” apresenta os objetivos, estrutura e contributos desta dissertação.

No segundo capítulo, designado por “*Deposição de Pós Metálicos Assistida por Laser – O Estado da Arte*”, é exposta uma revisão bibliográfica do processo abordado nesta dissertação.

O capítulo três, designado por “*Instalação Inicial de Deposição Assistida por Laser Existente no CeFEMA*”, é feita uma breve apresentação do centro de investigação onde foi realizado este trabalho e é apresentada uma descrição do equipamento existente do sistema de deposição assistida por laser, seguida de uma análise crítica.

No capítulo quatro, designado por “*Propostas de melhoria*”, são apresentadas as propostas de melhoria dos componentes estruturais do sistema de movimentação XYZ, dos componentes do subconjunto do laser e do sistema de posicionamento do bocal de alimentação de pós. Neste capítulo são apresentadas as medidas tomadas para garantir a estanquicidade da câmara de luvas, onde é realizado o processo de deposição, e é feita uma apresentação do sistema de controlo desenvolvido para este processo.

No capítulo cinco, designado por “*Validação Experimental do Sistema Remodelado e Discussão de Resultados*”, é feita uma descrição do procedimento para a realização dos ensaios de deposição e é feita a discussão dos resultados obtidos, comparando-os com os resultados obtidos por outros autores.

No capítulo seis, designado por “*Conclusões e Trabalhos Futuros*”, é feita uma breve conclusão dos resultados obtidos com este trabalho e são sugeridos trabalhos futuros que podem ser realizados com possível relevância para o centro de investigação, para a comunidade científica e para a indústria.

### **1.3. Contributos da dissertação**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permite ao Laboratório de Laser, utilizado pelo CeFEMA, utilizar o sistema de deposição de pós metálicos assistida por laser, que anteriormente se encontrava inoperacional, para o estudos de ligas novas ligas para o revestimento superficial.

## Deposição de Pós Metálicos Assistida por Laser – O Estado da Arte

No âmbito desta dissertação é relevante realizar o estado de arte sobre o processo de fabrico e de reparação de componentes mecânicos através do processo de revestimento com laser. Desta forma neste capítulo é apresentado um estudo detalhado do processo físico, os métodos de deposição utilizados no revestimento com laser, as suas vantagens e desvantagens, sendo também feita uma comparação com outras técnicas de revestimento. É discutida a influência da fonte de calor, as propriedades dos materiais de base e de adição, a configuração do sistema adição de material, e os resultados dos revestimentos obtidos. É apresentada ainda a aplicabilidade deste processo na indústria.

### 2.1. Introdução ao processo

No meio científico são utilizadas designações como *laser cladding*, *direct metal deposition*, *direct laser deposition*, *directed light fabrication*, *laser power fusion*, *laser engineered net shaping*, entre outras, para indicar o processo de deposição de pós assistida por laser. Costa e Vilar sugeriram que fosse utilizada a designação *laser powder deposition* ou deposição de pós assistida por laser a fim de unificar os termos utilizados para descrever este processo de revestimento por laser (Costa & Vilar, 2009).

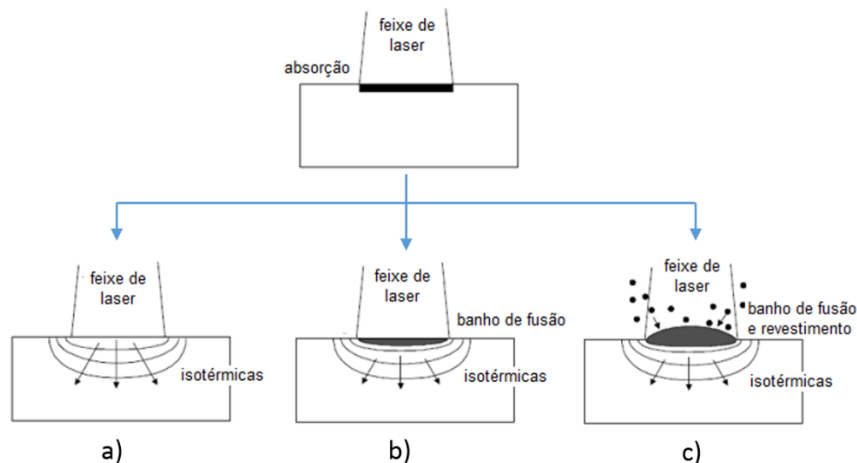
No processo de deposição de pós assistida por laser o feixe de laser é utilizado como fonte de calor para fundir a superfície do substrato e do material de revestimento, que geralmente têm diferentes propriedades metalúrgicas (Onwubolu *et al.*, 2007; Schneider, 1998). É um processo

conhecido no meio industrial e científico pela elevada densidade energética e pelas reduzidas zonas termicamente afetadas (Farnia et al., 2012; Jhavar et al., 2013; Navas et al., 2005).

A classificação deste processo dentro das técnicas de tratamento superficial com laser não é unânime, contudo na literatura são distinguidos os seguintes subgrupos (Schneider, 1998; Ion, 2005; Steen & Mazumder, 2010):

- Sem a fusão da superfície, designado por *surface hardening* ou têmpera superficial;
- Com a fusão da superfície, designado por *surface melting* ou fusão superficial;
- Com a fusão da superfície e com adição de material, designado por *alloying*, *dispersing*, *cladding* respetivamente ligamento, dispersão, revestimento, consoante o nível de diluição do material de adição e o material de base.

A Figura 2.1 ilustra a classificação dos processos de tratamento superficial com laser.



**Figura 2.1 – Processos de tratamentos superficial com laser [Adaptado de (Schneider, 1998)]**  
a) *surface hardening* (têmpera superficial); b) *surface melting* (processo com fusão superficial); c) *alloying*, *dispersing*, *cladding* (ligação, dispersão, revestimento)

No subgrupo em que ocorre fusão e adição de material, como ilustra a Figura 2.1 c), este pode ainda ser distinguido em três subgrupos, *laser alloying*, *laser dispersing* e *laser cladding*, respetivamente ligamento por laser, dispersão por laser, revestimento por laser.

Como ilustra a Figura 2.2, a distinção entre estes subprocessos de tratamento superficial é feita pelo nível de diluição, em profundidade, do material de adição com o material de base (Schneider, 1998).

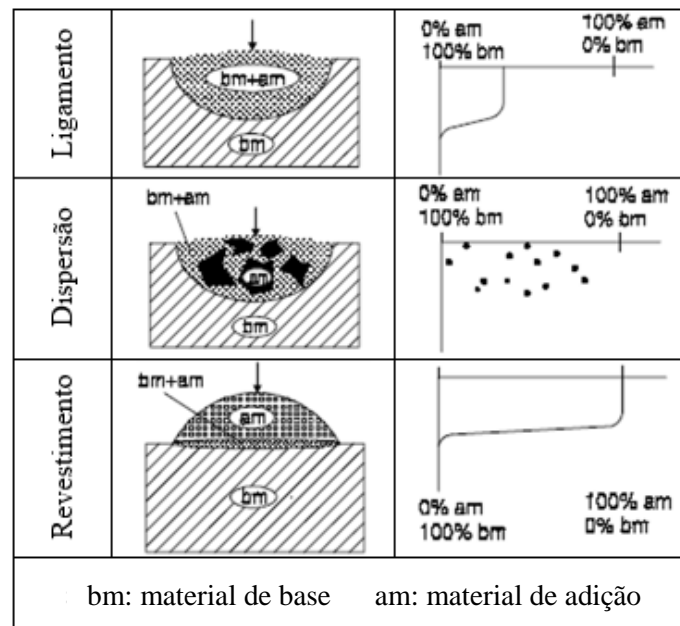


Figura 2.2 – Comparação entre os processos com adição de material [Adaptado de (Schneider, 1998)]

O subprocesso de revestimento por laser permite obter deposições finas para proteção superficial do material de base (Onwubolu et al., 2007), melhorando as propriedades mecânicas superficiais do componente metálico (Schneider, 1998; Li et al., 2004; Farnia et al., 2012). Consoante os requisitos da superfície requerida, esta pode ficar com uma maior dureza (Folkes & Shibata, 1994) e/ou uma maior resistência ao desgaste por atrito (Acker et al., 2005; Camoletto et al., 1991; Choi & Mazumder, 1994; Gnanamuthu et al., 1980) e/ou uma maior resistência à corrosão do que o material de base (Bruck, 1987; Fouquet et al., 1994; Mahmood et al., 2012).

Para obter as propriedades anteriormente referidas, o grau de diluição entre o substrato e a liga de adição deve ser por um lado suficiente para garantir uma apropriada ligação entre o material de adição e o material de base, mas por outro lado não deve ser excessiva para não inferir negativamente nas propriedades mecânicas da liga de adição (Farnia et al., 2012; Komvopoulos & Nagarathnam, 1990; Schneider, 1998; Navas et al., 2005; Vilar, 1998).

O melhoramento das propriedades mecânicas da camada superficial não se deve somente às características metalúrgicas do revestimento, mas é também resultado dos ciclos térmicos aplicados durante o processo de deposição. As elevadas taxas de aquecimento e arrefecimento que ocorrem durante o processo, devido à concentração do feixe de laser num ponto confinado e condução da energia para a periferia, resultam num refinamento do grão da microestrutura, fenómeno que também é conhecido por têmpera, promovendo o melhoramento das propriedades mecânicas superficiais. ( Li, He and Sun, 2004; Schneider, 1998).

## **2.2. Influência dos materiais dos componentes e da fonte de calor no processo de deposição**

Os lasers são utilizados como fonte de calor no processamento de materiais, por permitirem elevadas entregas térmicas, que conduzem a pequenas zonas termicamente afetadas, ao contrário das fontes de calor convencionais, como por exemplo o arco elétrico. A evolução da tecnologia dos lasers e a introdução no mercado dos lasers de fibra, de elevada potência, permitiu reduzir significativamente os custos de utilização e de manutenção, quando comparados com os lasers de CO<sub>2</sub> ou os lasers de Nd:YAG convencionais. Estes lasers de fibra permitem ainda uma maior flexibilidade, assim como uma maior facilidade de controlo e de automatização (Jhavar et al., 2013).

A superfície do material é aquecida pela absorção da energia do feixe de laser. A interação do feixe de laser de elevada potência num ponto bem confinado da superfície origina uma elevada entrega térmica e conseqüentemente uma elevada taxa de aquecimento. Após a passagem do laser, devido ao rápido escoamento do calor gerado pela condução para a periferia por condução, são geradas também as taxas de arrefecimento elevadas.

O comprimento de onda do feixe de laser e os materiais utilizados são dois principais parâmetros que influenciam a absorção de energia emitida pela fonte de calor, como ilustra a Figura 2.3, entre outros fatores. Para pequenos comprimentos de onda, uma maior quantidade de energia da radiação é absorvida pelo material, reduzindo a refletividade e aumentando a absorção superficial. A absorção não depende somente do comprimento de onda, mas também do tipo de material, entre outros fatores.

A Figura 2.3 apresenta a o nível de absorção de radiação de alguns materiais em função do comprimento de onda.

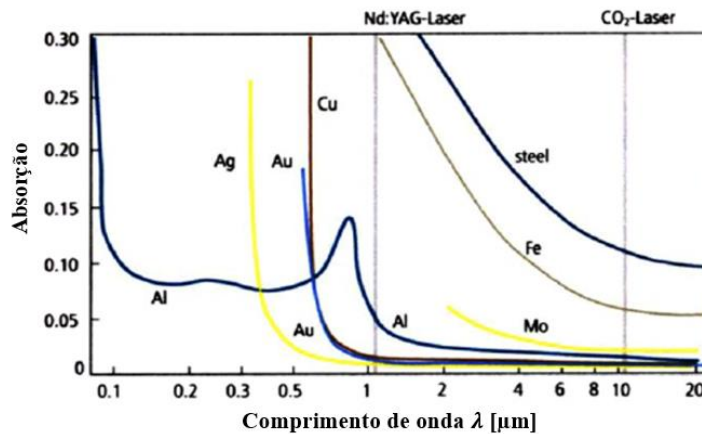


Figura 2.3 – Absorção de radiação de alguns materiais em função do comprimento de onda [Adaptado de (Quintino et al., 2007)]

Na literatura são referidas algumas das principais propriedades dos materiais a ter em conta no processamento de materiais, como (Quintino et al., 2007):

- As propriedades óticas da superfície do material como a absorção e a reflexão;
- As propriedades térmicas como a condutividade, a difusibilidade e a capacidade calorífica;
- As temperaturas de fusão e de vaporização

Deste modo, no processamento de materiais é importante optar por um tipo de laser adequado aos materiais/ligas a processar.

### 2.3. Vantagens e desvantagens dos revestimentos com laser

Existem diversas técnicas já consagradas para melhorar as propriedades mecânicas superficiais dos componentes metálicos. Contudo, dependendo da técnica aplicada, existem diversos problemas como a fraca ligação entre o substrato e o material de adição, a ocorrência de porosidade, distorções térmicas no componente, diluição da camada superficial com o material base e a incapacidade de realizar tratamentos localizados.

A utilização de um feixe de laser nos tratamentos superficiais tem diversas vantagens sobre as fontes de calor convencionais, como (Schneider, 1998; Jhavar et al., 2013):

- Permite realizar tratamentos superficiais localizados;
- Entrega térmica total é baixa, resultando em distorções mínimas;

- As elevadas taxas de aquecimento e arrefecimento, resultam num refinamento da microestrutura;
- O processo não envolve contacto;
- Profundidade de penetração é bem definida.

Na Tabela 2.1 é apresentada uma comparação qualitativa dos principais processos de deposição de material superficialmente.

**Tabela 2.1 – Comparação qualitativa de vários processos de deposição de material [Adaptado de (Jhavar et al., 2013)]**

Critério	GTAW/ PTAW	LBD	Micro TIG/ Plasma	EBW	ESD	GDCS	HVOF
Taxa de deposição	●●●●○	●●●●○	●●○○○	●●●●●	●○○○○	●●○○○	●●●●●
Portabilidade	●●●●○	●●○○○	●●●●○	●○○○○	●●●●○	●●●○○	●●○○○
Acesso a geometrias complexas	●●●●○	●●○○○	●●●●○	●○○○○	●○○○○	●○○○○	●○○○○
Custo	●○○○○	●●●●○	●●○○○	●●●●○	●○○○○	●●○○○	●●○○○
Propriedades metalúrgicas	●○○○○	●●●●○	●●●●○	●●○○○	●●●○○	●●○○○	●●○○○
Tempo de <i>Setup</i>	●●○○○	●●●●○	●●●○○	●○○○○	●●●○○	●●●○○	●●○○○
Necessidade de tratamento térmico	●○○○○	●●●●○	●●●○○	●●○○○	●●●○○	●●●○○	●●○○○

Elevado ●●●●●, Médio ●●●○○, Baixo ○○○○○

*GTAW – gas tungsten arc welding; PTAW - plasma transferred arc welding; LBD – laser based deposition (deposição por laser); EBW – electron beam welding (soldadura por feixe de eletrões); ESD – electrospark deposition; GDCS – gas dynamic cold spray; HVOF – high velocity oxy-fuel coating spraying*

Pela Tabela 2.1, onde são comparados alguns processos de deposição, verifica-se que a deposição assistida por laser tem algumas desvantagens como a baixa portabilidade, os custos de utilização, o tempo de *setup* e não ser o processo indicado para geometrias complexas. Por outro lado constata-se que o processo de deposição assistida por laser é o processo que permite obter as propriedades metalúrgicas superiores.

A Tabela 2.2 permite fazer uma comparação quantitativa de alguns parâmetros importantes como a espessura, a taxa de deposição, a distorção nos componentes, a precisão de deposição, a diluição entre o material de adição e o material de base e ainda a integridade. Verifica-se por esta tabela que a deposição com laser, embora não permita obter uma espessura e uma taxas de deposição significativas, é o processo que permite obter reduzidas distorções no componente e uma reduzida diluição entre o material de adição e o substrato. Além destas vantagens permite ainda realizar deposições localizadas e garante uma adequada integridade ao componente, uma vez que as fissuras geradas são mínimas ou nulas.

Na Tabela 2.2 é apresentada a comparação quantitativa dos principais processos de revestimento superficial.

**Tabela 2.2 – Comparação quantitativa de vários processos de deposição de material [Adaptado de (Ion, 2005)]**

	Laser	SMAW	FCAW	SAW	GTAW	PS
Espessura [mm]	0,2-2,0	1,6-1,0	1-6	2-10	0,5-3,0	0,1-0,2
Taxa de deposição [kg/h]	0,2-7	0,5-2,5	2-11	5-25	0,5-3,5	0,5-7
Distorção	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Baixa
Precisão	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média
Diluição [%]	1-5	15-25	15-20	10-50	10-20	5-30
Integridade	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa

*SMAW – shielded metal arc welding; FCAW – flux cored arc welding (MIG); SAW – submerged arc welding; GTAW - gas tungsten arc welding; PS – plasma spraying*

Segundo Schneider (1998), a deposição de pós metálicos assistida por laser em comparação com os processos já consagrados, permite obter melhores resultados em termos de pureza, homogeneidade, dureza, ligação e de microestrutura. Contudo este processo não é a alternativa mais económica em termos de rendimento e custos de produção para o revestimento de grandes áreas (Schneider, 1998).

## **2.4. Aplicabilidade do processo de deposição assistida por laser**

Na indústria o processo de revestimento superficial com laser é aplicado a componentes mecânicos que após um período de utilização necessitam de reparação, a fim de estender o seu tempo de vida (Capello et al., 2005). Em geral estes componentes são expostos a ambientes agressivos, a elevados ciclos térmicos, a gases corrosivos, a elevadas temperaturas e sujeitos a desgaste por atrito e/ou erosão provocada pela cavitação.

Na literatura técnica é referido que este processo de revestimento é utilizado em diversas indústrias, como:

- Indústria dos moldes na reparação de moldes e matrizes (Onwubolu et al., 2007; Jhavar et al., 2013; Navas et al., 2005; Shaoke, 2014; Dianbing, 2014);
- Indústria naval na reparação da cambota de navios (Torims et al., 2015);
- Indústria mineira na reparação de componentes sujeitos a desgaste por atrito (Che et al., 2014)
- Indústria siderúrgica na reparação de componentes sujeitos a desgaste e a ciclos térmicos (Ray et al., 2014);

- Indústria aeronáutica na reparação de componentes das turbinas (Wang & Lin, 2014).

Para além dos exemplos de aplicações industriais, este processo encontram-se na fase de estudo e de ensaios laboratoriais para aplicações noutros ramos de atividade, nomeadamente no fabrico de próteses.

## 2.5. Formas de adição do material

Na literatura especializada na temática, a adição de pós é diferenciada entre os pós pré-colocados sobre o substrato e os pós alimentados durante o processo, como ilustra a Figura 2.4.

A Figura 2.4 apresenta os dois métodos de adição de material, os pós pré-colocados sobre o substrato e a alimentação durante o processo.

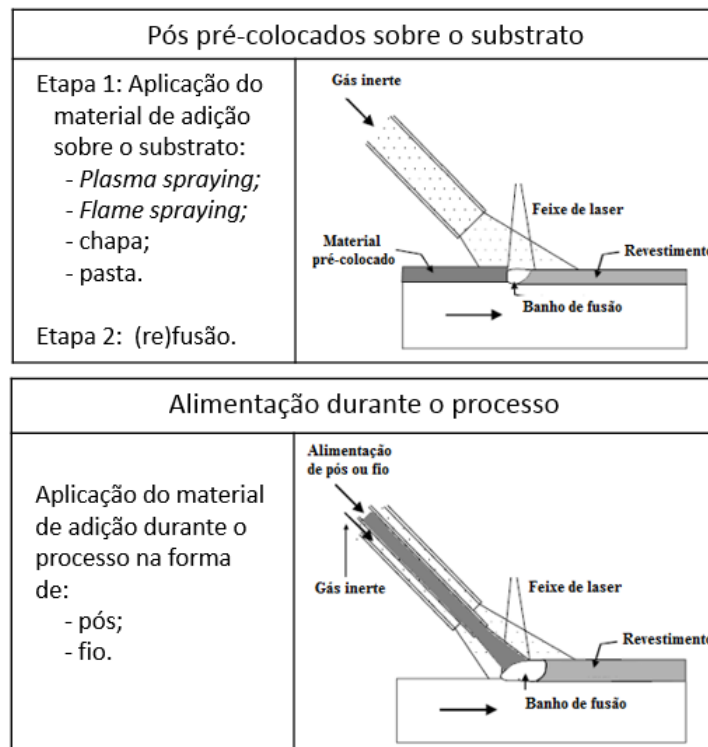


Figura 2.4 – Métodos de adição de material no processo de revestimento com laser [Adaptado de (Schneider, 1998)]

### 2.5.1. Método dos pós pré-colocados

No método dos pós pré-colocados sobre a superfície do substrato, o banho de fusão começa a ser formado na superfície do material de revestimento. O banho de fusão propaga-se até à interface entre o material de revestimento e o substrato, criando a ligação entre estes. Estes pós

são misturados com um *chemical binder* (ligante químico) formando uma pasta, que é distribuída pelo substrato, como ilustra a Figura 2.4. Sem este ligante os pós seriam soprados para fora da zona do processo pelo gás de proteção(Schneider, 1998).

Segundo Schneider (1998), neste método a entrega térmica deve ser muito bem controlada para evitar por um lado a fraca ligação e por outro lado evitar uma fusão profunda do substrato, que resulta numa elevada diluição entre o substrato e o material de adição. Se a temperatura na interface permanecer demasiado baixa são produzidos cordões com uma forma irregular, com fissuras, porosidade e com uma fraca ligação entre o material de adição e o material de base. Por outro lado, se forem atingidas temperaturas muito elevadas na interface entre o material de adição e o material de base, ocorre uma fusão severa do substrato, resultando numa elevada mistura entre o material de revestimento e o substrato, que leva à deteriorando das propriedades mecânicas iniciais do revestimento.

Este método é aplicado particularmente no revestimento de componentes com uma única deposição. É possível realizar deposições adjacentes, contudo este método leva a um aumento da diluição entre o material de adição e o material de base, o que constitui uma desvantagem. Como ilustra a Figura 2.5, após a primeira passagem do laser, o revestimento produzido contrai e deixa a superfície do substrato exposta ao feixe de laser na deposição seguinte. A exposição direta da superfície à radiação leva a um aumento da fusão do substrato e conseqüentemente a um aumento da diluição com o material de adição (Schneider, 1998).

A Figura 2.5 ilustra a contração do revestimento após a primeira passagem do laser e a exposição da superfície, do substrato, durante a passagem seguinte do laser.

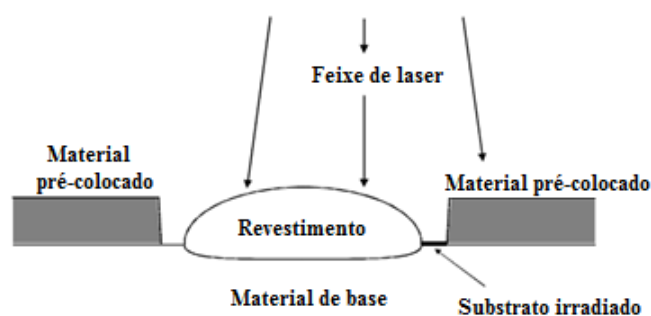


Figura 2.5 – Contração do revestimento após a passagem do laser [Adaptado de (Schneider, 1998)]

Assim o método com pós pré-colocados não é o mais apropriado para obter áreas de revestimento através de deposições adjacentes.

