

Wei Lin

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DEPOSIÇÃO DE
PÓ METÁLICO APLICÁVEL PARA OS PROCESSOS SLS/SLM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner.

Florianópolis
2016

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

Lin, Wei

Desenvolvimento de um sistema de deposição de pó metálico aplicável para os processos sls/slm / Wei Lin ; orientador, Walter Lindolfo Weingaertner - Florianópolis, SC, 2016.

141 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura aditiva. 3. automatização. 4. SLS/SLM. 5. Matlab. I. Lindolfo Weingaertner, Walter . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Wei Lin

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO APLICÁVEL PARA OS PROCESSOS SLS/SLM

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 29 de agosto de 2016.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr. Dr, Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr, Ing. Walter Lindolfo Weingaertner – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Milton Pereira,
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Aurélio da Costa Sabino Netto,
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Carlos Henrique Ahrens,
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau,
Universidade de São Paulo

Este trabalho é dedicado aos meus pais
Zhen Hua Lin e Fang Lin.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Walter Lindolfo Weingaertner pela grande oportunidade e orientação na realização desta dissertação.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pelo apoio e assistência que possibilitaram a realização deste trabalho de mestrado.

Aos professores do POSMEC pelo conhecimento transmitido nas aulas, em especial aos Prof. Carlos Alberto Martin e Prof. Rolf B. Schroeter.

Aos colegas do laboratório LMP-LASER, Dyonad Scolaro, Luiz Barbeta, Rodrigo Blodorn, Jhonattan Gutjahr, Leonardo Santana. Em especial, ao Cláudio Abílio da Silva, o Claudinho, o mestre de Garopaba, pelo conhecimento e experiência compartilhadas.

Agradeço aos colaboradores do laboratório LMP-LASER, em especial, Marina Mandelli e Isadora Ferrari, pelo conhecimento transmitido e grande ajuda na realização desta dissertação.

Agradeço ao Renan Gomes de Caiado Castro, colega do laboratório, pelo apoio durante desenvolvimento do protótipo e realização de testes.

Aos colegas do laboratório LMP, Déborah Tavares, Lúcio Galvão Mendes e Emilio Wrasse, por sua amizade e apoio durante esta jornada. Em especial, à Clarianne Natali de Campos, pela revisão da dissertação.

Ao colega do laboratório NeDIP Guilherme Loureiro, pela compartilhamento das informações e revisão da dissertação

Aos colegas do laboratório LabMat Maisa Topanotti Daros, pela disponibilização de amostra para realização de teste.

Ao mestre engenheiro João Rovaris e aos técnicos Carlos Coelho, Hélio Irineu, Valtair Garcez e Joe Schmitz pelo apoio durante as etapas de construção mecânica do projeto

Aos amigos deste minha graduação, Giana de Almeida e Vagner da Silva Pacheco, por sua amizade e pelo apoio durante escrita de dissertação.

Aos meus Pais, Zhen hua Lin e Fang Lin, pela minha criação e educação, sua constante motivação e incentivo são responsável por poder atingir os meus sonhos.

*“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções
que não davam certo.”*
(Thomas Alva Edison)

RESUMO

Atualmente, diversas pesquisas estão sendo feitas visando reduzir as restrições nas geometrias e na matéria-prima e peças resultantes de processos de fabricação. Uma das soluções encontradas é a manufatura aditiva, a tecnologia que gera o objeto por meio da adição de camada sobre camada, consolidando o objeto de acordo com as informações recebidas de um arquivo *CAD*. Entre as diversas possibilidades nesta nova tecnologia de fabricação, destaca-se o processo de sinterização/fusão seletiva a LASER (SLS/SLM), que constrói peças através da sinterização, ou fusão, da matéria-prima fornecida ao local de trabalho em forma de pó. A presente dissertação de mestrado descreve um sistema automatizado da câmara de construção para o processo SLS/SLM, a ser integrado em um equipamento munido de um LASER e formar assim um equipamento de manufatura aditiva por SLS/SLM. O objetivo principal deste desenvolvimento é o de permitir estudar formas de aplicação do pó metálico e verificar os processos preparativos necessários na fase anterior da aplicação da energia necessária para a sinterização/ fusão do pó metálico. Para desenvolvimento do protótipo utilizou-se as fases de Projeto Informacional e Conceitual do método PRODIP, para determinar a melhor solução do projeto. Para validar as soluções obtidas, o protótipo foi modelado e construído em: (a) Parte mecânica, o sistema de posicionamento de dois eixos necessário para o deslocamento dos distribuidor de pó e da mesa de construção; (b) Parte eletroeletrônica, que trabalha de forma integrada para decodificação das informações dos transdutores, controle lógico e orientação do processo; (c) Parte *software* foi projetada de tal, forma, para que possa ser modificada de acordo com diferentes condições e máquinas acopladas; (d) Interface de controle que é responsável pela comunicação entre o sistema e o usuário. O resultado obtido nos experimentos mostram que o *Software* é capaz de obter as leituras dos transdutores e é capaz de implementar as funções para a parte mecânica, por meio da eletroeletrônica e da interface de controle. Para validar o sistema, imagens obtidas dos ensaios de distribuição de material foram processadas no software *Matlab* e mostram que as camadas depositadas possuem características uniformes e satisfatórias para processos posteriores de sinterização ou de fusão.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, automatização, SLS/SLM, Controle, *Matlab*.