## 2.5.2. Método dos pós alimentados durante o processo

No método dos pós alimentados durante o processo, o banho de fusão começa por ser formado na superfície do substrato e o material de adição é injetado para o banho de fusão. Durante a interação dos pós com o feixe de laser, os pós são aquecidos antes de incidirem no banho de fusão (Oliveira et al., 2005). O material de adição ao incidir no banho de fusão é fundido, criando um revestimento com uma forte ligação entre o material de adição e o material de base.

Segundo Schneider (1998) o método dos pós alimentados durante o processo tem diversas vantagens sobre o método dos pós pré-colocados sobre a superfície do substrato:

- Permite revestir áreas significativas, uma vez que é possível realizar cordões adjacentes com uma diluição mínima;
- A espessura do revestimento pode ser variada durante o processo, pela variação do caudal mássico de pós injetado para o banho de fusão;
- Permite revestir componentes com uma superfície de geometria complexa, uma vez que o material é continuamente alimentado para o banho de fusão, não existindo o problema do material sair da superfície do substrato devido à gravidade.

Na literatura é referido que o material de adição pode ser sob a forma de pó ou de arame (Jhavar et al., 2013), contudo é mais comum o uso de pós (Schneider, 1998). Na alimentação sobre a forma de arame qualquer imprecisão no posicionamento do arame e na velocidade de alimentação provoca uma considerável alteração da forma e dimensão do banho de fusão, resultando num cordão de revestimento não uniforme e assimétrico. Na forma de arame parte do feixe de laser é obstruído pelo arame, enquanto que sob a forma de pós uma maior percentagem do feixe de laser atinge a superfície do substrato. A utilização do material de adição sob a forma de pós permite variar a percentagem dos elementos de liga durante o processo de deposição, assim existe uma maior diversidade de materiais (metálicos e não metálicos) disponíveis no mercado sob a forma de pós.

A alimentação de pós permite que as partículas sejam aquecidas durante a interação com feixe de laser, antes de estas incidirem no banho de fusão (Jhavar et al., 2013). A velocidade das partículas, as suas dimensões e a potência do laser são os principais parâmetros que influenciam o aquecimento das partículas (Schneider, 1998). Neste método dos pós injetados é comum utilizar-se um caudal de gás inerte como meio de transporte dos pós até ao banho de fusão.

## **Sistema Inicial de Deposição Assistida por Laser Existente no CeFEMA**

O capítulo descreve o centro de investigação, CeFEMA, onde foi realizado um estágio e elaborada a dissertação, a instalação de deposição assistida por laser inicialmente existente no Laboratório de Laser e contém também a análise crítica com a identificação dos problemas e dos pontos de melhoria do equipamento.

### **3.1. CeFEMA – Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados**

A presente dissertação foi desenvolvida no Laboratório de Laser do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa, utilizado pelo Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados do Instituto Superior Técnico – CeFEMA.

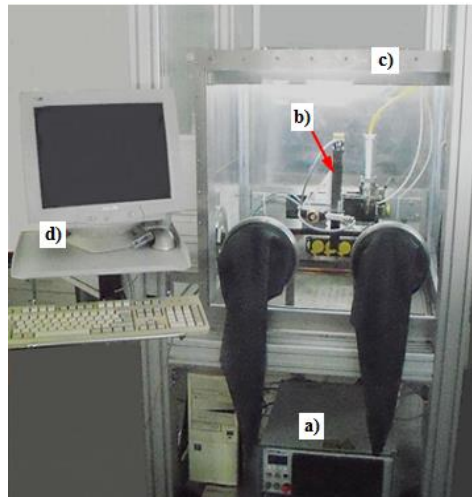
Este centro de investigação tem como objetivo contribuir para o avanço da ciência e engenharia de materiais, promover a transferência de conhecimento e tecnologia para o desenvolvimento regional, nacional e internacional pela realização de projetos orientados para a indústria.

### **3.2. Descrição do equipamento existente**

Como identifica a Figura 3.1 o sistema é constituído por um laser IPG YLR 200 AC (Figura 3.3 a)), três guias motorizadas de movimento linear OWIS LTM 80F-150 (Figura 3.3 b)), um alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C (Figura 3.2), uma câmara de luvas

(Figura 3.3 c)) e um computador (Figura 3.3 d)). Contudo, no início dos trabalhos, este sistema encontrava-se inoperacional e os componentes no interior da câmara encontravam-se desmontados.

A Figura 3.3 apresenta a configuração inicial do sistema utilizado para realizar deposições assistidas por laser.



**Figura 3.1 – Configuração inicial do sistema de deposição assistida por laser**  
a) laser; b) guias lineares motorizadas; c) câmara de luvas; d) computador

A Figura 3.2 ilustra o alimentador de pós do Laboratório de Laser.

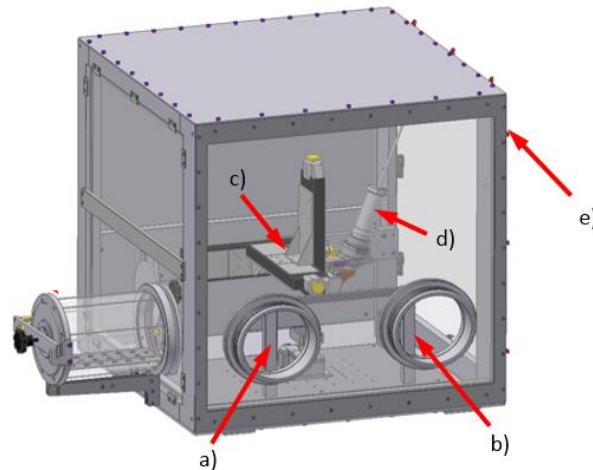


**Figura 3.2 – Alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C [Adaptado de (Oerlikon Metco, 2014)]**

### 3.3. Análise crítica do equipamento existente

Foi transmitido pelos investigadores do CeFEMA que este equipamento tinha alguns problemas de conceção que necessitavam de serem corrigidos. Alguns dos pontos críticos são identificados na Figura 3.3.

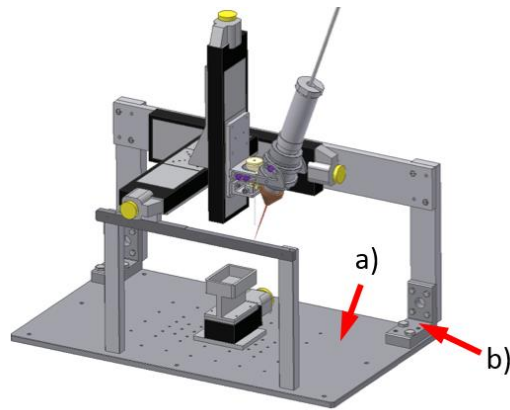
A Figura 3.3 ilustra o sistema inicial com a identificação das correções necessárias.



**Figura 3.3 – Configuração da instalação inicial com a identificação das correções necessárias**  
a) suporte esquerdo; b) suporte direito; c) sistema de guiamento do suporte do laser; d) suporte do laser; e) face anterior da câmara de luvas

Através da Figura 3.3 verifica-se que o suporte esquerdo (Figura 3.3 a)) e o suporte direito (Figura 3.3 a)) limitam a acessibilidade ao interior da câmara de luvas para o manuseamento das amostras e para a transferência das amostras entre a antecâmara (Figura 3.3 f)) e o interior da câmara de luvas. Na configuração anterior observa-se que o tipo de configuração de movimentação em XYZ (Figura 3.3 c)) provocava vibrações no suporte do laser (Figura 3.3 d)) durante o processo de deposição, que resultavam num revestimento irregular.

A Figura 3.4 ilustra a estrutura inicial do sistema de movimentação.



**Figura 3.4 – Configuração inicial da estrutura do sistema de movimentação**

**a) placa de base; b) suporte de canto**

Constatou-se que a placa de base (Figura 3.4 a)) e o suporte de canto (Figura 3.4 b)), localizados no interior da câmara, apresentavam sinais de oxidação por corrosão. No capítulo 4 é apresentada uma proposta de melhoria de modo a evitar que componentes neste estado permaneçam no interior da câmara.

A câmara de luvas é utilizada para criar uma atmosfera inerte, a fim de minimizar a oxidação e contaminação do banho de fusão, pela exposição ao azoto e ao oxigénio. A fraca estanquicidade da câmara de luvas, identificada pelos investigadores, obrigava à introdução de mais gás inerte (árgon) no interior da câmara de luvas no início de cada utilização.

Foi também verificado, que devido à falta de parte dos ficheiros do programa de controlo do sistema, não era possível utilizar o controlador inicialmente desenvolvido no laboratório. Deste modo, foi necessário desenvolver um novo controlador para este sistema.

## Propostas de Melhoria

### 4.1. Remodelação da configuração da instalação

Para solucionar os problemas da configuração inicial, indicados no subcapítulo 0, optou-se por estudar uma configuração alternativa para os eixos de movimentação lineares (XYZ). Segundo Groover, um sistema com três graus de liberdade (GDL) lineares pode ter diferentes configurações, como ilustra a Figura 4.1 (Groover, 2007).

A Figura 4.1 ilustra as algumas das configurações possível para um sistema com três GDL.

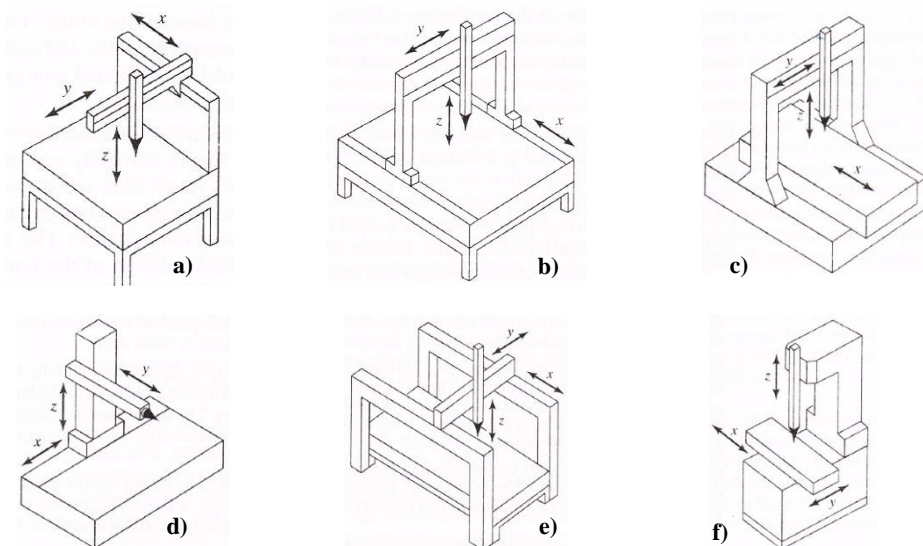


Figura 4.1 – Configurações possíveis de um equipamento com três GDL de movimento linear [Adaptado de (Groover, 2007)]

a) configuração 1; b) configuração 2; c) configuração 3; d) configuração 4; e) configuração 5; f) configuração 6

Optou-se pela configuração 6 da Figura 4.1 f). Sabendo que a nova configuração deve contemplar a implementação das guias motorizadas de movimento linear OWIS da montagem inicial, o problema inicial fica resolvido com a configuração proposta. A configuração escolhida permite uma melhor estabilidade do laser durante o processo uma vez que as amostras são movimentadas no plano horizontal (XY), não implicando a movimentação do eixo vertical, eixo onde é acoplada a estrutura do laser. Assim, os problemas de uniformidade e irregularidade do revestimento são minimizados.

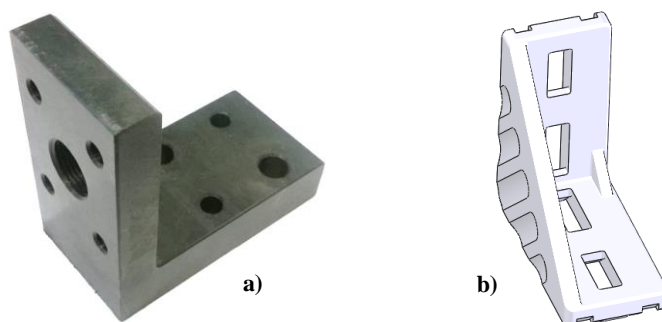
### **Alteração dos componentes originais da estrutura de fixação das guias de movimento linear X, Y e Z**

Para evitar a presença dos componentes oxidados no interior da câmara, apresentados na Figura 3.4, foi proposta a substituição dos componentes estruturais do sistema de movimentação em aço por novos componentes em liga de alumínio. Devido à inexistência da lista de peças da montagem inicial, não foi possível identificar o tipo de aço dos seus componentes.

Foi proposta a alteração da placa de base estrutural do sistema de movimentação, por uma em liga de alumínio Al 7075. A substituição deste componente permitiu reduzir o seu peso em aproximadamente 72,5 %.

Foi proposta a alteração dos suportes de canto da montagem inicial, ilustrados na Figura 3.4 b) e na Figura 4.2 a), por perfis comercial da Bosch Rexroth Figura 4.2 b), em liga de alumínio. Esta proposta de alteração permitiu reduzir o peso próprio em aproximadamente 86 % e evitar a oxidação destes componentes e a permanência no interior da câmara de luvas.

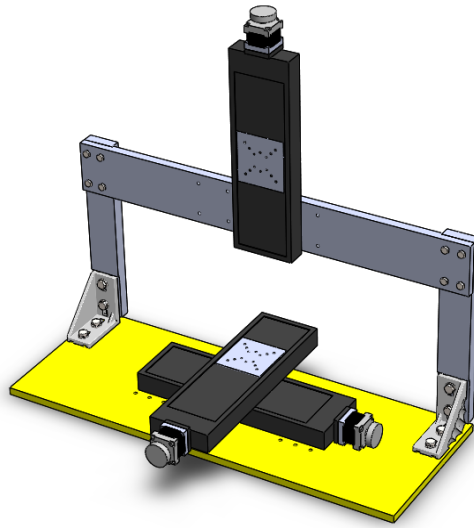
A Figura 4.2 apresenta o suporte de canto original e o componente comercial de substituição proposto.



**Figura 4.2 – Alteração do suporte de canto**

**a) componente original de fixação da estrutura da guia de movimento linear vertical à placa de base; b) perfil comercial de substituição**

A Figura 4.3 ilustra o esboço do projeto da nova configuração para as guias motorizadas de movimento lineares.



**Figura 4.3 – Esboço do projeto da nova configuração do sistema de movimentação linear XYZ**

A configuração ilustrada na Figura 4.3 permitiu reduzir significativamente o peso deste conjunto estrutural.

#### **Alteração dos componentes do subconjunto do laser**

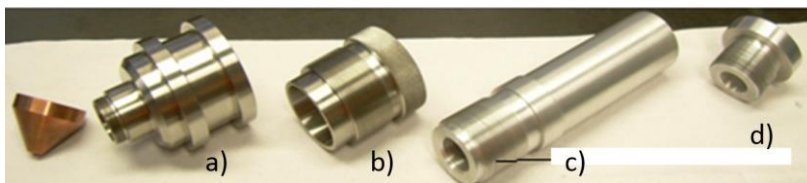
Foi proposta a alteração dos componentes do subconjunto de suporte do laser, ilustrados na Figura 4.4 e Figura 4.5, com o objetivo de minimizar o seu peso, reduzir a sua complexidade e de permitir o acoplamento do sistema de posicionamento do bocal de adição de pós.

A Figura 4.4 apresenta o subconjunto do laser inicial.



**Figura 4.4 – Subconjunto do laser montado**

A Figura 4.5 apresenta individualmente os alguns dos componentes do subconjunto do laser.

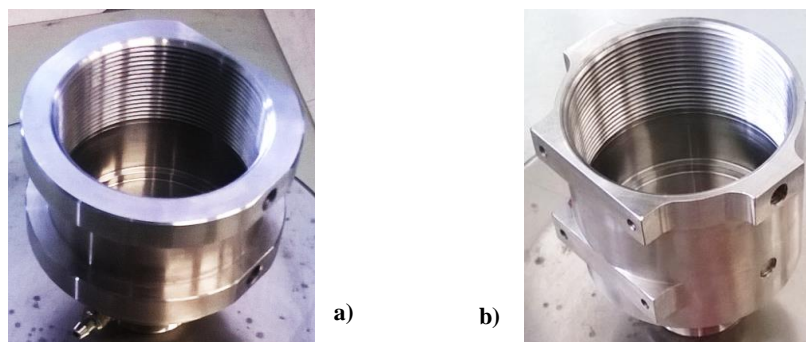


**Figura 4.5 – Componentes iniciais do subconjunto de apoio do laser**

**a) suporte inferior, b) casquilho, c) suporte do laser, d) encosto do laser**

Foi proposta a alteração do suporte inferior, ilustrado na Figura 4.6, para permitir o acoplamento do sistema de posicionamento do bocal de adição de material, mencionado posteriormente neste subcapítulo. A lente de focagem do feixe de laser é montada neste componente.

Na Figura 4.6 é ilustrada a alteração deste componente, sendo apresentado na Figura 4.6 a) o componente original e na Figura 4.6 b) o componente após a maquinagem.

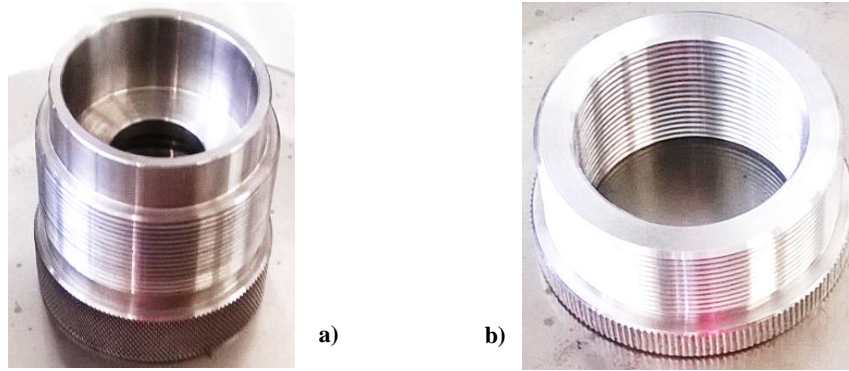


**Figura 4.6 – Alteração do suporte inferior do laser**

**a) componente antes de ser maquinado; b) componente após ser maquinado**

O casquilho em aço inoxidável foi substituído por um novo casquilho em liga de alumínio, Al 7075, como ilustra a Figura 4.7. Esta alteração permitiu reduzir as dimensões do componente inicial e reduzir o seu peso em aproximadamente 80 %.

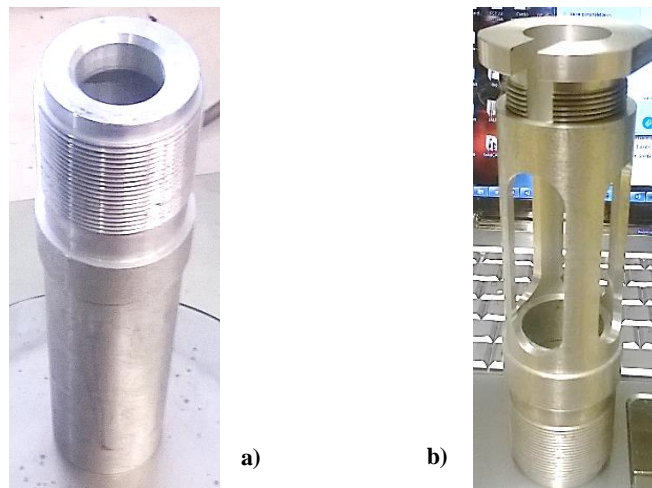
A Figura 4.7 apresenta o casquilho original (Figura 4.7 a)) e o casquilho de substituição proposto em Al 7075 (Figura 4.7 b)).



**Figura 4.7 – Alteração do casquilho**

**a) casquilho original em aço inoxidável; b) casquilho de substituição em Al 7075**

A Figura 4.8 apresenta a alteração do suporte do laser e da porca de encosto do laser.



**Figura 4.8 – Alteração do suporte do laser e porca de encosto**

**a) componente, onde é montado o laser, antes de maquinado; b) componentes após a maquinagem**

A altura do suporte do laser, ilustrado na Figura 4.8, foi reduzida em 15 mm e foram abertas as ranhuras ilustradas na Figura 4.8 b). Estas aberturas facilitam a remoção da extremidade do laser, ilustrada na Figura 4.9, do interior deste componente, evitando danificar a fibra ótica.

A Figura 4.9 ilustra a extremidade do laser que contem a lente que tornam o feixe de laser paralelo.



**Figura 4.9 – Extremidade do laser IPG [Adaptado de (HELASER, 2015)]**

### **Implementação do sistema de alimentação de pós e do seu sistema de posicionamento**

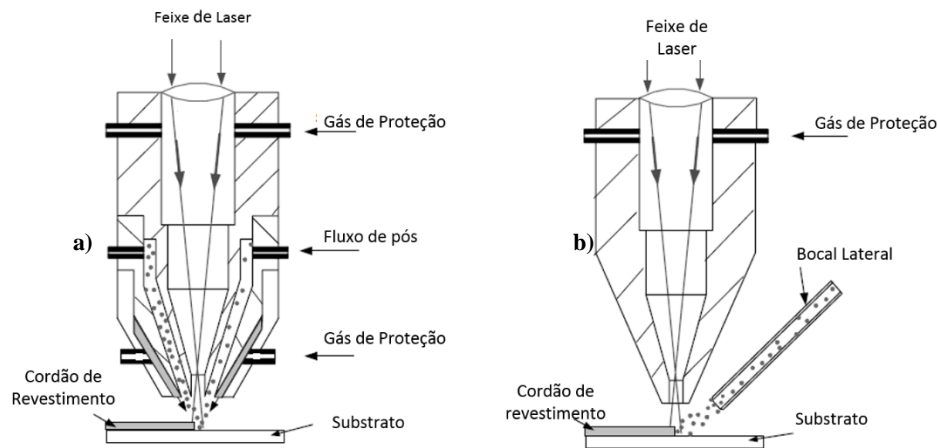
Para a adição de material ao processo, foi proposta a implementação do método dos pós alimentados durante o processo ao banho de fusão, em vez do método dos pós pré-colocados.

Como foi apresentado no subcapítulo 2.5, o método dos pós alimentados durante o processo tem as seguintes vantagens:

- Permite variar a altura do revestimento, durante o processo, pela variação do caudal mássico de pós;
- É mais adequado para realizar deposições adjacente, para obter uma área de revestimento superior;
- Permite revestir áreas de geometria complexa (desde que o sistema de movimentação e controlo o permita)
- Permite economizar os desperdícios do material de adição.

A alimentação da liga de adição durante o processo de deposição pode ainda ser realizada com um sistema de alimentação coaxial (Figura 4.10 a)) ou lateral (Figura 4.10 b)). Embora a configuração de adição de pós coaxial tenha vantagens sobre o lateral, com por exemplo, permite realizar deposições em qualquer direção e permite uma maior eficiência de deposição, optou-se por implementar a configuração lateral por ser uma configuração mais económica e porque, segundos os investigadores do CeFEMA, permite obter os resultados de deposição pretendidos.

A Figura 4.10 apresenta os tipos de configurações possíveis para realizar a alimentação de material durante o processo de deposição, a configuração coaxial (Figura 4.10 a)) e configuração lateral (Figura 4.10 b)).



**Figura 4.10 – Configurações possíveis para a alimentação de pó [Adaptado de (Toyserkani et al., 2005)]**  
 a) configuração coaxial, b) configuração lateral

Na configuração inicial foi utilizada uma lente de convergência com uma distância focal de 150 mm. Assim, foi necessário utilizar um bocal de adição com comprimento suficiente que permitisse efetuar a adição de material abaixo do foco do laser, como é referido na literatura e como é ilustrado na Figura 4.10 b). Foi utilizado o bocal ilustrado na Figura 4.11, que tem um comprimento de aproximadamente 200 mm e um furo com aproximadamente 1,2 mm. Com esta relação entre o comprimento e o diâmetro do furo, a divergência do fluxo de pó na saída do bocal é minimizada, permitindo aumentar o rendimento de deposição com este tipo de configuração de adição lateral. Este bocal é em cobre para que o calor irradiado pelo banho de fusão possa ser escoado da extremidade do bocal para a periferia, minimizando a deterioração deste componente.

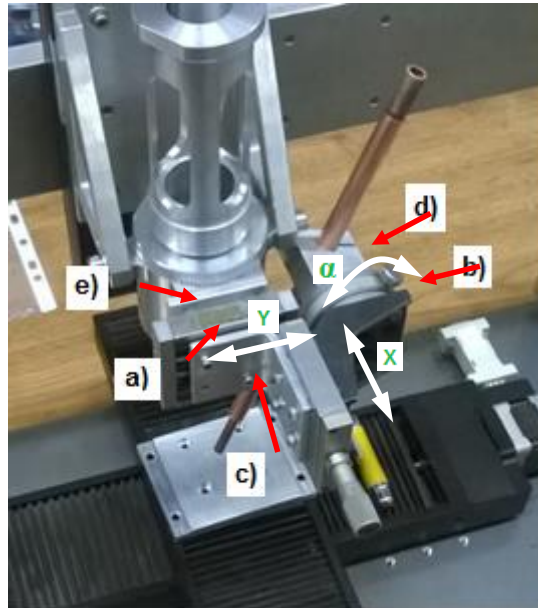
A Figura 4.11 ilustra o bocal lateral (*lateral nozzle*) utilizado para efetuar adição de pó ao banho de fusão.



**Figura 4.11 – Bocal utilizado para a adição de pó ao banho de fusão**

Para posicionar com precisão o fluxo do material de adição ao banho de fusão, foi proposta a implementação do sistema de posicionamento ilustrado Figura 4.12.

A Figura 4.12 apresenta o sistema de posicionamento do bocal de adição de pó.

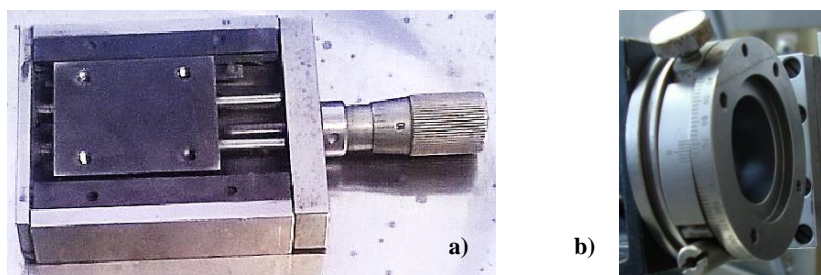


**Figura 4.12 – Sistema de posicionamento do bocal de adição de material**

a) guia manual de movimentação linear, b) guia manual de movimento angular, c) componente de fixação das guias, d) componente de fixação do bocal, e) espaçador X – posicionamento do bocal segundo o semieixo x, Y – posicionamento do bocal segundo o semieixo Y,  $\alpha$  – ângulo de incidência dos pós relativamente ao eixo do feixe do laser

Para fazer o posicionamento com precisão do bocal lateral ao banho de fusão foram utilizadas duas guias manuais de movimento linear (Figura 4.12 a)) e uma guia manual de movimento angular (Figura 4.12 b)), também ilustradas na Figura 4.13 a) e b), respetivamente.

A Figura 4.13 ilustra a guias manuais de movimento linear (Figura 4.13 a)) e a guia manual de movimento angular (Figura 4.13 b)).



**Figura 4.13 – Guias lineares e angular utilizadas para o posicionamento bocal**

a) guia manual de movimento linear; b) guia manual de movimento angular

Para acoplar ortogonalmente as guias manuais de movimento linear foi proposto o componente de fixação das guias (Figura 4.12 c)). Estas guias manuais lineares permitem posicionar o bocal lateral no plano XY, enquanto que a guia manual de movimento angular (Figura 4.14 b)) permite definir o ângulo de incidência do material de adição ao banho de fusão.

O componente de fixação do bocal lateral (Figura 4.12 d)) permite definir a distância entre a extremidade do bocal e do banho de fusão, distância representada por  $d$  na Figura 4.15.

Os componentes identificados na Figura 4.12 c) e na Figura 4.12 d) foram dimensionados de modo a que, quando ambas as guias lineares estejam a meio do seu curso, o eixo do bocal interseste o eixo do feixe de laser.

A Figura 4.15 ilustra o ajuste da distância  $d$  entre a extremidade do bocal ao banho de fusão, a distância  $F$  entre o foco do laser e a superfície do substrato e o ângulo de incidência do fluxo de pós  $\alpha$  ao banho ao banho de fusão.

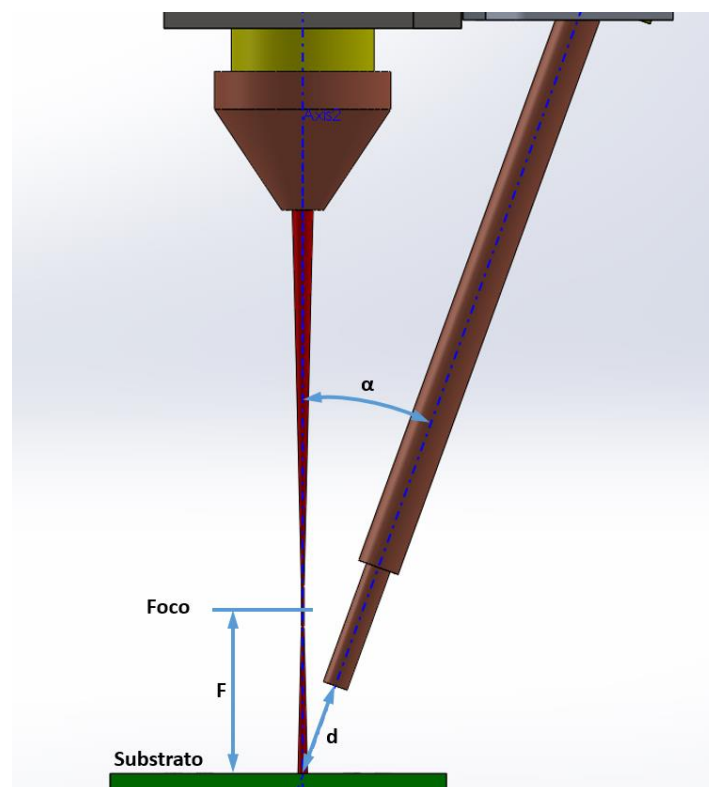


Figura 4.15 – Ajustes possíveis no sistema implementado

Como a distância entre os anéis iniciais do corpo inferior do laser (Figura 4.6 a)) é diferente da distância entre os furos de fixação das guias lineares (Figura 4.12 a)) foi proposto o espaçador identificado na Figura 4.12 e), que permite acoplar o sistema de posicionamento do bocal ao suporte inferior do laser.

A Figura 4.16 apresenta o equipamento remodelado no interior câmara de luvas, após os primeiros ensaios de deposição.

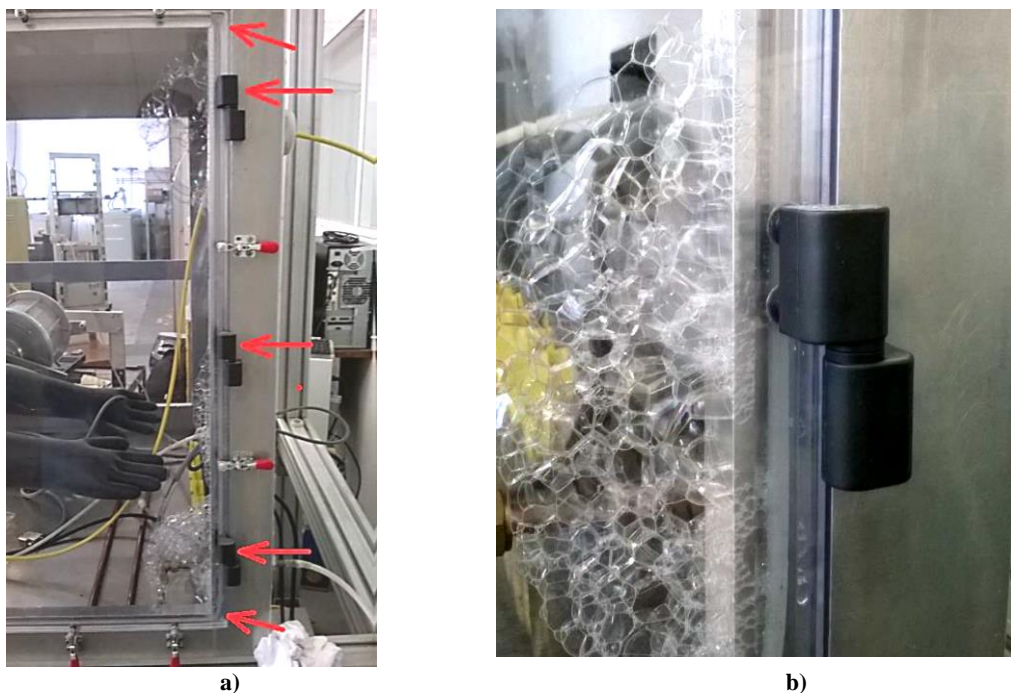


**Figura 4.16 – Equipamento no interior da câmara de luvas após os primeiros ensaios de deposição**

## **4.2. Medidas de garantia da estanquicidade da câmara de luvas**

Para minimizar os custos com a utilização de gás inerte, pretende-se que a câmara seja estanque de modo que a atmosfera inerte uma vez criada se mantenha no interior da câmara de luvas, evitando que a cada utilização do sistema seja necessário introduzir árgon. Para localizar as possíveis fugas na câmara de luvas, foi utilizada uma bomba de vácuo para criar uma diferença de pressão entre o interior e o exterior da câmara.

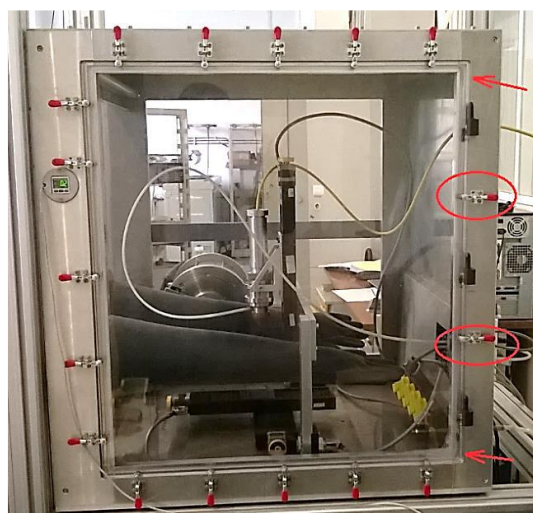
Na Figura 4.17 são identificadas algumas das fugas localizadas de gás inerte.



**Figura 4.17 – Ensaio de estanquicidade da câmara de luvas**

**a) localização das principais fugas da câmara de luvas; b) pormenor da fuga provocada pelo contacto da cabeça do parafuso de fixação da chapa de acrílico com o vedante**

A Figura 4.18 ilustra o reduzido número de grampos de fixação e as localizações onde se verificou que o acrílico não contactava com o vedante.

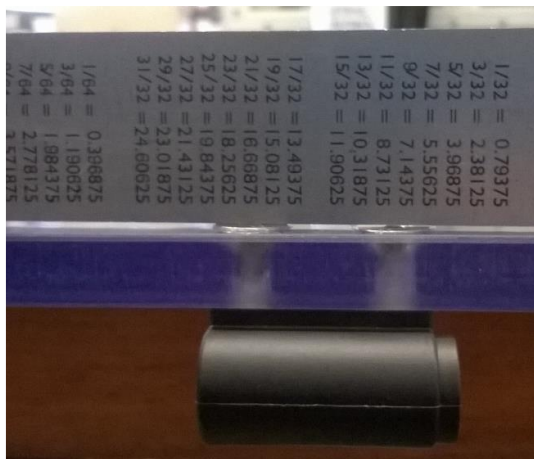


**Figura 4.18 – Número reduzido de grampos de fixação na chapa de acrílico**

As fugas identificadas na Figura 4.17 a) são provocadas, por um lado, pelo reduzido número de grampos de fixação, como ilustra a Figura 4.18, mas por outro lado, pela saliência da

cabeça dos parafusos, como ilustra a Figura 4.19, e pelo contacto da cabeça dos parafusos de fixação da chapa de acrílico com o vedante, como apresenta a Figura 4.17 b).

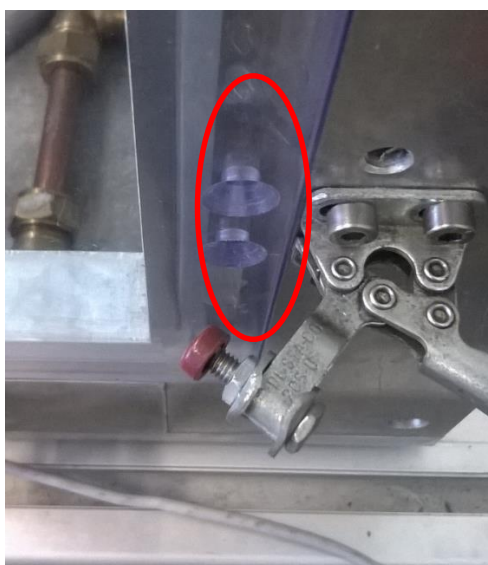
A Figura 4.19 ilustra a saliência entre a cabeça dos parafusos e superfície de acrílico.



**Figura 4.19 – Saliência da cabeça dos parafusos relativamente à superfície de acrílico**

Para solucionar as fugas localizadas foi sugerida a eliminação das dobradiças da chapa de acrílico, uma vez que esta não será aberta com frequência. Optou-se por montar a chapa de acrílico de modo a que a caixa para as cabeças dos parafusos ficasse do lado exterior. Assim, o menor diâmetro dos furos fica do lado interior. Com esta montagem, o vedante contacta somente com a superfície do acrílico, como ilustra a Figura 4.20.

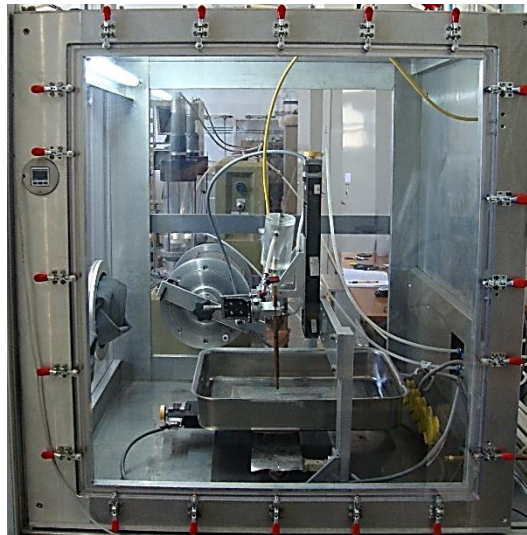
A Figura 4.20 ilustra a montagem do acrílico com o pormenor do contacto do vedante somente com a superfície de acrílico.



**Figura 4.20 – Montagem final da chapa de acrílico**

Através da Figura 4.18, constata-se que a uma das arestas da chapa de acrílico contem um menor número de grampos de fixação. Para solucionar as fugas localizadas foi proposta a implementação de grampos de fixação DES-TA-CO série 205-U (DES-TA-CO, 2015) nesta aresta, para garantir uma pressão uniforme da placa de acrílico sobre o vedante.

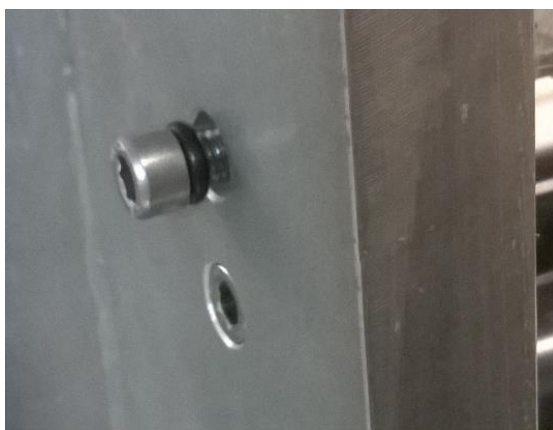
A Figura 4.21 apresenta a câmara de luvas após a implementação dos grampos de fixação.



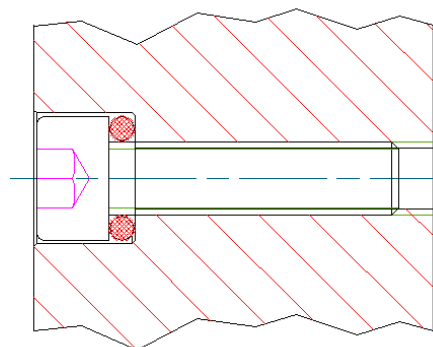
**Figura 4.21 – Fixação da chapa de acrílico**

Como foram removidas as dobradiças da chapa de acrílico, foi necessário roscar fusos existentes e implementar parafusos M5 com as juntas de retenção (o-ring DIN 3771 5,00×1,8).

A Figura 4.22 apresenta solução implementada para vedar os furos existentes.



a)



b)

**Figura 4.22 – Procedimento para vedar os furos existentes**

a) implementação dos parafusos M5 com O-ring; b) desenho da montagem dos parafusos para vedar os furos existentes na câmara de luvas

Após a implementação das medidas para garantir a estanquicidade da câmara de luvas, foi realizado um novo ensaio de estanquicidade com uma diferença de pressões de 5 kPa entre o interior e o exterior da câmara, durante 10 minutos. Verificou-se que a diferença de pressões se manteve constante durante este período de tempo.

### **4.3. Desenvolvimento de um sistema de controlo dos equipamentos do processo**

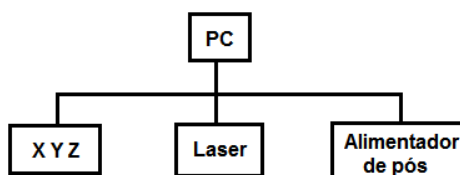
Como foi referido no subcapítulo 3.3, devido à falta de alguns ficheiros do programa de controlo anteriormente desenvolvido e devido inexistência da sua documentação, foi necessário desenvolver de raiz um programa de controlo para automatizar o processo de deposição assistida por laser.

O sistema de controlo deve permitir definir com precisão os principais parâmetros do processo, uma vez que, segundo Schneider, as variações mesmo ligeiras dos parâmetros do processo podem resultar em alterações significativas nas características do revestimento obtidas (Schneider, 1998).

#### **4.3.1. Estrutura de controlo dos equipamentos utilizados**

Foi proposto o desenvolvimento de um programa de controlo que permita controlar simultaneamente os principais equipamentos do processo, como as guias motorizadas de movimento linear (XYZ) da OWIS (Figura 3.1 b)), o laser IPG YLR (Figura 3.1 a)) e o alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C (Figura 3.2).

A Figura 4.23 ilustra a estrutura de controlo dos equipamentos utilizados.



**Figura 4.23 – Estrutura de controlo do processo de revestimento por laser**

O laser IPG YLR 200 AC permite ser controlado remotamente através do protocolo de comunicação RS-232, através do envio de instruções de comando especificadas pelo fabricante

(Anexo 1), sendo as guias de movimento linear controladas pela placa de controlo SM30 da OWIS através das funções de controlo definidas pelo fabricante (Anexo 2).

O alimentador de pós permite ser controlado remotamente através de conector de controlo remoto (Figura 4.24). Este equipamento é constituído por dois contentores, onde podem ser introduzidas duas ligas de revestimento diferentes, A e B. Durante o processo, a liga de revestimento obtida pode ser alterada pela variação do caudal mássico de A e de B.

A Figura 4.24 ilustra o conector do alimentador de pós que permite o seu controlo remoto.



Figura 4.24 – Conector do alimentador de pós que permite o seu controlo remoto

Para controlar o alimentador de pós através do computador foi desenvolvido um controlador constituído por um microcontrolador Arduino Nano.

A Figura 4.25 apresenta o princípio de funcionamento do controlador desenvolvido para o alimentador de pós.

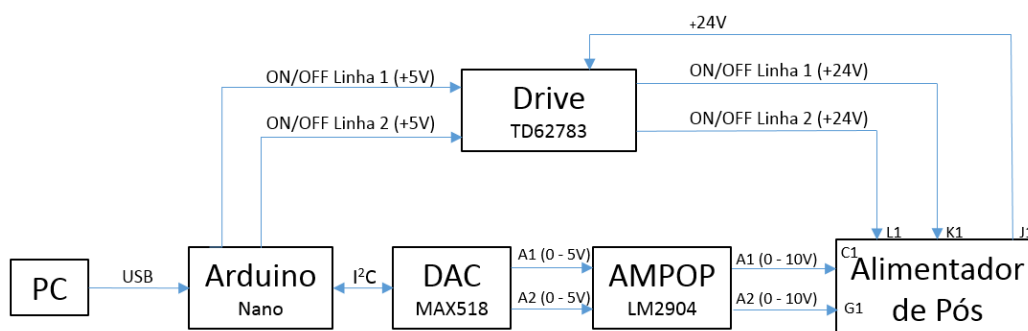


Figura 4.25 – Esquema do controlador do alimentador de pós

Este controlador recebe as instruções de comando provenientes do computador para ligar/desligar a linha 1 e/ou linha 2 do alimentador de pós, através dos pinos K1 e L1 do conector apresentado na Figura 4.24. Este controlador recebe ainda a informação do caudal mássico, que a converte num sinal analógico de 0 a 10V através de um conversor digital analógico (DAC), esquematizado na Figura 4.25.

A Figura 4.26 ilustra o esquema de controlo do alimentador de pós.

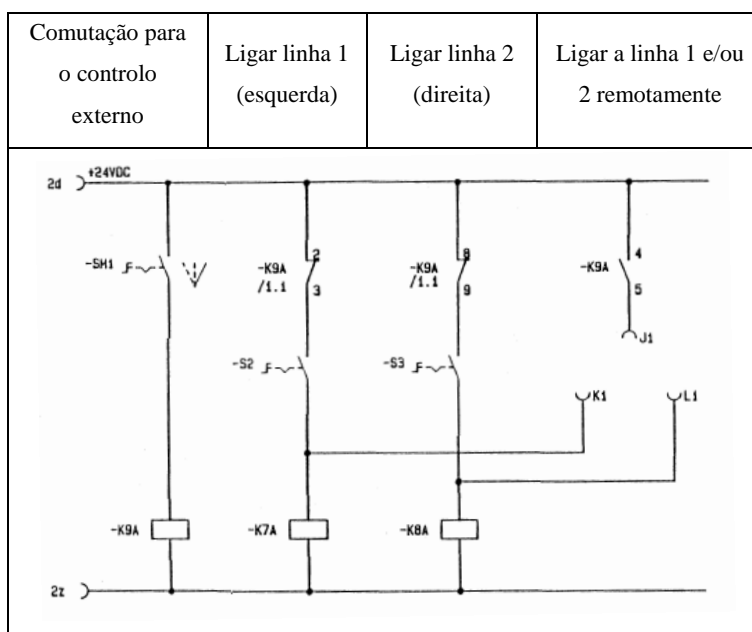


Figura 4.26 – Esquema de controlo do alimentador de pós

Na figura anterior a chave SM1 permite que alimentador de pós seja controlado remotamente através do conector apresentado na Figura 4.24. Como esquematiza a figura anterior, a bobina do relé K9 quando alimentada abre os contactos 2-3 e 8-9 e fecha os contactos 4-5. Assim o pino J1 do conector (Figura 4.24) alimenta o *Drive* esquematizado na Figura 4.25 e permite ao controlador do alimentador de pós (Figura 4.25) ligar as linhas 1 e/ou 2 do alimentador de pós através dos pinos K1 e L1 identificados na Figura 4.26.