ABSTRACT

Nowadays, several studies are being made to reduce the constraints on geometry, raw materials and parts resulting from manufacturing processes. One of the solutions is the additive manufacturing, technology that generates an object by adding layer upon layer, consolidating the object according to the information received from a CAD file. Among the various possibilities in this new manufacturing technology, there is the process of selective laser sintering/melting (SLS / SLM), which builds components by sintering or melting the raw material supplied to the workplace in the form of powder. This dissertation describes an automated system construction chamber for the SLS / SLM process to be integrated into a machine equipped with a laser and thus form an additive manufacturing equipment for SLS / SLM. The main objective of this document is to enable the study of ways of applying the metal powder and the preparations procedures required in the previous phase of the application of the energy required for sintering / melting of the metal powder. For the prototype development was used Informational and Conceptual phases of PRODIP method to determine the optimal design solution. To validate the solutions obtained, the prototype was patterned and built in four parts: (a) mechanical part, the positioning system two axes of displacement required for the powder distributor and construction table; (b) electronics part that works seamlessly for decoding the information of the transducers, logic control and process guidance; (c) Software part have been designed in such way, so it can be modified according to different conditions and coupled machines; (d) control interface which is responsible for communication between the system and the user. The result obtained in the experiments show that the software is able to get the readings of transducers and is capable of implementing the functions for the mechanical part, through electronics and control interface. To validate the system, images obtained from the material distribution assays were processed using the Matlab software and show that the deposited layers have uniform characteristics and satisfactory for subsequent processes sintering or melting.

Keywords: Additive Manufacturing, Automatization, SLS/SLM, Control, Matlab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Esquemático de Manufatura aditiva. adaptado de [11].	30
Figura 2 - Fases da sinterização: (a) Partículas originais, (b) formação de "necks", (c) densificação, (d) isolamento dos poros. [14]	32
Figura 3 - Esquemático do processo SLS. [15]	34
Figura 4 - A influência do parâmetro de SLS. [19]	37
Figura 5 - Layout dos módulos de sistema <i>Sinterstation Pro</i> adaptado de [23]	39
Figura 6 - Princípio de funcionamento de sistema <i>Sinterstation Pro</i>	39
Figura 7 - Princípio de funcionamento da máquina SLS do EOSINT adaptado de [9]	40
Figura 8 - Sistema RenAM da empresa <i>Renishaw</i>	41
Figura 9 - Funcionamento do serie RenAM da empresa <i>Renishaw</i>	41
Figura 10- Funcionamento da máquina <i>LaserCUSING</i> da <i>Concept LASER</i>	42
Figura 11 - Funcionamento do modelo SLM 500 HL da empresa <i>SLM Solution</i>	42
Figura 12 - Princípio de funcionamento de série SLM da empresa <i>ReaLizer</i>	43
Figura 13 - Subdivisão de um sistema automatizado de movimentação. [25]	45
Figura 14 - O esquemático geral de um sistema automatizado de movimentação. Adaptado de [25] e [26].	46
Figura 15 - (A) Montagem de um fuso esfera e castanha, (B) O sistema de transmissão por correia e polias. Adaptado de [27] e [29]	47
Figura 16 - Mecanismo de pinhão e cremalheira com eliminação de folga. Adaptado de [27]	48
Figura 17 - Diagrama de bloco de um subsistema de comando/controle. [25]	49
Figura 18 - Análise qualitativa as camadas depositadas	51
Figura 19 - Camada uniforme :(A) Imagem preto e branco e (B) Gráfico tridimensional da camada uniforme	52
Figura 20 - Etapas do processo de desenvolvimento de método PRODIP adaptado de [35].	54
Figura 21 - Ciclo de vida do produto. [34]	55
Figura 22 - Função global	60
Figura 23 – Desdobramentos da função global	61
Figura 24 – Estrutura funcional.	62
Figura 25 - Esquemático de protótipo	65
Figura 26 - Conceito de Sistema de movimentação para deposição de pó	67
Figura 27 - Conceito de Sistema de movimentação para elevação da mesa de trabalho	67
Figura 28 - Desenvolvimento do protótipo	69
Figura 29 - Carenagem da máquina de gravação a LASER LS 2000 e montagem com protótipo [37].	70
Figura 30 - Visão geral do sistema: Alimentador de pó (a); Dispositivo de movimentação do alimentador de pó (b); Mesa de trabalho (c); Pistão e cilindro do volume de trabalho (d); Dispositivo de elevação do volume de trabalho (e); Estrutura da câmara de trabalho (f); Gabinete de controle (g); Rotâmetro (h)	71

Figura 31 - Primeira concepção para o dispositivo de movimentação do alimentador de pó	72
Figura 32 - Concepção final de dispositivo de movimentação do alimentador de pó: Anel de propulsão (a); Montagem da correia dentadas com as chapas com rebaixo (b); Alimentador de pó (c); Mesa de trabalho (d); Estrutura da câmara de trabalho (e); Atuador linear (f).....	73
Figura 33 - Imagem do dispositivo de movimentação do alimentador de pó: Anel de propulsão (a); Mesa de trabalho (b); Motor de passo (c); Acoplamento flexível (d).	74
Figura 34 - Atuador linear modelo M410DG e montagem do dispositivo de elevação do volume de trabalho	75
Figura 35 – (A) Esquemática e (B) Imagem dos componentes do pistão e cilindro do volume de trabalho: Cilindro do volume de trabalho (a); Pistão (b); Anel de fixação da camisa (c); Placa de sacrifício (d).....	76
Figura 36 – (A) Camisa elástica montada na base do pistão e na parte externa inferior do cilindro de trabalho (B) camisa elástica danificada.	77
Figura 37 - Esquema simplificado do gabinete elétrico.....	78
Figura 38 - As funções referente a cada pino do Arduino (A), a placa física (B) e o circuito da placa de controle (C). Adaptado do Arduino LLC (2015) [38].....	79
Figura 39 - Esquemático do <i>Driver</i>	81
Figura 40 - Conexões do C863 DC MOTOR CONTROLLER. Adaptado de [40].	81
Figura 41 - Fonte de alimentação 5V.....	82
Figura 42 – Placas de identificação das fontes: (A) modelo PUP55-14-B1-S da empresa PRO-TEK Eletronics Corpration; (B) modelo HEG42-150300-7 da empresa HiTRON electronics Corporation.....	83
Figura 43 – Esquema do Circuito de intertravamento	84
Figura 44 - Esquema de IHM	85
Figura 45 - PCI de controle: (A) Circuito; (B) PCI	86
Figura 46 - Painel de controle da mesa de elevação (eixo vertical). [41]	87
Figura 47 - Interface de programação do Arduino Software IDE.....	88
Figura 48 - O fluxograma da função Setup.....	89
Figura 49 - Esquema da função Loop.....	90
Figura 50 - Esquema da função ajuste	90
Figura 51 - Esquema da função do movimento	91
Figura 52 - Interface principal do Software PIMikroMove. [41].....	92
Figura 53 - Interface de programação de macros, adaptado de Physik Instrumente (PI) GmbH (2005) [41].....	93
Figura 54 - Esquema dos macros do sistema de elevação do pistão	94
Figura 55 – Dispositivo de deposição de pó metálico com movimentação angular, com dois reservatórios (A) e com um reservatório (B).	95
Figura 56 - Processo de distribuição do pó metálico	97
Figura 57 - Dimensão da placa de vidro	98
Figura 58 – Detalhe do distribuidor de pó com reservatório retangular.	99
Figura 59 - Experimento para verificar o ângulo de escorregamento	100