A bobina do relé K9 quando alimentada fecha também os contactos 10-11, que alimentam as bobinas dos relés K10 e K11, ilustradas na Figura 4.27. Este relés K10 e K11 permitem que a rotação dos disco da linha 1 e linha 2 do alimentador de pós sejam controladas remotamente.

A Figura 4.27 ilustra o esquema para o controlo remoto da rotação do disco 1 e 2.

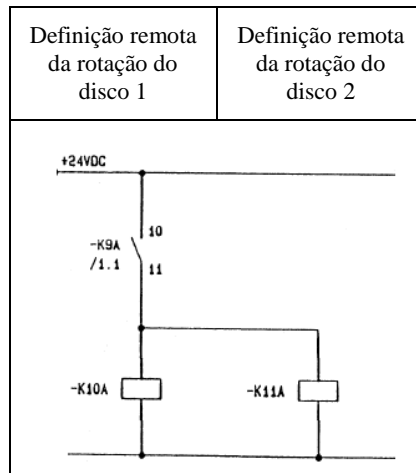


Figura 4.27 – Esquema para o controlo remoto da rotação do disco 1 e 2

A bobina do relé K10 (Figura 4.27) quando alimentada abre os contactos 10-11 e fecha os contactos 2-3 assinalados na Figura 4.28. Assim o sinal analógico que define a rotação do disco 1 deixa de ser definido pelo potenciómetro e passa a ser definido pelos pinos C1 e D1 (D1=0V) (Figura 4.28), sinal analógico proveniente do controlador do alimentador de pós (Figura 4.25).

A Figura 4.28 ilustra o esquema de controlo local/remoto da rotação do disco 1

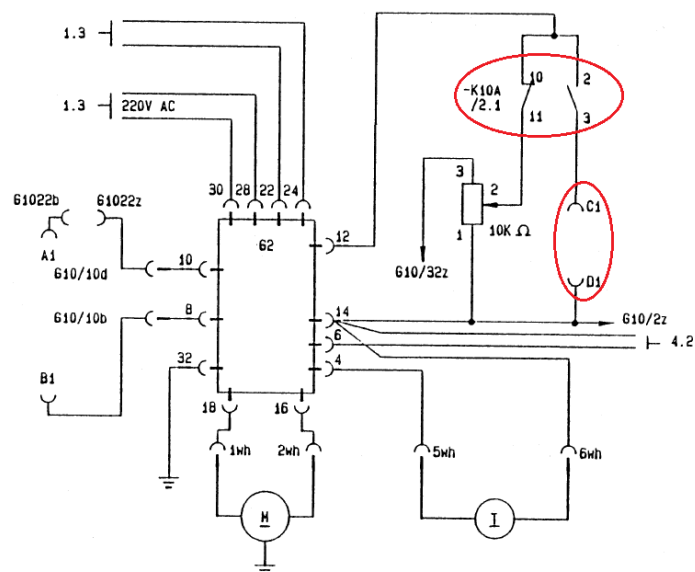
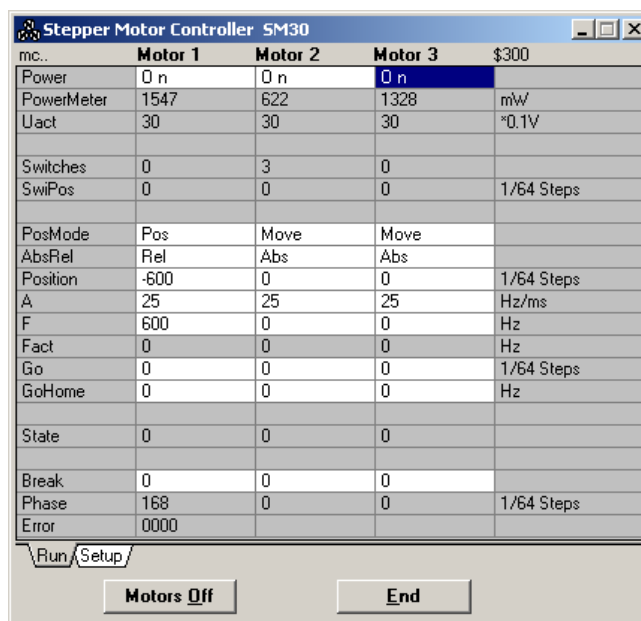


Figura 4.28 – Esquema de controlo local/remoto da rotação do disco 1 do alimentador de pós

### 4.3.2. Aplicação informática para o controlo do processo

A aplicação informática de controlo das mesas lineares X, Y e Z, fornecida pelo fabricante OWIS, ilustrada na Figura 4.29, não se adaptava as necessidades pretendidas, uma vez esta não tinha as funcionalidades de controlar outros sistemas, como o laser e o alimentador de pós.

A Figura 4.29 ilustra a aplicação informática fornecida pelo fabricante para o controlo das mesas lineares X, Y e Z.



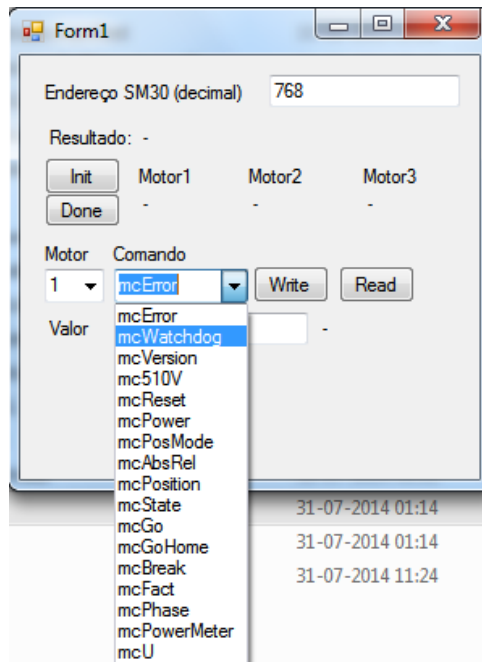
mc.	Motor 1	Motor 2	Motor 3	\$300
Power	0 n	0 n	0 n	
PowerMeter	1547	622	1328	mW
Uact	30	30	30	*0.1V
Switches	0	3	0	
SwiPos	0	0	0	1/64 Steps
PosMode	Pos	Move	Move	
AbsRel	Rel	Abs	Abs	
Position	-600	0	0	1/64 Steps
A	25	25	25	Hz/ms
F	600	0	0	Hz
Fact	0	0	0	Hz
Go	0	0	0	1/64 Steps
GoHome	0	0	0	Hz
State	0	0	0	
Break	0	0	0	
Phase	168	0	0	1/64 Steps
Error	0000			

Figura 4.29 – Aplicação informática da OWIS para o controlo dos eixos X, Y e Z

Foi sugerido desenvolver uma nova aplicação informática para o controlo do processo na linguagem de programação C Sharp, ou C#, desenvolvida pela Microsoft. A ferramenta de desenvolvimento da Microsoft, Microsoft Visual Studio Express, tem a vantagem de possuir uma licença gratuita (Microsoft, 2015), ao contrário do MATLAB e LABVIEW, e por conter uma vasta documentação de apoio *online*.

Foi desenvolvida uma versão inicial da aplicação de controlo das mesas lineares X, Y e Z, utilizando o *driver* do controlador SM30 e a listas de funções de controlo presentes no Anexo 2 e Anexo 3, fornecidas pelo mesmo fabricante. Esta primeira versão da aplicação de controlo, ilustrada na Figura 4.30, foi utilizada para testar a implementação das funções de controlo das mesas X, Y e Z.

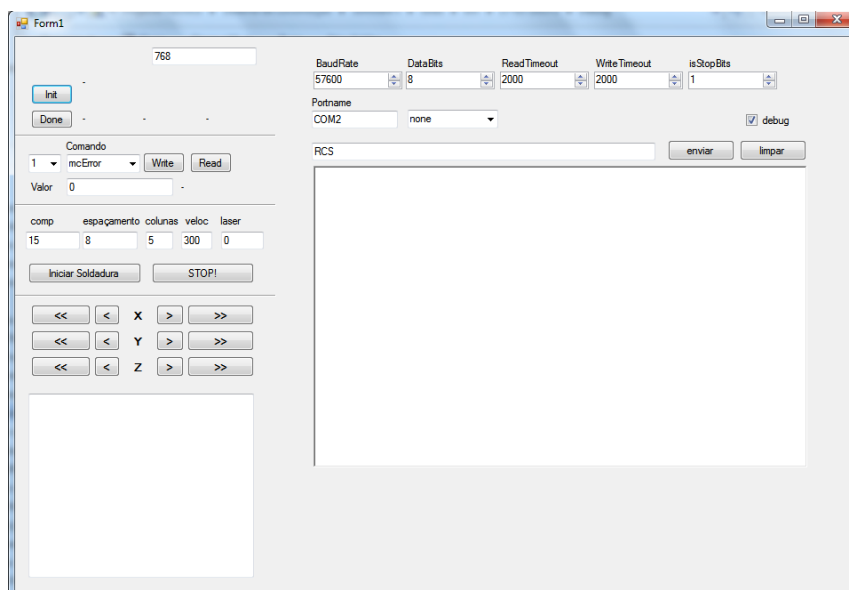
A Figura 4.30 apresenta a primeira versão da aplicação desenvolvida com a implementação das funções de controlo das mesas lineares X, Y e Z.



**Figura 4.30 – Primeira versão da aplicação de controle**

Até obter a versão final, apresentada na Figura 4.33, foram desenvolvidas diversas versões, como a da Figura 4.31. Na versão da Figura 4.31 foram desenvolvidas as rotinas para a deslocação manual e automática das mesas lineares X, Y e Z e foram implementadas as rotinas para o controle do laser.

A Figura 4.31 apresenta a implementação, na aplicação de controle, das rotinas de movimentação manual e automático dos eixos X, Y e Z e de controle do laser.



**Figura 4.31 – Rotinas de movimentação eixos X, Y e Z e as rotinas para o controle do laser**

Para que o *layout* da interface gráfica ficasse perceptível aos utilizadores do centro de investigação, este foi remodelado e foram organizadas as informações e os comandos da aplicação informática de controlo, como ilustra a Figura 4.32. Nesta versão começou por ser implementada a rotina que envia os comandos para o controlador do alimentador de pós.

A Figura 4.32 apresenta outra versão da aplicação informática, com a organização da informação, e a implementação dos controlos do alimentador de pós.

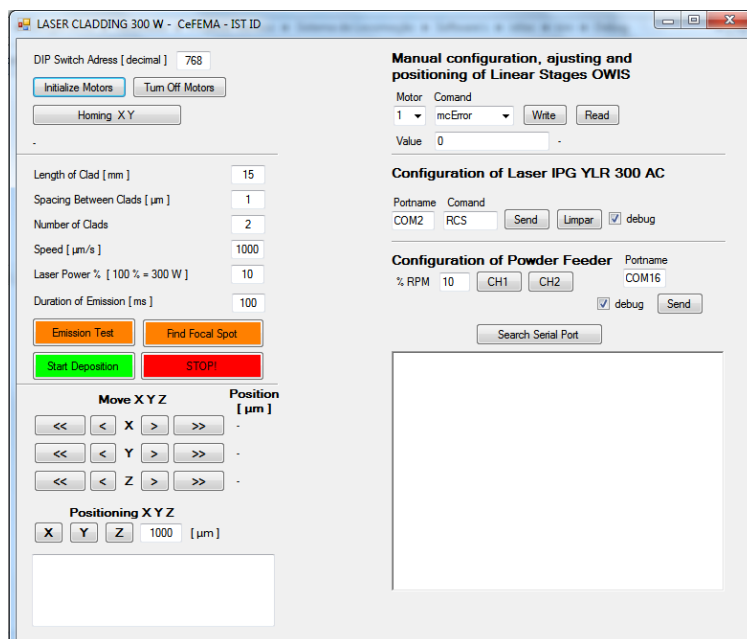


Figura 4.32 – Versão com o controlo do alimentador de pós

### 4.3.3. As principais rotinas de controlo implementadas

Neste subcapítulo são apresentadas as principais rotinas de controlo implementadas e uma descrição resumida de cada rotina ou comando de controlo implementados.

Na Figura 4.33 são identificadas as principais rotinas implementadas, para o controlo do processo.

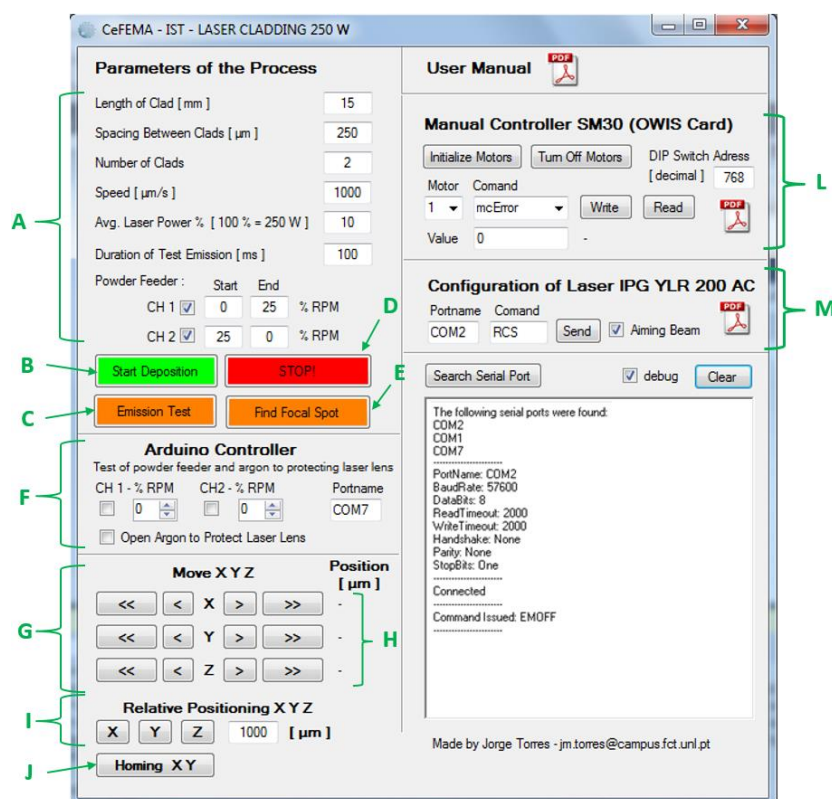


Figura 4.33 – Identificação das principais rotinas

A) principais parâmetros do processo; B) iniciar processo de deposição; C) teste de emissão de radiação; D) paragem de emergência; E) identificar o ponto focal; F) controlo do Arduino (alimentador de pós e a electroválvula de árgon para a proteção das lentes do laser); G) mover as mesas X, Y e Z; H) indicação da posição relativa das mesas X, Y e Z; I) deslocar mesas X, Y e Z uma distância relativa em  $\mu\text{m}$ ; J) procurar os limites das mesas X e Y; L) configuração manual da placa SM30 da OWIS; M) configuração manual do laser IPG YLR

### Parâmetros principais do processo

Os campos identificados pela região A na Figura 4.33 permitem introduzir os principais parâmetros do processo como o comprimento, o espaçamento, o número de deposições adjacentes, a velocidade de deposição, a potência do laser, a duração do teste de emissão de radiação e o caudal mássico de pós no início e no fim do processo, pela rotação inicial e final de cada linha do alimentador de pós. Apenas as linhas do alimentador de pós que forem seleccionadas, CH1 e/ou CH2, serão utilizadas durante o processo de deposição.

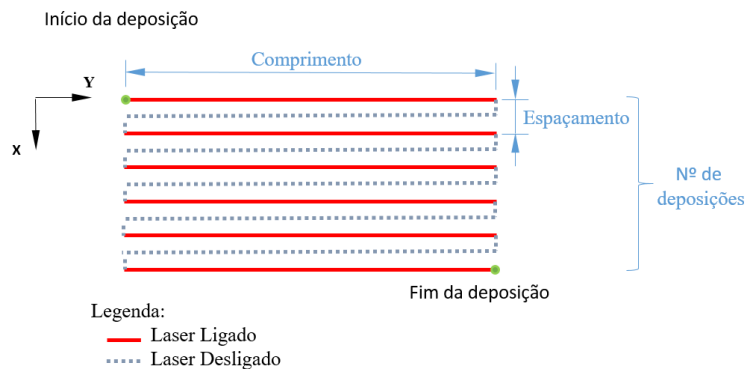
### Iniciar o processo de deposição

Na inicialização do processo de revestimento, através do botão identificado por B na Figura 4.33, é inicializada a rotina que controla os três equipamentos principais deste processo como as

guias de movimento lineares X, Y e Z, o laser IPG e o Arduino, que controla o alimentador de pós e a abertura da electroválvula de árgon para a proteção das lentes do laser.

As deposições são lineares e são produzidas sempre no mesmo sentido, com os parâmetros inseridos nos campos identificados pela região A na Figura 4.33, seguindo a trajetória ilustrada na Figura 4.34. Este tipo de trajetória permite que, entre cada deposição, a temperatura da periferia do banho de fusão seja aproximadamente constante ao longo da deposição. O excerto do código desenvolvido encontra-se no Anexo 4.

A Figura 4.34 apresenta o esboço da trajetória de deposição.



**Figura 4.34 – Trajetória de deposição**

Como ilustra o fluxograma na Figura 4.35, na inicialização desta rotina de deposição é feita a leitura dos parâmetros de deposição introduzidos na região da Figura 4.33. Em seguida é gerado um subprocesso designado por “*Thread de deposição*” de onde são enviadas as instruções de comando para o controlador do alimentador de pós, para o laser e para as guias de movimento linear. Após realizada uma deposição é desligado o laser, desliga-se o débito de pós e é fechada a electroválvula de árgon que protege a lente do laser. A amostra move-se no sentido oposto, como exemplifica a Figura 4.34 e efetua o deslocamento segundo o eixo X correspondente ao espaçamento especificado. Após serem produzidas as deposições adjacentes, especificadas na região A na Figura 4.33, é que esta rotina termina, como apresenta o fluxograma da Figura 4.35.

A Figura 4.35 apresenta o fluxograma simplificado da rotina de deposição.

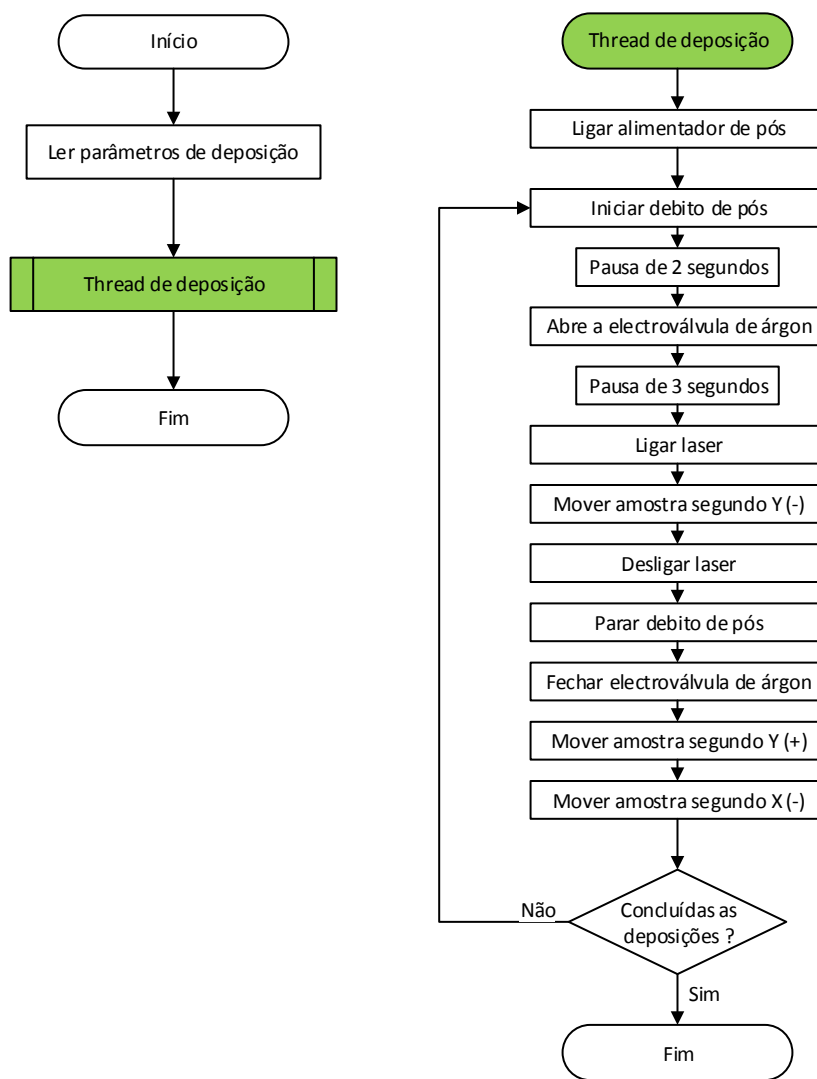


Figura 4.35 – Fluxograma simplificado da rotina de deposição

### Testar emissão de radiação

O botão identificado por C na Figura 4.33 permite realizar testes de emissão de radiação a com potência e a duração especificadas na região A da Figura 4.33. Como apresenta a Figura 4.36 antes do laser emitir radiação a aberta a electroválvula de árgon para prevenir a incidência de fumos ou partículas na lente do laser, e conseqüentemente evitar a sua deterioração irreversível. Após meio segundo depois é enviada a instrução de comando para que o laser emita radiação com a potência e a duração especificadas na região A da Figura 4.33. O excerto do código implementado nesta rotina encontra-se no Anexo 5.

A Figura 4.36 apresenta o fluxograma simplificado da rotina de testar a emissão de radiação.

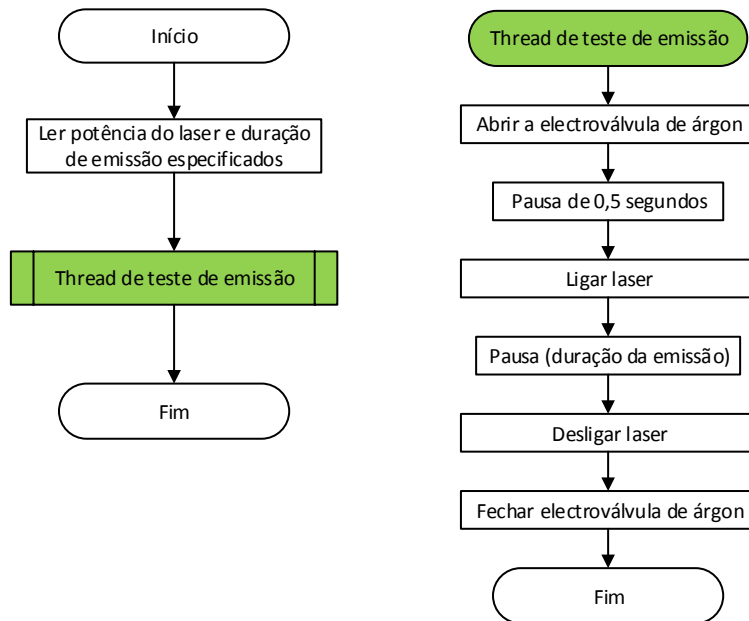


Figura 4.36 – Fluxograma simplificado da rotina de testar a emissão de radiação

### Paragem de emergência

No caso de ocorrer alguma anomalia durante o processo, foi inserido um botão, identificado por D na Figura 4.33, que permite desligar de imediato o laser, o alimentador de pós, parar os movimentos das mesas X, Y e Z e fechar a electroválvula do árgon. O excerto do código desta rotina é apresentado no Anexo 6.