Figura 60 - Imagem do reservatório com os dois planos inclinados	101
Figura 61 - (A) Dimensões e (B) Imagem do distribuidor de pó	102
Figura 62 - Superfície inferior da caixa de vidro lapidada.....	103
Figura 63 - (A) Montagem da placa de sacrifício na pistão, (B) imagem real da pistão e (C) placa de sacrifício.....	104
Figura 64 – Rotâmetro (Medição da vazão com um flutuador em um tubo cônico).....	105
Figura 65 - (A) Imagens da camada depositada de pó de ferro com material não peneirado e (B) pós metálicos de diâmetro médio 60,22 μm	109
Figura 66 - Comparação das camadas distribuídas com material de (A) 35 a 63 μm , (B) 63 a 90 μm , (C) 25 a 90 μm e (D) 90 a 120 μm	113
Figura 67 - (A) Imagem em preto-e-branco e (B) gráfico de tridimensional obtido na matlab	114
Figura 68 - (A) O rotâmetro de oxigênio, (B) distribuição de material com presença da umidade no ambiente e (B) oxidação das peças.	115
Figura 69 - Fraturas nos cantos agudos dos vidros inclinados do reservatório de pó (A); Vazamento de pó de aço nos contornos de reservatório de pó (B); Riscos presentes nas camadas depositadas (C) e (D).	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Materiais tipicamente utilizados no processo SLS/SLM. [13], [17].....	35
Tabela 2 Característica entre duas máquinas comerciais	43
Tabela 3 Necessidades dos clientes	56
Tabela 4 Requisitos dos clientes	57
Tabela 5 Requisitos de projeto.....	58
Tabela 6 Especificações do projeto.....	59
Tabela 7 - Combinações das soluções.....	63
Tabela 8 Matriz de decisão	64
Tabela 9 Dados dos experimentos	110
Tabela 10 Cálculo das densidades aparentes	111
Tabela 11 Teste de rendimento	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões ou bidimensional
3D	Três dimensões ou tridimensional
CAD	Projeto Assistido por Computador (<i>Computer-Aided-Design</i>)
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
GND	<i>Ground</i> , denominação do potencial 0V em um circuito
I/O	<i>Input e Output</i>
LASER	Amplificação de Luz por Emissão Estimada de Radiação (<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MA	Manufatura Aditiva
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
PC	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
PCI	Placa de Circuito Impresso
QFD	Desdobramento da Função Qualidade (<i>Quality Function Deployment</i>)
RP	Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
SLM	Fusão Seletiva a LASER (<i>Selective LASER Melting</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a LASER (<i>Selective LASER Sintering</i>)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	Barramento Serial Universal (<i>Universal Serial Bus</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo geral.....	26
1.1.2	Objetivos específicos.....	26
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	ESTADO DA ARTE	29
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	29
2.1.1	Manufatura aditiva	29
2.1.2	Processo de sinterização.....	31
2.1.3	Processo de LASER seletivo.....	32
2.1.4	Materiais.....	34
2.1.5	Parâmetros do processo SLS/SLM.....	35
2.1.6	Vantagens e desvantagens do processo SLS/SLM.....	37
2.1.7	Máquinas comerciais de SLS	38
2.2	SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MOVIMENTAÇÃO	45
2.2.1	Mecanismo de transmissão.....	46
2.2.2	Comando/ controle.....	48
2.2.3	Acionamentos eletromecânicos	49
2.3	MÉTODO PARA ANÁLISE DA CAMADA DE PÓ DEPOSITADA SUPERFÍCIE DISTRIBUÍDA	50
3	METODOLOGIA	53
3.1	PROJETO INFORMACIONAL	54
3.1.1	Requisitos dos clientes	54
3.1.2	Requisitos de projeto.....	57
3.1.3	Especificações do projeto.....	58
3.2	PROJETO CONCEITUAL	60
3.2.1	Função global do projeto.....	60
3.2.2	Estrutura funcional.....	60
3.2.3	Princípio de solução	63
3.2.4	Concepção do sistema protótipo.....	65
4	CONSTRUÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	69
4.1	PARTE MECÂNICA	69
4.1.1	Estrutura da câmara de trabalho	70
4.1.2	Dispositivo de movimentação do alimentador de pó	71
4.1.3	Dispositivo de elevação do volume de trabalho	74
4.1.4	Acionamento	75
4.1.5	Pistão e cilindro do volume de trabalho	76

4.2	COMANDO E CONTROLE ELETRO-ELETRÔNICO	78
4.2.1	Placa de controle	79
4.2.2	Drivers de acionamento	80
4.2.3	Fontes de alimentação	82
4.2.4	Circuito de intertravamento	83
4.3	INTERFACE DE CONTROLE.....	84
4.3.1	Interface Homem Máquina (IHM)	85
4.3.2	Painel de controle da mesa de elevação (eixo vertical).....	86
4.4	SOFTWARE.....	87
4.4.1	<i>Arduino Software IDE</i>	88
4.4.2	<i>PIMikroMove</i>	92
5	CONSTRUÇÃO E DESCRIÇÃO DO DISTRIBUIDOR	
	DE PÓ METÁLICO	95
5.1	PARTE DE DISTRIBUIÇÃO.....	95
5.1.1	Placa e Distribuidor.....	97
5.1.2	Placa de sacrifício	103
5.1.3	Pistão.....	103
5.1.4	Alimentação de gás no volume de trabalho	104
6	RESULTADOS DE PREENCHIMENTO DA	
	CAVIDADE DE TRABALHO.....	107
6.1	POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE	
	ALIMENTAÇÃO COM LASER E EXPERIMENTO DE	
	DISTRIBUIÇÃO DE PÓ.....	107
6.2	COMPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA CAMADA	
	DEPOSITADA	108
6.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE	
	DISTRIBUIÇÃO DE PÓ.....	114
7	CONCLUSÃO.....	117
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119

1 INTRODUÇÃO

O termo Manufatura Aditiva designa um conjunto de tecnologias usadas para fabricação de peças a partir de dados do modelo 3D gerado por projeto assistido por computador (*Computer Aided Design*, CAD) sem empregar as ferramentas e os processos de usinagem tradicionais.

Entre os principais processos de manufatura aditiva, destaca-se os processos de sinterização seletiva e o processo de fusão seletiva a LASER. Nestas tecnologias, a matéria-prima em forma de pó ou de partículas pequenas é sinterizada ou fundida em regiões preestabelecidas em um leito no qual o pó é aplicado camada a camada. Esta permitem trabalhar com vários tipos de materiais; dispensam pós-processamento e pós-cura; não necessitam de estrutura de suporte; possibilitam a fabricação de várias peças simultaneamente, ocupando de forma maximizada o volume de trabalho; permitem tanto a fabricação de protótipo para visualização quanto a fabricação de peças funcionais [1].

Uma das linhas de pesquisa na área de fabricação do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) da UFSC concentra as atenções para a automatização e integração de processos de manufatura, visando melhorar a estrutura produtiva nas tecnologias convencionais (torneamento, fresamento, furação, retificação.) e não convencionais. Entre os processos na área de fabricação não convencional destacam-se o desenvolvimento de sistemas para a aplicação do LASER como fonte de calor para diversos processos de fabricação, esta linha de atuação tem sido tema de pesquisa no Laboratório de Mecânica de Precisão de divisão de pesquisas avançadas em tecnologia LASER (LMP-LASER).

Em virtude da crescente demanda nestas áreas, propõe-se desenvolver um sistema de alimentação e distribuição de camada de pó metálico a ser aplicado em uma máquina para processo de sinterização/fusão seletiva a LASER composto de um sistema de movimentação automatizado e CNC (Comando Numérico Computadorizado). O desenvolvimento foi feito em três partes: (1) concepção da estrutura mecânica (elaborado no escopo da disciplina Projeto Integrador do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC), (2) adequação da estrutura mecânica para que esta possa ser integrada em uma máquina de marcação LASER comercial (produto da WELLE LASER, empresa especializada em máquinas LASER e parceira do LMP no escopo do projeto FINEP Rede Metalúrgica) e (3) automatização e integração do sistema, atendendo aos requisitos como controles flexíveis e precisão de posicionamento, objetivo desta dissertação de mestrado.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho são divididos em duas partes: objetivo geral e objetivos específicos, como apresentados em seguir.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é projetar e um sistema de movimentação integrado que exerce as funções de distribuição de partículas e deslocamento da mesa de construção 3D acoplada a uma câmara de elevação para máquina de Sinterização/Fusão Seletiva a LASER, aplicando tecnologias das áreas de mecânica, eletroeletrônica e automação de controle.