A Figura 4.37 apresenta o fluxograma simplificado da rotina de paragem de emergência.

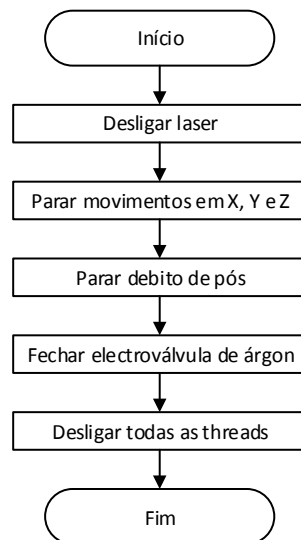


Figura 4.37 – Fluxograma simplificado da rotina de paragem de emergência

### Identificar o foco do feixe de laser

No processo de deposição assistida por laser é frequente colocar o foco do feixe de laser alguns milímetros acima do substrato, evitando que o banho de fusão seja gerado em profundidade devido á elevada densidade energética, também conhecido como *keyhole*, e consequentemente evitar uma diluição elevada entre o substrato e o material de adição.

A Figura 4.38 apresenta o perfil típico de um feixe de laser.

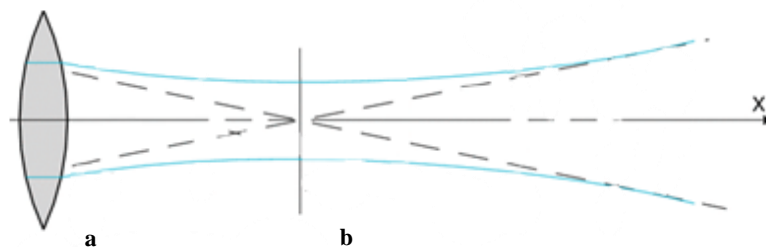


Figura 4.38 – Perfil convergente-divergente de um feixe de laser

a) lente de focagem; b) foco do feixe de laser

Como o perfil do feixe de laser é convergente-divergente (Figura 4.38), para localizar a cota do ponto focal foi implementado um botão identificado por E na Figura 4.33, que executa uma rotina que permite ao laser emitir radiação com duração e potência constantes a diferentes cotas, como ilustra a Figura 4.39 e o fluxograma da Figura 4.42. Após as 15 emissões o ciclo da rotina termina e é fechada a electroválvula de árgon do laser.

A Figura 4.39 ilustra as cotas das diversas emissões de radiação, a fim de localizar o ponto focal do feixe de laser.

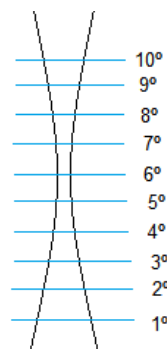


Figura 4.39 – Exemplificação das emissões com o substrato a diferentes cotas

A Figura 4.40 apresenta o resultado das diversas emissões a diferentes cotas.

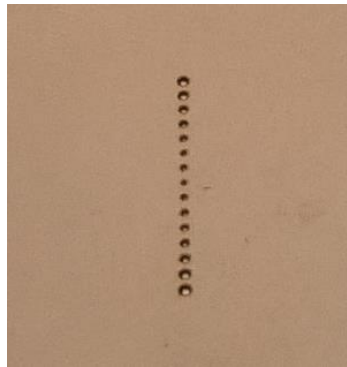


Figura 4.40 – Resultado da execução da rotina de identificação do foco do feixe de laser

Como a cota de cada emissão é registada na interface, como ilustra a Figura 4.41, através da comparação do diâmetro dos furos gerados na (Figura 4.40) assim é possível identificar a cota do foco do feixe de laser. Após identificada a cota Z do feixe de laser, registada na Figura 4.41 e que corresponde ao furo de menor diâmetro, basta movimentar o eixo vertical a distância Z. O excerto do código desta rotina encontra-se no Anexo 7.

A Figura 4.41 apresenta o registo das cotas das diversas emissões realizadas.

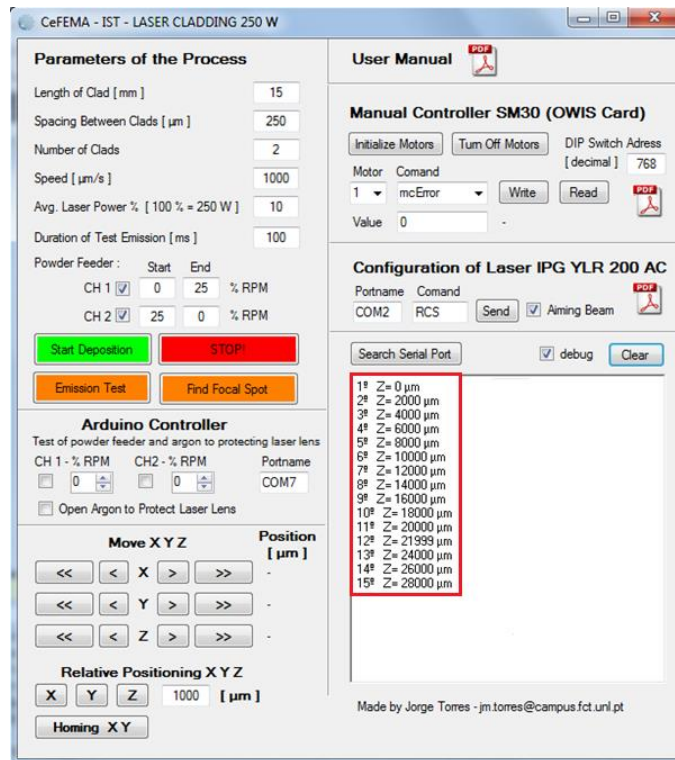


Figura 4.41 – Registo das cotas para cada emissão de radiação

A Figura 4.42 apresenta o fluxograma simplificado da rotina para identificar o foco do feixe de laser.

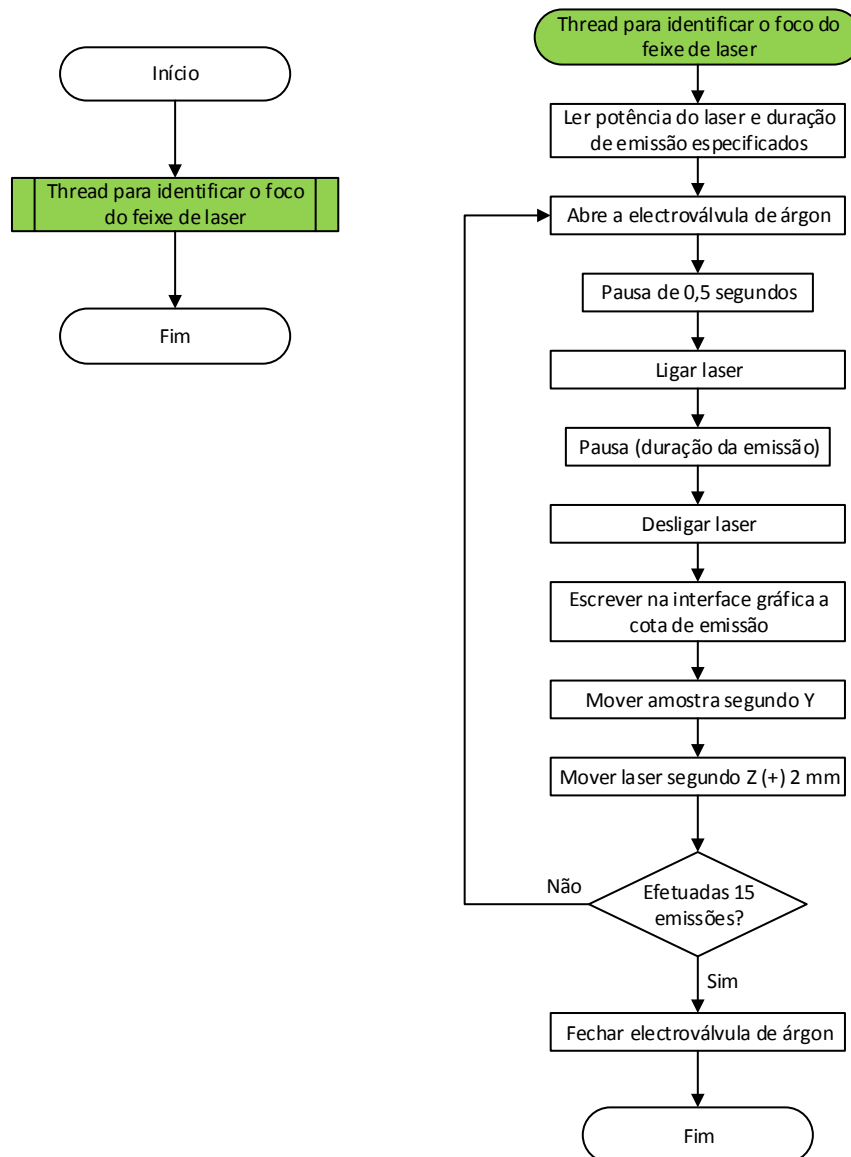


Figura 4.42 – Fluxograma simplificado da rotina para identificar o foco do feixe de laser

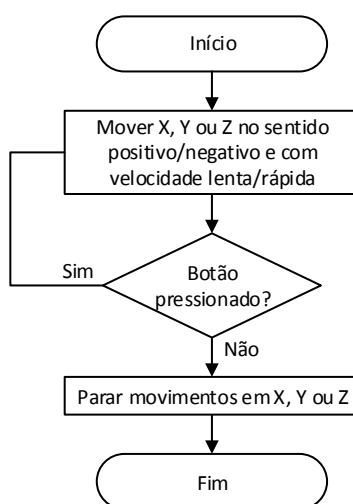
### Controlo do Arduino

A região identificada por F na Figura 4.33 permite enviar instruções de comandos para o Arduino por USB. Este microcontrolador controla o ligar/desligar do alimentador de pó, o caudal mássico de pó, pela rotação dos discos de cada linha do alimentador e a abertura da electroválvula de árgon para proteção da lente de focagem do feixe do laser. O excerto do código para o envio e receção dos dados encontra-se no Anexo 8 e Anexo 9

### **Mover as guias X, Y e Z**

Para facilitar a movimentação das mesas das guias X, Y e Z foram implementados os botões identificados na região G na Figura 4.33. Estes botões permitem movimentar cada mesa com duas velocidades nos dois sentidos, com 1 mm/s e 2,5 mm/s. No Anexo 10 é apresentado o excerto do código desta rotina.

A Figura 4.43 apresenta o fluxograma da rotina de move as guias X, Y ou Z no sentido positivo/negativo com a velocidade de deslocação escolhida.



**Figura 4.43 – Fluxograma simplificado da rotina de mover X, Y ou Z**

### **Indicar as posições relativas de X, Y e Z**

Para que a cada instante se conheça a posição relativa dos semieixos X, Y e Z, foi introduzida uma rotina, identificada por H na Figura 4.33, que periodicamente atualiza as suas posições relativas em  $\mu\text{m}$ . O excerto do código desta rotina está apresentado no Anexo 11

### **Deslocar os eixos X, Y e Z numa distância definida**

Durante o desenvolvimento da aplicação de controlo do processo foi verificada a necessidade de deslocar os eixos X, Y e Z numa distância específica. Devido a esta necessidade, foi implementada na interface gráfica, identificada por I na Figura 4.33, uma rotina que consoante o eixo selecionado, lê o valor em  $\mu\text{m}$  introduzido na caixa de texto e executa a deslocação do eixo selecionado no sentido positivo ou negativo, consoante o valor introduzido seja positivo ou negativo, respetivamente, como apresentado no fluxograma da Figura 4.44. O excerto do código encontra-se no Anexo 12.

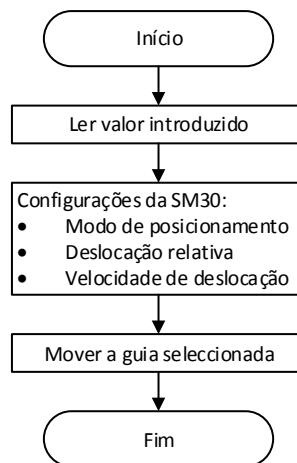


Figura 4.44 – Fluxograma simplificado da rotina de mover a guia X, Y ou Z numa distância em  $\mu\text{m}$

### **Procurar os limites das mesas X e Y (Homing)**

Como a placa de controlo SM30, inserida na *motherboard*, desconhece as posições absolutas e/ou relativas dos semieixos X, Y e Z quando o computador é ligado, foi implementada uma rotina designada por *Homing X Y*, identificada por J na Figura 4.33, que executa uma função definida pelo fabricante OWIS, que permite localizar os limites das guias X e Y. Após a localização dos limites, automaticamente as mesas das guias lineares são colocadas a meio do seu curso e são definidas as posições relativas de zero para as coordenadas de X e Y, como apresenta o fluxograma na Figura 4.45. As mesas das guias X e Y são colocadas a meio do seu curso de modo a que as deposições possam ser inicializadas a partir desta posição, que corresponde à posição absoluta  $X = 76\text{mm}$  e  $Y = 76\text{mm}$ . No Anexo 13 é apresentado um excerto do código desenvolvido para esta rotina.

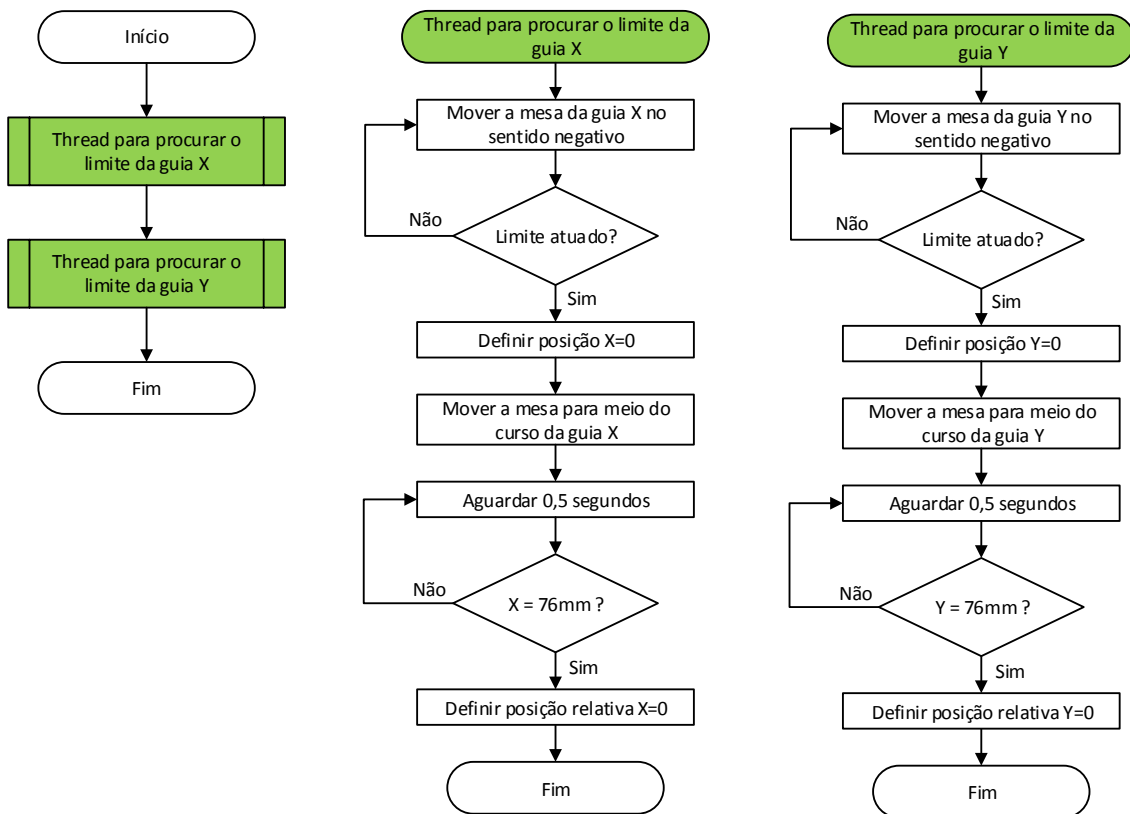


Figura 4.45 – Fluxograma simplificado da rotina de procurar os limites das guias X e Y

### Controlo manual da placa SM30 da OWIS

Para que todas as funções definidas pelo fabricante fiquem disponíveis nesta aplicação optou-se por as manter, como é identificado na região L da Figura 4.33. Assim, em caso de necessidade, é possível alterar as configurações pré-definidas. Além das funções de controlo disponíveis, foram introduzidos dois botões que permitem ligar e desligar os motores bipolares das mesas lineares X, Y e Z. O excerto do código encontra-se no Anexo 14 e Anexo 15.

### Configuração manual do laser IPG YLR 200 AC

Para permitir a configuração manual do laser, os campos de configuração manual foram mantidos na última versão, como identificado por M na Figura 4.33. Estes campos além de permitirem enviar manualmente os comandos de configuração e controlo do laser, listados no Anexo 1, permitem ligar/desligar o apontador do laser, *Aiming beam*, que facilita o posicionamento do bocal de adição de pós. O excerto do código desenvolvido encontra-se no Anexo 11.

# 5

## Validação Experimental do Sistema Remodelado e Discussão dos Resultados

De modo a testar o equipamento remodelado e automatizado, procedeu-se à realização de diversos ensaios de deposição.

Para os ensaios de deposição optou-se por utilizar titânio (comercialmente puro) como material de base e a liga de Ti52Ta como material de adição. As ligas de titânio-tântalo são ligas biocompatíveis e estão a ser atualmente estudadas para aplicações da indústria ortopédica, uma vez que não contêm elementos tóxicos como alumínio e vanádio presentes na liga Ti-6Al-4V, liga que geralmente é utilizada nos componentes da indústria ortopédicas.

As propriedades mecânicas de diversas composições da liga Ti<sub>x</sub>Ta foram já estudadas por Teixeira, que identificou um módulo de Young de 32 GPa na liga Ti52Ta, contudo este valor próximo módulo de Young do osso humano, necessitava de deveria ser confirmado.

A liga utilizada contém pós de titânio, comercialmente puro, com uma pureza de 99,2 % e uma granulometria compreendida entre 45-75 µm e pós de tântalo com uma pureza de 99,5 % e uma granulometria compreendida entre 20-70 µm. A liga Ti52Ta, já preparada, permaneceu dentro da estufa Memmert (Figura 5.1 a)), durante o intervalo entre os testes de deposição e o início das deposições (aproximadamente um mês de intervalo), a uma temperatura de 100 °C. Antes de serem utilizados os pós, estes foram misturados pela misturadora Turbula (Figura 5.1 b)) durante 45 minutos, duração utilizada por Teixeira nos ensaios semelhantes (Teixeira, 2012).

A Figura 5.1 ilustra os equipamentos utilizados para a preparação da liga de revestimento.



a)



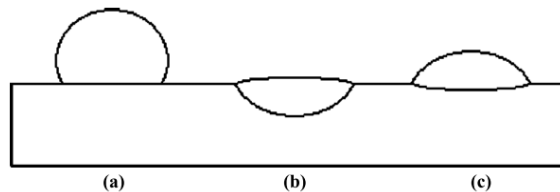
b)

**Figura 5.1 – Equipamento utilizados para a preparação dos pós de revestimento**

a) estufa de secagem dos pós; b) misturador de pós

Antes de iniciar as deposições desta liga, foram realizados alguns ensaios com o objetivo de encontrar a gama de parâmetros do processo que permitisse obter os resultados de deposição razoáveis. Nos ensaios de deposição foram mantidos constantes diversos parâmetros como a potência do laser,  $P$ , a distância do substrato ao foco do feixe de laser,  $F$ , a distância da extremidade do bocal ao banho de fusão,  $d$ , e o comprimento do revestimento,  $C$ , tendo sido variados somente os parâmetros da velocidade de deposição e do caudal mássico. Para todas as deposições foi utilizado ângulo de incidência,  $\alpha$ , (Figura 4.15) de aproximadamente  $70^\circ$ , ângulo utilizado por Meacock e Vilar numa configuração idêntica (Meacock & Vilar, 2008).

Segundo Costa & Vilar a geometria do revestimento produzido deve ser idêntico ao da Figura 5.2 c) (Costa & Vilar, 2009).



**Figura 5.2 – Formas possíveis da secção transversal das deposições obtidas [Adaptado de (Costa & Vilar, 2009)]**

Os resultados de deposição foram analisados visualmente e através de uma lupa para identificar a gama de parâmetros que permite produzir revestimentos idênticos aos da Figura 5.2

c). Foi constatado que entre os vários parâmetros do processo, os parâmetros que influenciavam significativamente a geometria das deposições eram a velocidade de deposição e o caudal mássico de pós da liga de revestimento.

Para estudar a influência da variação destes dois parâmetros na geometria do revestimento, optou-se por realizar deposições com três velocidades diferentes E1 - 5 mm/s, E2 - 7,5 mm/s e E3 - 10 mm/s. Para cada velocidade de deposição foram realizadas quatro deposições, com quatro caudais mássicos diferentes.

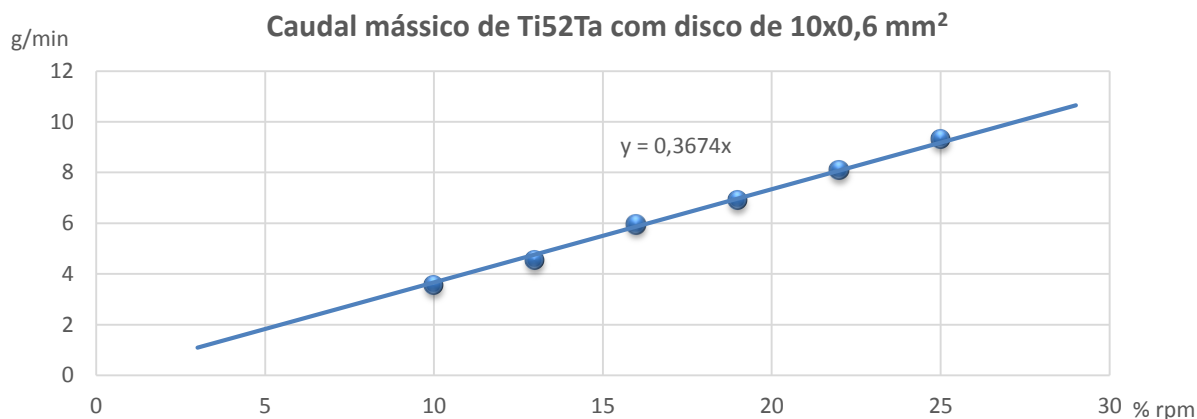
A Tabela 5.1 apresenta os valores da rotação dos discos do alimentador de pós, em percentagem da sua rotação máxima, introduzidos no programa de controlo, que definem o caudal de alimentação de pós.

**Tabela 5.1 – Gama de valores de rotação do disco do alimentador de pós escolhidos.**

Ti52Ta	
% RPM definida do programa de controlo	10
	13
	16
	19
	22
	25

Antes de iniciar a deposição foi realizada a calibração do alimentador de pós, com o objetivo de conhecer a relação entre a rotação dos discos do alimentador de pós e o caudal mássico de material injetado para o banho de fusão, em g/min, e verificar se esta relação é linear.

A Figura 5.3 apresenta a relação entre a percentagem da rotação máxima dos discos do alimentador de pós com o caudal mássico de material injetado.



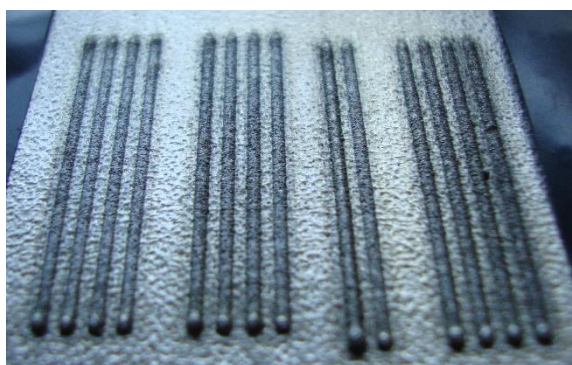
**Figura 5.3 – Calibração do alimentador de pó para a liga Ti52Ta**

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros de deposições escolhidos, onde o cauda mássico é representado por  $\dot{m}$ , a velocidade de deposição por  $\vartheta$ , a distância entre o substrato e o foco do feixe de laser por  $F$  (Figura 4.15), o comprimento do revestimento por  $C$  e a potência do laser por  $P$ .

**Tabela 5.2 – Parâmetros de deposição escolhidos**

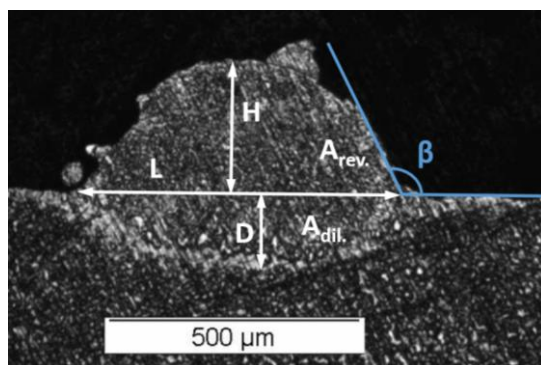
Deposição	E1				E2				E3			
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
$\dot{m}$ [g/min]	3,58	4,54	5,95	6,92	4,54	5,95	6,92	8,11	4,54	5,95	6,92	9,34
$\vartheta$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	5000				7500				10000			
$F$ [mm]	22											
$C$ [mm]	20											
$P$ [W]	245											

A Figura 5.4 ilustra as deposições produzidas com os parâmetros de deposição apresentados na Tabela 5.2.



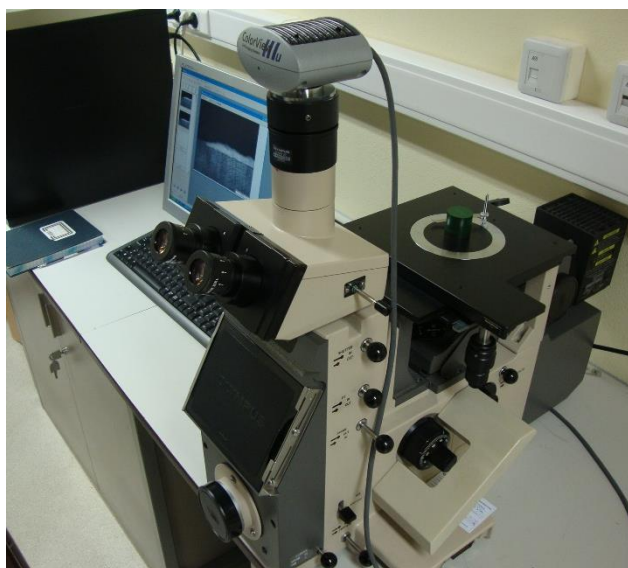
**Figura 5.4 – Resultado de deposição da liga Ti52Ta em titânio comercialmente puro.**

As amostras produzidas foram seccionadas transversalmente aproximadamente a meio do comprimento das deposições, foram embutidas em resina epóxica. As superfícies transversais foram lixadas e polidas para serem medidos os principais parâmetros das deposições produzidas, como a altura do revestimento,  $H$ , a profundidade de penetração do revestimento no substrato,  $D$ , o ângulo do revestimento,  $\beta$ , a área do revestimento produzido,  $A_{rev.}$ , e a área de diluição do material de adição no substrato,  $A_{dil.}$ , como identificado na Figura 5.5.



**Figura 5.5 – Principais parâmetros da geometria do revestimento produzido**  
**H** - altura do revestimento; **D** - profundidade de penetração do revestimento no substrato;  **$\beta$**  - ângulo do revestimento;  **$A_{rev.}$**  - área do revestimento produzido;  **$A_{dil.}$**  - área de diluição do material de adição no substrato

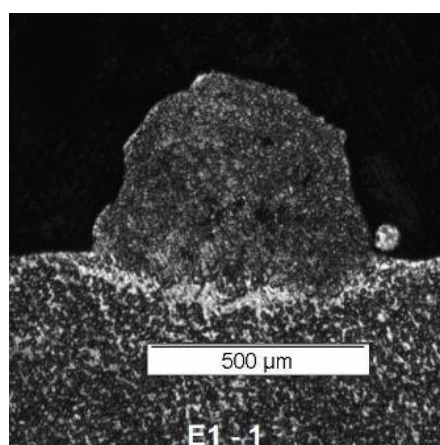
A Figura 5.6 apresenta o microscópio eletrônico OLYMPUS PMG 3, utilizado para obter as imagens das secções transversais.



**Figura 5.6 – Microscópio utilizado para obter as imagens das secções transversais das amostras**

As medições dos principais parâmetros da geometria transversal dos revestimentos, foram efetuadas com recurso ao *software* IMAGEJ.

A Figura 5.7 apresenta a secção transversal de um dos revestimentos produzidos.



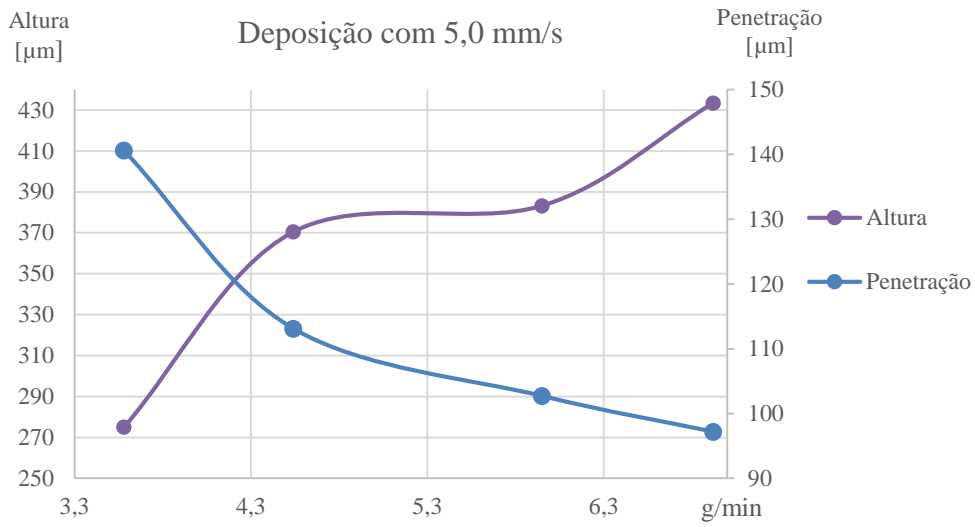
**Figura 5.7 – Secção transversal de um dos revestimentos produzidos**

Para cada parâmetro foram realizadas três medições, sendo feita a média aritmética dos três valores obtidos. A Tabela 5.3 apresenta a média aritmética dos principais parâmetros das geometrias obtidas.

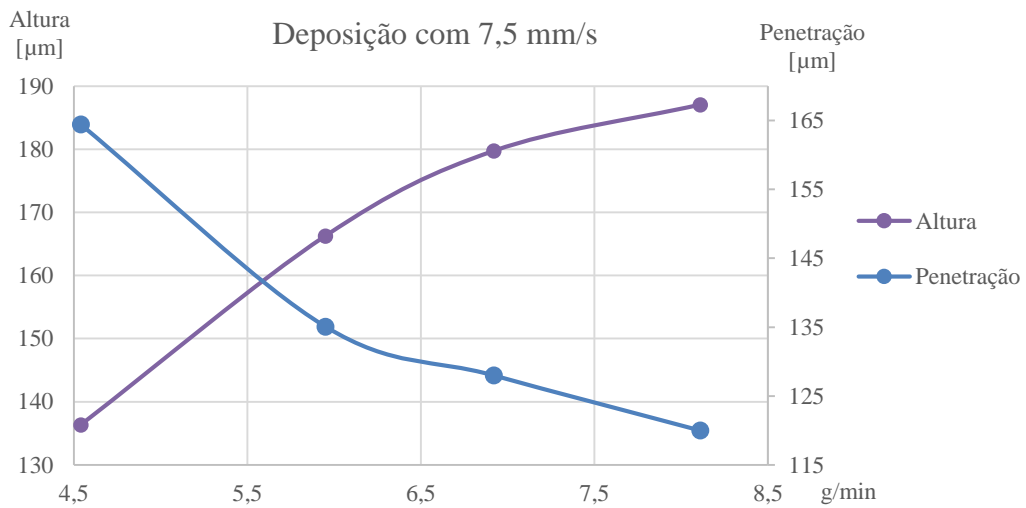
**Tabela 5.3 – Características da geometria das deposições produzidas**

	Caudal Mássico [g/min]	Penetração [μm]	Altura [μm]	Área do revestimento [μm <sup>2</sup> ]	Área total [μm <sup>2</sup> ]	Ângulo [°]	Diluição [%]	Eficiência [%]
E1 - 1	3,58	141	275	133.881	201.753	119	33,6%	12,16%
E1 - 2	4,54	113	370	173.764	235.431	108	26,2%	12,45%
E1 - 3	5,95	103	383	189.958	246.782	108	23,0%	10,38%
E1 - 4	6,92	97	433	210.365	257.709	107	18,4%	9,89%
E2 - 1	4,54	164	136	56.802	138.885	149	59,1%	6,10%
E2 - 2	5,95	135	166	71.091	150.218	147	52,7%	5,83%
E2 - 3	6,92	128	180	71.980	131.600	138	45,3%	5,07%
E2 - 4	8,11	120	187	79.564	148.941	126	46,6%	4,79%
E3 - 1	4,54	161	97	42.334	119.536	152	64,6%	6,06%
E3 - 2	5,95	157	100	30.521	110.198	156	72,3%	3,34%
E3 - 3	6,92	157	101	38.698	115.975	150	66,6%	3,64%

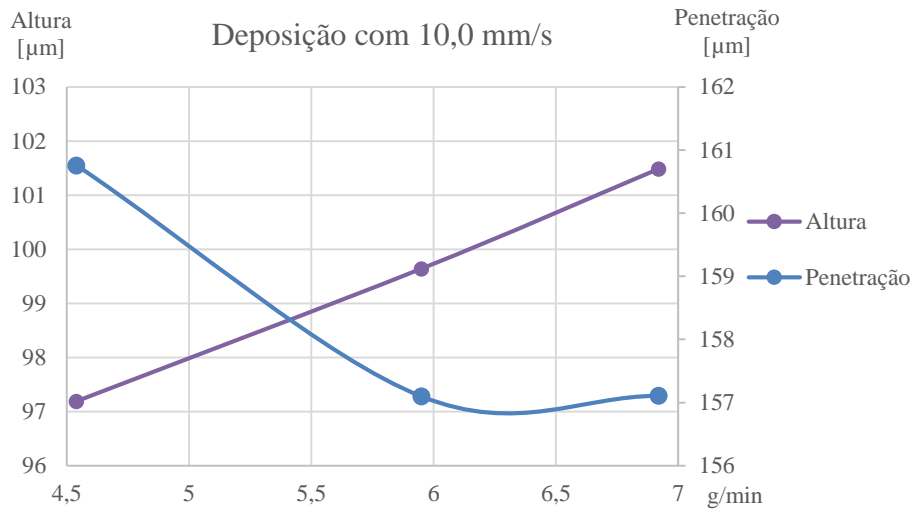
As figuras seguintes (Figura 5.8, Figura 5.9 e a Figura 5.10) apresentam a variação da profundidade de penetração e a altura do revestimento em função do caudal mássico de pós respetivamente para as respetivas velocidades de deposição de 5,0 mm/s, 7,5 mm/s e 10 mm/s.



**Figura 5.8 – Penetração e da altura do revestimento com  $\vartheta = 5,0$  mm/s**



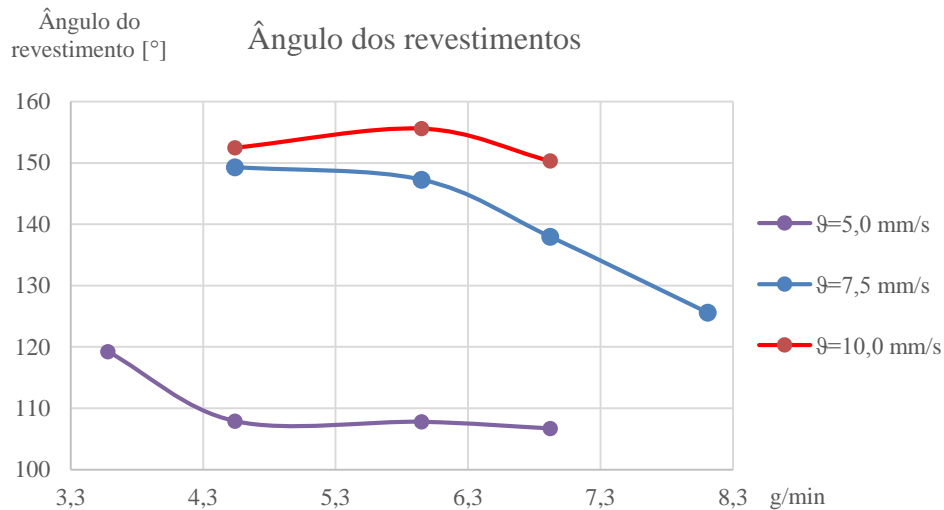
**Figura 5.9 – Penetração e da altura do revestimento com  $\vartheta = 7,5$  mm/s**



**Figura 5.10 – Penetração e da altura do revestimento com  $\vartheta = 10,0$  mm/s**

Pelos resultados apresentados anteriormente verifica-se que, a altura do revestimento aumenta com o aumento do caudal mássico, enquanto que a penetração do revestimento diminui com o aumento do caudal mássico. O aumento da altura do revestimento com o aumento do caudal mássico deve-se ao aumento da quantidade de material de adição disponível para a formação do revestimento por unidade de comprimento (Meacock & Vilar, 2008; Oliveira et al., 2005). A profundidade do revestimento reduz com o aumento do caudal mássico devido à maior quantidade de energia do feixe de laser que é absorvida e refletida pelas partículas de pós, reduzindo a quantidade de radiação do feixe laser que atravessa a nuvem de pós e incide na superfície do substrato, resultando numa menor área fundida do substrato.

A Figura 5.11 apresenta a variação do ângulo do revestimento com o substrato em função da variação do caudal mássico.



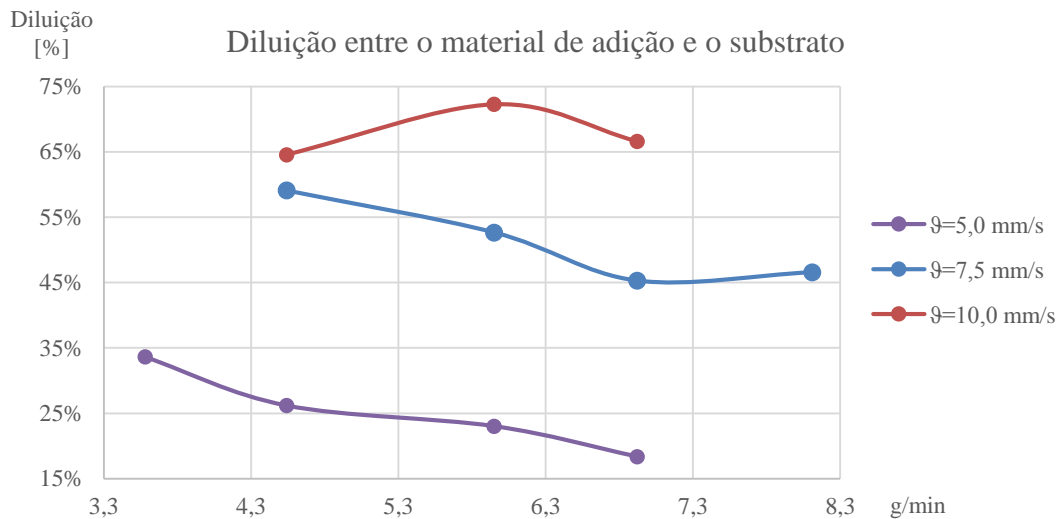
**Figura 5.11 – Ângulo do revestimento**

O ângulo do revestimento produzido,  $\beta$ , é um parâmetro importante uma vez que este influencia a porosidade criada nas deposições adjacentes, pelo que é necessário que este parâmetro seja grande de modo a evitar a criação de porosidade, sendo sugerido que este parâmetro deve ser superior a  $100^\circ$  (Oliveira et al., 2005).

Verifica-se pela Figura 5.11 que o ângulo do revestimento,  $\beta$ , tende a diminuir com o aumento do caudal mássico (exceto na velocidade de deposição de 10 mm/s), isto deve-se ao aumento da quantidade de material alimentado ao banho de fusão, por unidade de comprimento, mantendo a potência do laser e a velocidade de deposição constantes, resultando assim num aumento da área de revestimento,  $A_{rev,s}$ , devido ao aumento da altura do revestimento,  $A$ .

Por outro lado, o ângulo aumenta com o aumento da velocidade de deposição, como foi verificado por Oliveira, que identificou uma grande correlação do ângulo do revestimento,  $\beta$ , com  $\vartheta/\dot{m}$ , no entanto, os resultados foram obtidos com um sistema de alimentação coaxial de pós (Oliveira et al., 2005).

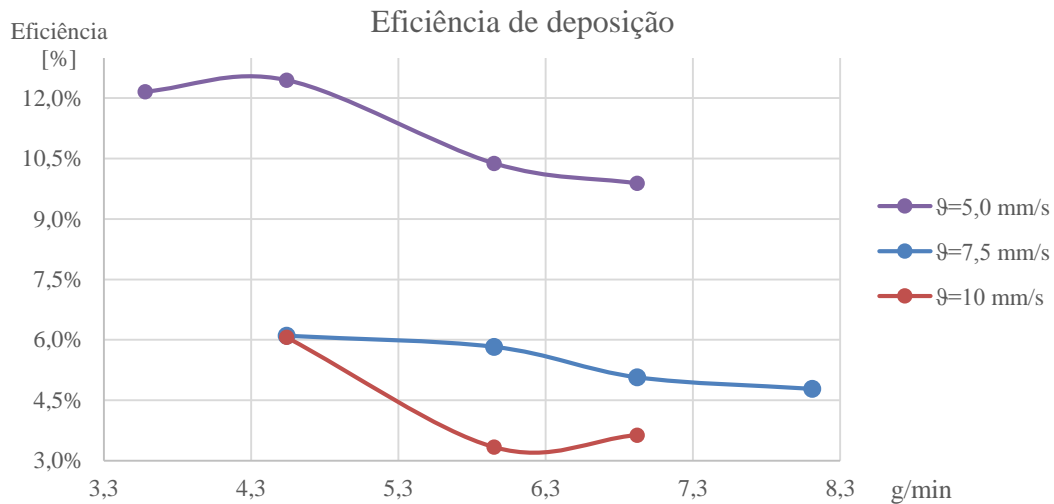
A Figura 5.12 apresenta a variação da diluição entre o material de adição e o substrato, em função do caudal mássico para as diferentes velocidades de deposição.



**Figura 5.12 – Diluição entre o material de adição e o substrato**

Os resultados de diluição apresentados na Figura 5.12, que representam a razão entre a área de diluição  $A_{dil.}$  sobre a área total  $A_{total} = A_{rev.} + A_{dil.}$ , sugerem que a diluição reduz com o aumento do caudal mássico e que aumenta com a velocidade de deposição (exceto na velocidade de deposição de 10 mm/s). Como foi referido anteriormente, o aumento do caudal mássico leva a que uma maior quantidade da energia do feixe de laser seja absorvida pelas partículas de pós, reduzindo a energia do feixe de laser que incide no substrato, reduzindo assim a dimensão do banho de fusão e conseqüentemente a diluição entre o material de adição e o substrato. Os resultados obtidos para a velocidade de deposição de 10 mm/s não seguem a tendência das deposições com as velocidades de 5,0 mm/s e 7,5 mm/s, contudo para se poder tirar conclusões seriam necessários mais dados para esta velocidade de deposição.

A Figura 5.13 apresenta a eficiência do processo de deposição assistida por laser para os parâmetros de deposição apresentados na Tabela 5.2.



**Figura 5.13 – Eficiência de deposição**

A eficiência do processo de deposição é determinada pela razão entre a quantidade de material adicionado sobre a quantidade do material de revestimento injetado para o banho de fusão. É um parâmetro a ter conta, uma vez que em geral são utilizadas ligas de adição com um elevado custo monetário.

Pela Figura 5.13 verifica-se que a eficiência de deposição tende a reduzir com o aumento do caudal mássico e com a velocidade de deposição, como foi constatado por Meacock & Vilar (Meacock & Vilar, 2008). A eficiência mais elevada, de aproximadamente 12,5%, foi obtida com uma velocidade de 5,0 mm/s e com um caudal mássico de 4,54 g/min da liga Ti52Ta.



## Conclusões e Trabalhos Futuros

A deposição de pós metálicos assistida por laser é um processo importante para a realização de revestimentos superficiais, melhorando as características superficiais, como a dureza, a resistência ao desgaste por atrito, a resistência à corrosão e à fadiga térmica dos componentes mecânicos sujeitos a condições adversas de trabalho por prolongados períodos de tempo. Este é um processo que permite obter zonas termicamente afetadas reduzidas devido à elevada densidade energética emitida pelo feixe de laser.

Devido às exigências mecânicas requeridas em diversos componentes mecânicos na indústria aeronáutica, naval, siderúrgica, mineira, dos moldes, em aplicações biomédicas, entre outras, torna-se importante o estudo e o desenvolvimento de novas ligas, que respondam às necessidades exigidas de durabilidade e de integridade dos componentes.

O trabalho realizado procurou responder aos objetivos propostos para o melhoramento do sistema de deposição assistida por laser, a sua automatização e a realização de ensaios com o fim de validação.

Relativamente aos resultados obtidos (Figura 5.8, Figura 5.9 e a Figura 5.10), constatou-se que a altura do revestimento aumenta com o aumento do caudal mássico, enquanto que a penetração do revestimento no substrato diminui com o aumento do caudal mássico. O ângulo do revestimento (Figura 5.11) tende a diminuir com o aumento do caudal mássico, devido ao aumento da quantidade de material fornecida ao banho de fusão, por unidade de comprimento, que resulta num aumento da área de revestimento, através do aumento da altura do revestimento.

Constatou-se ainda que a diluição (Figura 5.12) diminui com o aumento do caudal mássico. O aumento do caudal mássico leva a que uma maior quantidade da energia do feixe de laser seja absorvida pelo caudal mássico de pós adicionado. Por outro lado, a diluição aumenta com o aumento da velocidade de deposição.

Os resultados obtidos permitiram ainda concluir que a eficiência de deposição (Figura 5.13) tende a reduzir com o aumento do caudal mássico e com o aumento da velocidade de deposição, tendo sido obtida uma eficiência máxima de aproximadamente 12,5%, nos ensaios de deposição realizados. Além da eficiência ser afetada por estes parâmetros, constatou-se pelos ensaios de deposição que a eficiência de deposição é também afetada pela distância entre a extremidade do bocal ao banho de fusão  $d$  (Figura 4.15), pelo posicionamento do bocal de adição de pós ao banho de fusão, pela velocidade das partículas de pós, entre outros fatores. Devido à divergência do fluxo de pós na saída do bocal de adição, a área de incidência deste fluxo de pós aumenta com o aumento da distância  $d$  (Figura 4.15), o que leva à diminuição da eficiência de utilização de pós, uma vez que a área de incidência do feixe de laser na superfície da amostra é menor do que a área de incidência do fluxo de pós na superfície.

Os resultados de deposição realizados permitiram constatar que os parâmetros de deposição, em particular o caudal mássico de pós e a velocidade de deposição, devem ser muito bem controlados para que os resultados obtidos sejam satisfatórios. Assim, a automatização do processo é essencial para o sucesso deste processo de deposição assistida por laser. Este estudo permitiu evidenciar a necessidade do posicionamento, com precisão, do fluxo de adição de material ao banho de fusão, uma vez que o seu *setup* influencia significativamente o resultado obtido de deposição.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permite ao Laboratório de Laser do CeFEMA utilizar este sistema para a realização de estudos de ligas emergentes.

Em trabalhos futuros, este sistema pode ainda ser desenvolvido para ser aplicado na indústria nacional, por exemplo, na reparação de componentes danificados. Através da digitalização da superfície do componente mecânico danificado, convertendo-o num modelo tridimensional e comparando com o modelo original, as regiões danificadas podem ser automaticamente detetadas. Poderia ser vantajosa a definição automática da trajetória de deposição, à semelhança dos programas utilizados pelas impressoras de polímeros. Embora esta funcionalidade possa não ser relevante para o centro de investigação, a implementação desta funcionalidade pode contribuir para o desenvolvimento de setores da indústria nacional.



## Bibliografia

- Acker, K. V. et al. (2005). Influence of Tungsten Carbide Particle Size and Distribution on the Wear Resistance of Laser Clad WC/Ni Coatings. *Wear*, V.258, 2005, PP.194–202. DOI:10.1016/j.wear.2004.09.041.
- Bruck, G.J. (1987). High-Power Laser Beam Cladding. *Journal of Metals*, V.39, 1987, PP.10–13. DOI:10.1007/BF03259463.
- Camoletto, A. et al. (1991). Laser Hardening of Turbine Blades. *Materials and Manufacturing Processes*, V.6 (I.1, 1991), PP.53–65. DOI:10.1080/10426919108934735.
- Capello, E. et al. (2005). Repairing of Sintered Tools Using Laser Cladding by Wire. *Journal of Materials Processing Technology*, V.164, 2005, PP.990–1000. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.075.
- Che, L. et al. (2014). Laser Cladding Technology in the Repair of Shearer Picks. *Computer Modelling & New Technologies*, V.18 (I.12A, 2014), PP.563–565.
- Choi, J. & Mazumder, J. (1994). Non-Equilibrium Synthesis of Fe-Cr-C-W Alloy by Laser Cladding. *Journal of Materials Science*, V.29, 1994, PP.4460–4476. DOI:10.1007/BF00376268.
- Costa, L. & Vilar, R. (2009). Laser Powder Deposition. *Rapid Prototyping Journal*, V.15 (I.4, 2009), PP.264–279. DOI:10.1108/13552540910979785.
- DES-TA-CO (2015). 205-U. Disponível em: <http://www.destaco.com/assets/docs/en/ds/205.pdf> [Acedido em: 12/05/2015].
- Dianbing, C. (2014). Experimental Research and Engineering Application of Laser Cladding Repairs. In *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering*. PP.1055–1059. Shenyang, China, 2014.
- Farnia, A. et al. (2012). Effect of Ta on the Microstructure and Hardness of Stellite 6 Coating Deposited by Low Power Pulse Laser Treatments. *Surface and Coatings Technology*, V.213, 2012, PP.278–284. DOI:10.1016/j.surfcoat.2012.10.065.

- Folkes, J.A. & Shibata, K. (1994). Laser Cladding of Ti–6Al–4V with Various Carbide Powders. *Journal of Laser Applications*, V.6, 1994, PP.88. DOI.:10.2351/1.4745341.
- Fouquet, F. et al. (1994). Austenitic Stainless Steels Layers Deposited by Laser Cladding on a Mild Steel: Realization and Characterization. *Le Journal de Physique IV*, V.04 (I.C4, 1994), PP.89–92. DOI.:10.1051/jp4:1994418.
- Gnanamuthu, S. et al. (1980). Laser Surface Surface Treatment. *Optical Engineering*, V.19 (I.5, 1980), PP.783–792. DOI.:10.1117/12.7972604.
- Groover, M.P. (2007). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing 3rd ed., Prentice Hall Press.
- HELASER (2015). Laser IPG. Disponível em: [http://www.helasercutting.net/admin/images/image/image/fiber\\_laser\\_machine.jpg](http://www.helasercutting.net/admin/images/image/image/fiber_laser_machine.jpg) [Acedido em: 9/08/2015].
- Ion, J.C. (2005). Laser Processing of Engineering Materials, Elsevier.
- Jhavar, S. et al. (2013). Causes of Failure and Repairing Options for Dies and Molds: A Review. *Engineering Failure Analysis*, V.34, 2013, PP.519–535. DOI.:10.1016/j.engfailanal.2013.09.006.
- Komvopoulos, K. & Nagarathnam, K. (1990). Processing and Characterization of Laser-Cladded Coating Materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, V.112 (I.2, 1990), PP.131–143. DOI.:10.1115/1.2903299.
- Li, M.X. et al. (2004). Laser Cladding Co-Based Alloy/SiCp Composite Coatings on IF Steel. *Materials and Design*, V.25, 2004, PP.355–358. DOI.:10.1016/j.matdes.2003.08.006.
- Mahmood, K. et al. (2012). Laser Surface Modification Using Inconel 617 Machining Swarf as Coating Material. *Journal of Materials Processing Technology*, V.212 (I.6, 2012), PP.1271–1280. DOI.:10.1016/j.jmatprotec.2012.01.014.
- Meacock, C. & Vilar, R. (2008). Laser Powder Microdeposition of CP2 Titanium. *Materials and Design*, V.29, 2008, PP.353–361. DOI.:10.1016/j.matdes.2007.01.033.
- Microsoft (2015). Visual Studio. Disponível em: <https://www.visualstudio.com/downloads/download-visual-studio-vs> [Acedido em: 4/05/2015].
- Navas, C. et al. (2005). Laser Coatings to Improve Wear Resistance of Mould Steel. *Surface and Coatings Technology*, V.194, 2005, PP.136–142. DOI.:10.1016/j.surfcoat.2004.05.002.
- Oerlikon Metco (2014). PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C. Disponível em: [http://www.oerlikon.com/eomaXL/files/metco/oerlikon\\_PL\\_TWIN\\_10\\_C\\_EN13.pdf&download=1](http://www.oerlikon.com/eomaXL/files/metco/oerlikon_PL_TWIN_10_C_EN13.pdf&download=1) [Acedido em: 27/04/2015].
- Oliveira, U. et al. (2005). Analysis of Coaxial Laser Cladding Processing Conditions. *Surface and Coatings Technology*, V.197, 2005, PP.127–136. DOI.:10.1016/j.surfcoat.2004.06.029.

- Onwubolu, G.C. et al. (2007). Prediction of Clad Angle in Laser Cladding by Powder Using Response Surface Methodology and Scatter Search. *Optics & Laser Technology*, V.39, 2007, PP.1130–1134. DOI.:10.1016/j.optlastec.2006.09.008.
- Quintino, L. et al. (2007). Welding with High Power Fiber Lasers – A Preliminary Study. *Materials & Design*, V.28 (I.4, 2007), PP.1231–1237. DOI.:10.1016/j.matdes.2006.01.009.
- Ray, A. et al. (2014). Laser Cladding of Continuous Caster Lateral Rolls: Microstructure, Wear and Corrosion Characterisation and on-Field Performance Evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*, V.214 (I.8, 2014), PP.1566–1575. DOI.:10.1016/j.jmatprotec.2014.02.027.
- Schneider, M. (1998). Laser Cladding with Powder - Effect of Some Machining Parameters on Clad Properties. Tese de Doutorado na Universidade de Twente, Holanda, 1998.
- Shaoke, C. (2014). Study on the Performance of Laser Cladding Ni / TiC on the Surface of Mold Steel. In *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering*. PP.407–411. Shenyang, China, 2014.
- Steen, W.M. & Mazumder, J. (2010). Laser Material Processing 4<sup>a</sup> Edição., Springer Science & Business Media.
- Teixeira, M. et al. (2012). Combinatorial Laser-Assisted Development of Novel Ti-Ta Alloys for Biomedical Applications. *Materials Science and Engineering*, V.32 (I.5, 2012), PP.34–42. DOI.:10.1016/j.msec.2012.03.007.
- Teixeira, M.X. (2012). Novas Ligas de Titânio Para Aplicações Biomédicas. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Materiais, IST-UL, 2012.
- Torims, T. et al. (2015). Development of Technological Equipment to Laboratory Test In-Situ Laser Cladding for Marine Engine Crankshaft Renovation. *Procedia Engineering*, V.100, 2015, PP.559–568. DOI.:10.1016/j.proeng.2015.01.405.
- Toyserkani, E. et al. (2005). Laser Cladding, CRC press.
- Vilar, R. (1998). Laser Cladding. *Journal of Laser Applications*, V.11 (I.2, 1998), PP.64. DOI.:10.2351/1.521888.
- Wang, W. & Lin, H. (2014). Remanufacturing of Aero-Engine Components by Laser Cladding. In *International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. PP.609–612. Shenyang, China, 2014.





## **Anexos**



## 6. Operation.

**NOTE:** Upon receiving your device check the packaging and parts for any possible damages that may have occurred in transit. If damages are obviously, please refuse the acceptance from the forwarder and inform IPG Laser GmbH immediately

### CONTROL REGIMES

There are two control regimes of the laser: "LOCAL" and "REMOTE" which are selected with the keyswitch on the front panel (see POWER key description on the page 16). If the keyswitch is in "ON" position then "LOCAL" control regime is activated, if the keyswitch is in "REM" position then the device is in "REMOTE" control regime. The table below describes the differences between these two regimes:

	<b>LOCAL</b> (keyswitch in ON position)	<b>REMOTE</b> (keyswitch in REM position)	
<b>Control electronics activation</b>		Remote Laser Power Key Switch	
<b>Main power supply activation</b>	START button	Remote Start Button	
<b>Emission enabling</b>	RS-232 interface EMISSION button	<b>Hardware Emission Control Enabled</b> <sup>1)</sup>	<b>Hardware Emission Control Disabled</b> <sup>2)</sup>
		External Interface	RS-232 interface
<b>Device settings Mode selection</b>	RS-232 interface CONTROL buttons	RS-232 interface	

<sup>1)</sup>Default setting. To set "Hardware Emission Control Enabled" send the command "ELE" via RS-232 interface.

<sup>2)</sup>To set "Hardware Emission Control Disabled" send the command "DLE" via RS-232 interface.

### OPERATION MODES

In both control regimes (LOCAL and REMOTE) there are three operation modes of the laser:

- 1. ACC Mode.** This is the main mode for CW operation. The value of pump LD current is set via RS-232 or using control buttons on the front panel of the device (for LOCAL control regime). The output power is proportional to the pump current. The current is switched on/off (emission is enabled/disabled) by means of a command via RS-232 or by pressing the corresponding button (for LOCAL control regime) or via pin 18 of External Interface Connector (for REMOTE control regime)
- 2. Modulation Mode.** This mode is intended for pulse operation. The value of pump LD current is set via RS-232 or using control buttons (for LOCAL control regime). Pump current switching on and off is performed by means of modulation signal applied to corresponding pins of the External Interface Connector (see rear panel description) under the assumption that the command for emission enabling has been sent via RS-232 or the emission has been enabled via "EMISSION" button on front panel of the device (for LOCAL control regime) or pin 18 of External Interface Connector (for REMOTE control regime).
- 3. External Control Mode.** In this mode the pump LD current value is set through the voltage between the corresponding pins of External Interface Connector (see rear panel description). And pump current switching on and off is performed as in previous mode.

**RS-232 INTERFACE DESCRIPTION**

A three wire (RxD, TxD, GND) interface is used. Most computers are DTE (Data Terminal Equipment) devices. The laser is also a DTE device and therefore you must use a DTE-to-DTE interface cable. These cables are also called null-modem, modem-eliminator, or crossover cables. In addition, the interface cable must have the proper connector on each end. Cables typically have 9 pins (DB-9) or 25 pins (DB-25) with 'male' pins or 'female' receptacles inside the connector shell. For RS-232 connections on the rear panel of the Laser Driver please refer to the interface connector pin out. The other end of this cable needs to match the computers interface connector. Remember that this cable must be wired in a null-modem or crossover configuration.

The RS-232 interface has been set to the following parameters:

Baud Rate: 57600  
 Data Bits: 8 Bits  
 Stop Bits: 1 Bit  
 Parity: None  
 Flow Control: None

Note: After power on the laser sends some service bytes to RS-232 interface. These bytes should be ignored.

All commands and responses will consist of printable ASCII characters. Commands are typically a 3 or 4 letter mnemonic followed by a parameter, if required.

All commands and responses will be terminated with a 'carriage return' (CR, 0x0D, \r) character. If a CR terminated string is received, but no valid command is found, a response of "BCMD" will be sent.

The commands are shown here as all uppercase for clarity; the actual commands are not case sensitive. A space character is also shown between the command and parameter for clarity.

Every command will generate a response. The responses generally consist of the command echoed back.

If there is a returned value, it will be separated from the echoed command by a ':' character.

Code	Description	Examples
SDC	Set Diode Current – Sets the diode current. The units are in percent of maximum current. The setpoint must be below 100% and above the minimum current setpoint. The current may also be set to 0. The response from the laser will be the command echoed back, a delimiter of ":", and then the current setpoint for the laser. A value that is outside the acceptable range will receive a response of "ERR: Out of Range".	Sent: "SDC 34.2" Response: "SDC: 34.2" (Current Setpoint is set to 34.2%)  Sent: "SDC 104.2" Response: "ERR: Out of Range" (The setpoint is unchanged)
RCS	Read Current Setpoint – Reads the setpoint for the LD current. The response is the command echoed back, followed by a delimiter of ":", and then the current setpoint in %.	Sent: "RCS" Response: "RCS: 56.7" (Indicates that the LD current setpoint is 56.7%)
RNC	Read Minimum Current Setpoint – Reads the minimum current setpoint that can be set in the laser. The response will be the command echoed back, followed by a delimiter of ":", then the minimum current as a percentage of the maximum.	Sent: "RNC" Response: "RNC: 10.0" (Indicates that the minimum setpoint is 10.0 %)
ROP	Read Output Power – Reads the output power in watts. The response will be the command	Sent: "ROP" Response: "ROP: 96"

Ytterbium Fiber Laser, Model YLR-200-AC

	<p>echoed back, a delimiter, and then either the power in watts, "Off" if the laser is off, or "Low" if the power is below the reliable measurement threshold of the laser.</p>	<p>(Indicates that the output power is 96 watts)</p> <p>Sent: "ROP" Response: "ROP: Off" (Indicates that emission is off)</p> <p>Sent: "ROP" Response: "ROP: Low" (Indicates that the output power is below the accurate measurement range of the laser)</p>
RFV	<p>Read current software revision.</p>	<p>Sent: "RFV" Response "RFV: 1.0.147 "</p>
RCT	<p>Read Laser Temperature – Reads the internal temperature of the laser. The response will be an echo of the command, a delimiter of ";", and the temperature in degrees centigrade.</p>	<p>Sent: "RCT" Response: "RCT: 34.5"</p>
RET	<p>Read Elapsed Time – Reads the elapsed time the laser has been on. The time is returned in minutes.</p>	<p>Sent: "RET" Response: "RET: 1105"</p>
RSN	<p>Read Serial Number – Reads the serial number of the device.</p>	<p>Sent: "RSN" Response "RSN: 6103081 "</p>
STA	<p>Read device status – The status is reported as a bit-encoded 32-bit word. Undefined bits or bits defined as "Reserved" can be in any state and should be ignored. Each of the bits has the following meaning:</p> <p>Bit 0 - Reserved Bit 1 - 0 = Normal operation           1 = Overheat Bit 2 - 0 = Emission Off           1 = Emission On Bit 3 - 0 = Back Reflection OK           1 = High Back Reflection Bit 4 - 0 = External Mode Disabled           1 = External Mode Enabled Bit 5 - Reserved Bit 6 - 0 = Normal operation           1 = Module Disconnected Bit 7 - 0 = Module OK           1 = Module Failed Bit 8 - 0 = Aiming Beam OFF           1 = Aiming Beam ON Bit 9 - Reserved Bit 10 - Reserved Bit 11 - 0 = Power Supply is On           1 = Power Supply is Off Bit 12 - 0 = Modulation Disabled           1 = Modulation Enabled. Bit 13 - Reserved Bit 14 - Reserved Bit 15 - 0 = Emission is not starting           1 = Emission Starting Bits 16-17 - Reserved Bit 18 - 0 = Hardware Emission Control Disabled           1 = Hardware Emission Control Enabled</p>	<p>Sent: "STA" Response: "STA: 4100"</p> <p>This translates to the following: 4100 = 0x1004, so bits 2 and 12 are set. This means that emission is on and modulation is enabled.</p>

Ytterbium Fiber Laser, Model YLR-200-AC

	<p>Bit 19 - 0 = Normal operation 1 = Power Supply Failure</p> <p>Bits 20-23 - Reserved</p> <p>Bit 24 - 0 = Normal operation 1 = Low temperature</p> <p>Bit 25 - 0 = Power Supply OK 1 = Power Supply Failure 2</p> <p>Bits 26, 27, 28 - Reserved</p> <p>Bit 29 - 0 - Module OK 1 - Module disabled</p> <p>Bit 30 - 0 - Optical Interlock OK 1 - Optical Interlock active</p> <p>Bit 31 - Reserved</p>	
ELE	Enable Hardware Emission Control	Sent: "ELE" Response: "ELE"
DLE	Disable Hardware Emission Control	Sent: "DLE" Response: "DLE"
EMON	Start Emission – Starts emission.	Sent: "EMON" Response: "EMON"
EMOFF	Stop Emission – Stops emission.	Sent: "EMOFF" Response: "EMOFF"
EMOD	Enable Modulation – Enables the modulation control input.	Sent: "EMOD" Response: "EMOD"
DMOD	Disable Modulation – Disables the modulation control input.	Sent: "DMOD" Response: "DMOD"
EEC	Enable External Control – Enables the external control input.	Sent: "EEC" Response: "EEC"
DEC	Disable External Control – Disables the external control input.	Sent: "DEC" Response: "DEC"
ABN	Aiming Beam ON	Sent: "ABN" Response: "ABN"
ABF	Aiming Beam OFF	Sent: "ABF" Response: "ABF"
RERR	Reset Errors – Resets any resetable errors.	Sent: "RERR" Response: "RERR"
RMEC	Read Module Error Code. Returns error code stored in the laser or zero if normal operation.	Sent: "RMEC" Response: "RMEC: 0"
SFWS	Set Filter Window Size. Enables to set desirable averaging time (from 0.2 sec. up to 5 sec.) for internal power meter.	Sent: "SFWS 0.5" Response: "SFWS:0.5" (Power Averaging Window Size set to 0.5 sec.)
RFWS	Read Filter Window Size	Sent: "RFWS" Response: "RFWS: 0.5"

## Anexo 2- As principais funções de controlo das guias lineares

### Command index

#### System

mcError	(R S)	Read system errors	25
mcWatchdog	(RW )	Activate communication monitor	26
mcVersion	(R S)	Read firmware version	27
mc510V	(RWS)	set 5/10V output voltage	28
mcReset	( WS)	Reset SM30 to boot state	29

#### Operate

mcPower	(RW )	Switch motor on/off or stop motor	30
mcPosMode	(RW )	Select motion mode	31
mcAbsRel	(RW )	Set relative / absolute mode	32
mcPosition	(RW )	Read / write position	33
mcState	(R )	Read state	34
mcGo	(RW )	Positioning	35
mcGoHome	( W )	Search limit switch	36
mcBreak	( W )	Break any process, stop motor	37
mcFact	(R )	Read current speed	38
mcPhase	(R )	Read actual step angle	39
mcPowerMeter	(R )	Read actual motor power / milliwatts	40

#### Adjustments

mcU	(RW )	Set nominal motor voltage in 1/10 Volt	41
mcUhold	(RW )	Standstill voltage in % of Unom	42
mcStepWidth	(RW )	Set step width and -direction	43
mcAmax	(RW )	Set maximum acceleration	44
mcFmax	(RW )	Set maximum speed	45
mcA	(RW )	Set desired acceleration	46
mcF	(RW )	Set desired speed	47
mcFg	(RW )	Set motor edge frequency	48

#### Switches

mcSwitchMode	(RW )	Configure limit switches	49
mcSwitches	(R )	Read actual state	50
mcSwiPos	(R )	Read position of last switch state change	51

#### Special

mcNone	( )	Empty command	52
--------	-----	---------------	----

Legend: R=readable, W=write able, S=System wide effect



### Anexo 3 - Excerto das definições para as funções de controlo

```
/*
  Stepper Motor Controller SM30 v2.0 :

  SM30 interface v1.15
  Tested with Visual C++ 5.0 and Turbo C 2.01

  (c)2000 OWIS GmbH, 79219 Staufen i.Br, Germany
*/

#ifndef __SM30_H_INCLUDED__
#define __SM30_H_INCLUDED__

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

/* VC++ 5.0 */
#define DllImport __declspec( dllimport )
#define _CALLSTYLE_ __stdcall
/**/

/* TC 2.01 */
#define DllImport extern
#define _CALLSTYLE_
/**/

typedef long tSM30Motor, *pSM30Motor;

DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Init( tSM30Motor* M, long Number, long Addr );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Done( tSM30Motor* M );

DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Post( tSM30Motor* M, long Cmd, long Data );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Request( tSM30Motor* M, long Cmd );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Replied( tSM30Motor* M );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Fetch( tSM30Motor* M, long* Data );

DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Write( tSM30Motor* M, long Cmd, long Data );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30Read( tSM30Motor* M, long Cmd, long* Data );

DllImport char* _CALLSTYLE_ SM30CmdToName( long Cmd );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30NameToCmd( char* Name );
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30CmdFlags( long Cmd );

DllImport long _CALLSTYLE_ SM30GetTimeout(void);
DllImport long _CALLSTYLE_ SM30SetTimeout( long t );

/* note: calling method *is* _CALLSTYLE_ ,*never* change this */

/*-----*/
/* communication result constants (mcr...= Motor Communication Result) */

#define mcrOk 0 /* operation successful */
#define mcrBusy 1 /* Post/Request/Received/Fetch: defered; repeat.*/

#define mcrIllegalMno -1 /* Init: Number not in [1..3] */
#define mcrIllegalAddr -2 /* Init: Addr not in [$100..$3fc] */
#define mcrNoSM30 -3 /* Init: No SM30 found at Addr */
#define mcrNotInitialised -4 /* M not linked to any motor */
#define mcrNoRequest -5 /* Received, Fetch: nothing Requested */
```

```

#define mcrTimeout          -6 /* Read/Write: SM30 does not react. shouldn't
happen.*/
#define mcrInterference    -7 /* Received/RFetch/Read: SM30 replied other data
than requested */

#define mcrTooManyHandles  -8 /* Init: more than 255 Handles requested */
#define mcrTooManyBoards   -9 /* Init: internal error, shouldn't happen */
#define mcrNoNTDriver      -10 /* Init(WinNT): NT driver not found */
#define mcrOldSM30         -11 /* Init: SM30 with old firmware found at Addr */

/*-----*/
/* command constants (mc... = Motor Command...) */

#define mcNone             0
#define mcCmdMin           1 /* note that not all cmd numbers within */
#define mcCmdMax           30 /* that range are necessarily valid */
#define mcMinCmd           mcCmdMin
#define mcMaxCmd           mcCmdMax

/* R readable */
/* W writeable */

/*-- switch on/off --*/
#define mcPower            6 /* RW (all off = clear error) */
#define mpOff              0 /* Motor Power : Off */
#define mpOn               1 /* Motor Power : On */
#define mpShutdown        -1 /* Motor Power : Shutdown */

/*-- general settings --*/
#define mcU                5 /* RW set nominal motor voltage */
#define mcUhold            12 /* RW set standstill voltage in % */
#define mcStepWidth        17 /* RW step width and direction */
#define mcAmax             4 /* RW set maximum acceleration */
#define mcFmax             2 /* RW set maximum speed */
#define mcSwitchMode       11 /* RW assign limit switches */

/*-- move --*/
#define mcPosMode          8 /* RW set positioning mode */
#define mmMove             1 /* move with given speed */
#define mmPos              3 /* move to given position */

#define mcAbsRel           28 /* RW set absolute/relative mode */
#define mmAbs              0 /* absolute positioning */
#define mmRel              1 /* relative positioning */

#define mcPosition         9 /* RW set position counter */
#define mcA                3 /* RW set nominal acceleration */
#define mcF                1 /* RW set nominal speed */
#define mcFact             26 /* R read actual speed */
#define mcGo               7 /* W go to destination */
#define mcGoHome           15 /* W go home */

#define mcState            29 /* R stands : 0 */
#define mstNone            0 /* motor stands */
#define mstMove            1 /* motor runs (in mode mmMove) */
#define mstPos             3 /* motor runs (in mode mmPos) */
#define mstHome            8 /* motor performs homing */
#define mstBreak           9 /* motor performs fast break */

#define mcError            30 /* R error message */
#define meNone             0 /* no error */

```

```

        /* temporary errors */
#define meIM1      1 /* motor 1 excessive current */
#define meIM2      2 /* motor 2 excessive current */
#define meIM3      4 /* motor 3 excessive current */
#define meIover    8 /* general current limiter */
#define meI        15 /* any excessive current */

        /* continuing errors */
#define me510V     16 /* 5/10V output was short circuited*/
#define meSwitch   32 /* limit switch was applied in emergence stop mode
*/
#define meWatchdog 64 /* watchdog timed out */
#define meReset    128 /* internal error */
#define meNotFound 254 /* SM30Init delivered FALSE */
#define meHalted   240 /* any continuing error */

#define mcSwitches 27 /* R current switch settings */

        /*-- other --*/
#define mcPowerMeter 22 /* R read motor power */
#define mcUact       24 /* R read actual voltage */
#define mcBreak      16 /* W break */
#define mcSwiPos     23 /* R read last switching position */
#define mcPhase      25 /* R read motor phase */
#define mcFg         10 /* RW adjust internal control parameter*/
#define mcWatchdog   18 /* RW set watchdog timeout */
#define mc510V       20 /* RW set 5/10V output */
#define mcReset      19 /* W reset to boot state */
#define mcVersion    21 /* R read version number */

#ifdef __cplusplus
};
#endif

#endif /* __SM30_H_INCLUDED__ */

```



#### Anexo 4- Rotina de controlo do processo de revestimento

```
// #####  
/// <summary> BOTÃO DE INICIAR O PROCESSO  
/// </summary>  
public void btnIniciarProcesso_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    int comprimento, colunas, espacamento, v, intensidadeLaser;  
    try  
    {  
        comprimento = 25600 * Convert.ToInt32(txtBoxComprimento.Text);  
        colunas = Convert.ToInt32(txtBoxColunas.Text);  
        espacamento = (256 / 10) *  
Convert.ToInt32(txtBoxEspacamento.Text);  
        v = Convert.ToInt32(txtBoxVelDeslocacao.Text);  
        intensidadeLaser = Convert.ToInt32(txtBoxIntensidadeLaser.Text);  
    }  
    catch (Exception)  
    {  
        MessageBox.Show("Todos os campos devem ter valores inteiros  
positivos");  
        return;  
    }  
    gestor.ControloProcesso(comprimento, colunas, espacamento, v,  
intensidadeLaser);  
}  
  
/// <summary> Controlo do processo -> Controlo mesas XYZ, Laser e  
Alimentador de Pós  
/// </summary>  
internal void ControloProcesso(int comprimento, int colunas, int  
espacamento, int v, int intensidadeLaser)  
{  
    // Para os motores se estiverem a fazer algum movimento  
    parar();  
  
    this.parado = false;  
  
    // Começa uma nova thread  
    desposicoesAdjacentes = new Thread(() =>  
_desposicoesAdjacentes(comprimento, colunas, espacamento, v, intensidadeLaser));  
  
    // Inicia a thread  
    desposicoesAdjacentes.Start();  
}  
  
/// <summary> THREAD - DEPOSIÇÃO DE CORDÕES ADJACENTES  
/// </summary>  
private void _desposicoesAdjacentes(int comprimento, int colunas, int  
espacamento, int velocidade, int intensidadeLaser)  
{  
    int orientacao = -1;  
    for (int i = 0; i < colunas; i++)  
    {  
        if (parado) return;  
  
        txtBoxRegistos.AppendText("coluna:" + (i+1) + "/" + colunas +  
Environment.NewLine);  
    }  
}
```

```
        laser.ligarLaser(intensidadeLaser);  
        motores.mover(motores.motorY, orientacao * comprimento,  
velocidade);  
        laser.desligarLaser();  
  
        orientacao = orientacao * (-1);  
        motores.mover(motores.motorY, orientacao * comprimento,  
velocidade);  
  
        motores.mover(motores.motorX, espacamento, velocidade);  
        orientacao = orientacao * (-1);  
    }  
}
```

## Anexo 5- Rotina para testar a emissão de radiação

```
// #####  
/// <summary> Botão "TESTAR EMISSÃO DE RADIAÇÃO" /// </summary>  
/// <param name="sender"></param>  
/// <param name="e"></param>  
private void testarEmissão_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    int tempo = Convert.ToInt32(txtBoxDuracaoEmissao.Text);  
    // criar e inicializar a Thread  
    TesteEmissão = new Thread(() => _TesteEmissão());  
    TesteEmissão.Start();  
}  
  
private void _TesteEmissão()  
{  
    int intensidadeLaser = Convert.ToInt32(txtBoxIntensidadeLaser.Text);  
    int tempo = Convert.ToInt32(txtBoxDuracaoEmissao.Text);  
    laser.ligarLaser(intensidadeLaser);  
    Thread.Sleep(tempo);  
    laser.desligarLaser();  
}
```



## Anexo 6- Rotina de paragem de emergência do processo “STOP”

```
// #####  
/// <summary> BOTÃO DE PARAGEM DE EMERGENCIA - STOP  
/// </summary>  
private void btnStopSoldadura_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    gestor.parar();  
}  
  
/// <summary> Pára qualquer trabalho em execução  
/// </summary>  
internal void parar()  
{  
    laser.desligarLaser();  
    motores.parar();  
    this.parado = true;  
    AlimentadorPos.Ligar1(2, 0); // desliga CH1  
    AlimentadorPos.Ligar1(4, 0); // desliga CH2  
    AlimentadorPos.Ligar1(8, 0); // fecha o argon do laser  
    if (desposicoesAdjacentes != null)  
    {  
        //Signal the shutdown event  
        shutdownEvent.Set();  
  
        //Make sure to resume any paused threads  
        pauseEvent.Set();  
  
        //Wait for the thread to exit  
        desposicoesAdjacentes.Abort();  
    }  
}
```



## Anexo 7 - Rotina para localizar o ponto focal

```
// #####  
/// <summary> Botão "Procurar Foco" /// </summary>  
/// <param name="sender"></param>  
/// <param name="e"></param>  
private void btnProcurarDistanciaFocal_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    ProcuraDistanciaFocal = new Thread(() => _ProcuraDistanciaFocal());  
    ProcuraDistanciaFocal.Start();  
}  
private void _ProcuraDistanciaFocal()  
{  
    int intensidadeLaser = Convert.ToInt32(txtBoxIntensidadeLaser.Text);  
    int tempo = Convert.ToInt32(txtBoxDuracaoEmissao.Text);  
    int i, estadoMotor2 = 0, estadoMotor3 = 0;  
    for (i = 1; i <= 15; i++)  
    {  
        laser.ligarLaser(intensidadeLaser);  
        Thread.Sleep(tempo);  
        laser.desligarLaser();  
        txtBoxResultado.AppendText(i + "º " + "Z= " + posicaoZ.Text + "  
µm" + Environment.NewLine);  
        Thread.Sleep(40);  
        gestor.motores.mover(2, (3 / 2) * 25600, -800);  
        Thread.Sleep(40);  
        SM30Lib.SM30Read(ref Motor2, SM30Lib.mcState, ref estadoMotor2);  
        Thread.Sleep(40);  
        while (estadoMotor2 != 0)  
        {  
            Thread.Sleep(100);  
            SM30Lib.SM30Read(ref Motor2, SM30Lib.mcState, ref  
estadoMotor2);  
        }  
        gestor.motores.mover(3, 2 * 25600, 800);  
        Thread.Sleep(40);  
        SM30Lib.SM30Read(ref Motor3, SM30Lib.mcState, ref estadoMotor3);  
        Thread.Sleep(40);  
        while (estadoMotor3 != 0)  
        {  
            Thread.Sleep(100);  
            SM30Lib.SM30Read(ref Motor3, SM30Lib.mcState, ref  
estadoMotor3);  
        }  
    }  
}
```



## Anexo 8 - Rotina de envio de dados para o Arduino

```
// #####  
/// <summary> COMANDOS PARA O ARDUÍNO  
/// </summary>  
// LIGAR/DESLIGAR LINHA 1  
private void cbxOnOFFch1_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    if (cbxOnOFFch1.Checked == true) AlimentadorPos.Ligar1(1, 0);  
    else AlimentadorPos.Ligar1(2, 0);  
}  
// LIGAR/DESLIGAR LINHA 2  
private void cbxOnOFFch2_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    if (cbxOnOFFch2.Checked == true) AlimentadorPos.Ligar1(3, 0);  
    else AlimentadorPos.Ligar1(4, 0);  
}  
// ROTAÇÃO DISCO DA LINHA 1  
private void RPM1_Change(object sender, EventArgs e)  
{  
    int rpm1 = (int)numUpDownRPM1.Value;  
    if (cbxOnOFFch1.Checked == true) AlimentadorPos.RPM(5, rpm1);  
}  
// ROTAÇÃO DISCO DA LINHA 2  
private void RPM2_Change(object sender, EventArgs e)  
{  
    int rpm2 = (int)numUpDownRPM2.Value;  
    if (cbxOnOFFch2.Checked == true) AlimentadorPos.RPM(6, rpm2);  
}  
// ABRIR - FECHAR ARGON PARA O LASER  
private void cbxOpenArgon_Change(object sender, EventArgs e)  
{  
    if (cbxOpenArgon.Checked == true) AlimentadorPos.Ligar1(7, 0);  
    else AlimentadorPos.Ligar1(8, 0);  
}  
  
.....  
  
public static void Ligar1(int linha, int rpm)  
{  
    Configure();  
    Conectar();  
    Write(linha, rpm);  
    Disconnect();  
}  
  
.....  
  
public static void Write(int linha, int rpm)  
{  
    if (oSerialPort.IsOpen)  
    {  
        try  
        {  
            byte CH;  
            byte _RPM;  
            CH = (byte)(linha);  
            _RPM = (byte)(rpm);  
            byte[] conjunto = new byte[] {  
                CH,  

```

```

        _RPM
    };

    oSerialPort.Write(conjunto, 0, conjunto.Count());
    if (form.chkBoxDebug.Checked)
    {
        form.txtBoxResultado.AppendText("Command Issued:
Linha:"+linha+" RPM:" + rpm + " valor:"+_RPM+ Environment.NewLine);
        form.txtBoxResultado.AppendText("-----"
+ Environment.NewLine);
    }
}
catch (Exception e)
{
    form.txtBoxResultado.AppendText("Exception on Write" +
Environment.NewLine);
    form.txtBoxResultado.AppendText(e.ToString() +
Environment.NewLine);
    form.txtBoxResultado.AppendText("-----" +
Environment.NewLine);
}
}

```

## Anexo 9 - Código do Arduino para a recepção dos dados de comando

```
// Significado do primeiro byte:
// 1 -> ON CH1
// 2 -> OFF CH1
// 3 -> ON CH2
// 4 -> OFF CH2
// 5 -> SET %RPM 1
// 6 -> SET %RPM 2
// 7 -> Argon Laser ON
// 8 -> Argon Laser OFF

#include <Wire.h>

#define quantidadeBytes 2
#define D2 2
#define D9 9

int dados[quantidadeBytes];

void setup()
{
  pinMode(D2, OUTPUT); // Argon para o laser
  pinMode(D9, OUTPUT); // CH2
  pinMode(A0, OUTPUT); // CH1
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for Leonardo only
  }
  Wire.begin(); // if not specified, join the bus as a master.
}

void loop()
{
  if (Serial.available() >= quantidadeBytes) {
    for (int i=0; i < quantidadeBytes; i++) {
      dados[i] = Serial.read();
    }
    switch (dados[0])
    {
      case 1:
        digitalWrite(A0, HIGH);
        break;
      case 2:
        digitalWrite(A0, LOW);
        break;
      case 3:
        digitalWrite(D9, HIGH);
        break;
      case 4:
        digitalWrite(D9, LOW);
        break;
      case 5:
        I2C();
        break;
      case 6:
        I2C();
        break;
      case 7:
        digitalWrite(D2, HIGH);
        break;
    }
  }
}
```

```
        case 8:
            digitalWrite(D2, LOW);
            break;
    }
}

void I2C(){
    Wire.beginTransmission(0x2C); // transmit to device #4
    if (dados[0] == 5) Wire.write(0x00); // bit de comando
    else Wire.write(0x01); // bit de comando
    Wire.write(2*dados[1]); // bit de output
    Wire.endTransmission(); // stop transmittin
}
```

## Anexo 10- Rotina de mover as guias X, Y e Z

```
// #####  
// <summary> BOTÕES DE MOVIMENTAÇÃO MANUAL  
  
// Botões de posicionamento manual:  
// <<  menosRapido (sentido negativo com "alta" velocidade)  
// <   menosLento  (sentido negativo com "baixa" velocidade)  
// >   maisLento   (sentido positivo com "baixa" velocidade)  
// >>  maisRapido  (sentido positivo com "alta" velocidade)  
  
// Parametros a definir para efectuar um movimento manual:  
// a) Quando botão do rato pressionado (MouseDown):  
//     1º - mcPosMode = mmMove      (definir o modo de movimentação)  
//     2º - mcF = menosRapido/menosLento/maisLento/maisRapido  
(definir a velocidade assoc. ao botão)  
// b) Quando libertado o botão do rato (MouseUp)  
//     1º - mcBreak = 0      (para o motor)  
// </summary>  
// CONFIGURAÇÃO DAS VELOCIDADES  
private int Motor1, Motor2, Motor3;  
private int menosLento = -1000;  
private int maisLento = 1000;  
private int menosRapido = -2500;  
private int maisRapido = 2500;  
// ----- EIXO XX -----  
private void btnXmenosRapido_MouseDown(object sender, MouseEventArgs e)  
{  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmMove);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcF, menosRapido);  
}  
private void btnXmenosRapido_MouseUp(object sender, MouseEventArgs e)  
{  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcBreak, 0);  
}  
private void btnXmenosLento_MouseDown(object sender, MouseEventArgs e)  
{  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmMove);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcF, menosLento);  
}  
private void btnXmenosLento_MouseUp(object sender, MouseEventArgs e)  
{  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcBreak, 0);  
}  
private void btnXmaisLento_MouseDown(object sender, MouseEventArgs e)  
{  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmMove);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcF, maisLento);  
}  
}
```



## Anexo 11- Rotina que atualiza a posição relativa das guias de movimento linear

```
/// <summary> Inicia a leitura dos valores das posições x,y e z
/// </summary>
/// <param name="labels">Labels para mostrar os valores</param>
internal void iniciarLeituraValores(LabelsPosicaoXYZ labels)
{
    // Começa uma nova thread para leitura de valores
    threadLeituraValores = new Thread(() => _lerValores(labels));
    lendoValores = true;
    threadLeituraValores.Start();
}

private void _lerValores(LabelsPosicaoXYZ labels)
{
    int posicaoX = 0;
    int posicaoY = 0;
    int posicaoZ = 0;

    while(lendoValores){

        SM30Lib.SM30Read(ref motorX, SM30Lib.mcPosition, ref posicaoX);
        posicaoX = (1000*posicaoX)/25600;
        labels.posicaoX.Text = posicaoX + "";

        SM30Lib.SM30Read(ref motorY, SM30Lib.mcPosition, ref posicaoY);
        posicaoY = (1000*posicaoY) / 25600;
        labels.posicaoY.Text = posicaoY + "";

        SM30Lib.SM30Read(ref motorZ, SM30Lib.mcPosition, ref posicaoZ);
        posicaoZ = (1000*posicaoZ) / 25600;
        labels.posicaoZ.Text = posicaoZ + "";

        Thread.Sleep(200); // 0,2 segundos
    }
}
```



## Anexo 12- Rotina para deslocar X, Y e Z numa distância definida

```
// #####  
/// <summary> BOTÕES DE DESLOCAÇÃO MANUAL DE X, Y, Z DISTÂNCIA EM MICRONS  
/// </summary>  
int deslocar;  
private void deslocarX_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    deslocar = (256 / 10) * Convert.ToInt32(textBoxDeslocar.Text);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmPos);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcAbsRel, SM30Lib.mmRel);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcF, 1000);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcGo, deslocar);  
}  
private void deslocarY_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    deslocar = (256 / 10) * Convert.ToInt32(textBoxDeslocar.Text);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmPos);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcAbsRel, SM30Lib.mmRel);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcF, 1000);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcGo, deslocar);  
}  
private void deslocarZ_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    deslocar = (256 / 10) * Convert.ToInt32(textBoxDeslocar.Text);  
  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmPos);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcAbsRel, SM30Lib.mmRel);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcF, 1000);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcGo, deslocar);  
}
```



## Anexo 13- Rotina para identificar os limites das guias lineares X e Y

```
// #####  
/// <summary> Botão "Procurar os limites de X, Y"/// </summary>  
/// <param name="sender"></param>  
/// <param name="e"></param>  
private void btnProcurarLimites_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    ProcurarLimiteX = new Thread(() => _ProcurarLimiteX());  
    ProcurarLimiteX.Start();  
    ProcurarLimiteY = new Thread(() => _ProcurarLimiteY());  
    ProcurarLimiteY.Start();  
}  
  
private void _ProcurarLimiteY()  
{  
    int estadoMotor2 = 0;  
    int estadoSwitchY = 0;  
  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcGoHome, -1000);  
    do  
    {  
        Thread.Sleep(100);  
        SM30Lib.SM30Read(ref Motor2, SM30Lib.mcState, ref estadoMotor2);  
        SM30Lib.SM30Read(ref Motor2, SM30Lib.mcSwitches, ref  
estadoSwitchY);  
        if (estadoSwitchY == 1 | estadoSwitchY == 2)  
            break;  
    } while (estadoMotor2 != 0);  
    Thread.Sleep(100);  
    if (estadoSwitchY == 1 | estadoSwitchY == 2)  
    {  
        Thread.Sleep(1500);  
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcPosition, 0);  
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmPos);  
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcAbsRel, SM30Lib.mmRel);  
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcF, 2500);  
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcGo, 76 * 25600);  
        do  
        {  
            Thread.Sleep(500);  
            SM30Lib.SM30Read(ref Motor2, SM30Lib.mcState, ref  
estadoMotor2);  
        } while (estadoMotor2 != 0);  
        Thread.Sleep(100);  
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcPosition, 0);  
        Thread.Sleep(1000);  
    }  
}  
private void _ProcurarLimiteX()  
{  
    int estadoMotor1 = 0;  
    int estadoSwitchX = 0;  
  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcGoHome, -1000);  
    do  
    {  
        Thread.Sleep(100);  
        SM30Lib.SM30Read(ref Motor1, SM30Lib.mcState, ref estadoMotor1);
```

```

estadoSwitchX);
    SM30Lib.SM30Read(ref Motor1, SM30Lib.mcSwitches, ref
    if (estadoSwitchX == 1 | estadoSwitchX == 2)
        break;
    } while (estadoMotor1 != 0);
    Thread.Sleep(100);
    if (estadoSwitchX == 1 | estadoSwitchX == 2)
    {
        Thread.Sleep(1500);
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosition, 0);
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosMode, SM30Lib.mmPos);
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcAbsRel, SM30Lib.mmRel);
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcF, 2500);
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcGo, 76 * 25600);
        do
        {
            Thread.Sleep(500);
            SM30Lib.SM30Read(ref Motor1, SM30Lib.mcState, ref
estadoMotor1);
        } while (estadoMotor1 != 0);
        Thread.Sleep(100);
        SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPosition, 0);
        Thread.Sleep(1000);
    }
}
}

```

## Anexo 14- Rotina de inicialização das guias lineares X,Y e Z

```
// #####  
/// <summary> ATRIBUIR PORTA DE CADA MOTOR & PARAMETROS DE CONFIGURAÇÃO  
/// </summary>  
private void btnInit_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    LabelsPosicaoXYZ labels =  
    new LabelsPosicaoXYZ(posicaoX, posicaoY, posicaoZ);  
  
    gestor.motores.iniciarLeituraValores(labels);  
  
    // int ret, m1 = 0, m2 = 0, m3 = 0;  
    int ret, m1 = Motor1, m2 = Motor2, m3 = Motor3;  
  
    //##### ATRIBUIR PORTA DE CADA MOTOR #####  
    ret = SM30Lib.SM30Init(ref m1, 1, getAddress());  
    setResultado(ret);  
    setMotor1(m1);  
  
    ret = SM30Lib.SM30Init(ref m2, 2, getAddress());  
    setResultado(ret);  
    setMotor2(m2);  
  
    ret = SM30Lib.SM30Init(ref m3, 3, getAddress());  
    setResultado(ret);  
    setMotor3(m3);  
  
    //##### PARAMETROS DE CONFIGURAÇÃO #####  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcPower, 1);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcPower, 1);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcPower, 1);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcFmax, 2500);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcFmax, 2500);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcFmax, 2500);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcU, 60);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcU, 60);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcU, 60);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcUhold, 25);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcUhold, 25);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcUhold, 25);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcAmax, 15);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcAmax, 15);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcAmax, 15);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mCA, 10);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mCA, 10);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mCA, 10);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcStepWidth, 64);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcStepWidth, 64);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcStepWidth, 64);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor1, SM30Lib.mcSwitchMode, 21);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor2, SM30Lib.mcSwitchMode, 43);  
    SM30Lib.SM30Write(ref Motor3, SM30Lib.mcSwitchMode, 21);  
}
```



## Anexo 15 - Rotina de desligar os motores das guias lineares X, Y e Z

```
// #####  
/// <summary> DESLIGAR TODOS OS MOTORES  
/// </summary>  
private void btnDone_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    int ret, m1 = Motor1, m2 = Motor2, m3 = Motor3;  
    gestor.motores.paraLeituraValores();  
  
    ret = SM30Lib.SM30Done(ref m1);  
    setResultado(ret);  
  
    ret = SM30Lib.SM30Done(ref m2);  
    setResultado(ret);  
  
    ret = SM30Lib.SM30Done(ref m3);  
    setResultado(ret);  
}
```