1.1.2 Objetivos específicos

Visando o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar os sistemas de distribuição de pó metálico e de elevação da mesa de trabalho nos equipamentos comerciais;
- b) projetar e estruturar o sistema de distribuição das partículas;
- c) analisar a possibilidade de integrar o equipamento com o *software* da máquina LASER, propondo soluções flexíveis e modulares;
- d) avaliar a qualidade da superfície da camada depositada e distribuída sobre a área de trabalho para distintas condições de ajuste de movimento da distribuição das partículas;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida em oito capítulos. O capítulo 1 apresenta um breve introdução ao trabalho, como também, os objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica relacionado aos temas do projeto. Nesta fase são abordadas informações do processo de fabricação e dos sistemas automatizados de movimentação.

O capítulo 3 apresenta a metodologia empregada durante o desenvolvimento do projeto, descrevendo principalmente as etapas do Projeto Informacional e Conceitual.

O capítulo 4 descreve o sistema protótipo constituído por quatro subsistemas: (1) Mecânico – Estruturas da câmara de construção, posi-

cionadores e acionamentos; (2) Eletroeletrônica – Placa de controle, circuitos intertravamentos, drivers de acionamento e fonte de alimentação; (3) Interface de controle – IHM e painel de controle; (4) Software - Software Arduino e PIMikroMove.

No capítulo 5 apresenta-se os componentes do sistema de distribuição de pó: A base de vidro e o reservatório de vidro para o pó metálico; o sistema de movimentação do reservatório de pó metálico; a mesa de elevação que permite a aplicação das camadas a ser distribuídas.

O capítulo 6 descreve-se o experimento e os resultados obtidos, oferecendo informações para avaliar as vantagens e desvantagens do protótipo construído e sua funcionalidade como câmara de construção para equipamento de SLS/SLM.

A conclusão desta dissertação de mestrado é apresentada no capítulo 7, e sugestão para trabalhos futuros no capítulo 8. As referências, apêndices e anexos se localizam no final deste documento.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentadas as principais informações da literatura exposta em duas partes: informações sobre o processo de fabricação e informações sobre sistemas automatizados de movimentação.

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Os processos de fabricação para geração de peças tridimensionais a partir de matéria-prima podem ser divididos em três tipos: (1) conservativo (no qual o volume de material se mantém constante durante o processo), onde o material é conformado através da aplicação de forças para obter forma requerida; (2) subtrativo, onde a peça é obtida pela remoção do material de um bloco maciço; (3) aditivo, onde o objeto é formado pela adição sucessiva de material. [2]

As tecnologias baseadas no tipo aditivo foram inicialmente denominadas de Prototipagem Rápida (RP – *Rapid Prototyping*), O primeiro equipamento comercial foi desenvolvido no final da década de 80 com o progresso em tecnologias de LASER, fotopolímero, modelagem CAD, entre outras. No entanto, com avanço de tecnologia Sinterização Seletiva a LASER (SLS – *Selective LASER Sintering*) e Fusão Seletiva a LASER (SLM – *Selective LASER Melting*), o termo Manufatura Aditiva é mais utilizado para determinar os equipamentos que fabricam peças baseadas em processo de junção de material a partir de dados do modelo 3D, usualmente empilhamento de camadas. [3]–[7].

2.1.1 Manufatura aditiva

A Manufatura Aditiva é um processo de fabricação que se caracteriza pela adição de material em forma de camadas sucessivas, ou seja, baseado no princípio da manufatura por camada. Esta tecnologia permite fabricar componentes, protótipos e modelos em 3 dimensões (3D), com informações obtidas pelo sistema CAD, de forma rápida, automatizada e flexível. [7]–[9]

O processo inicia com o “fatiamento” eletrônico do modelo 3D da peça CAD, obtendo-se os contornos em cada camada de nível 2D que define a presença ou não do material na área de trabalho. Estas camadas

são processadas sequencialmente, gerando a peça física por meio de empilhamento e aderência das camadas, como ilustrado na Figura 1.[10]

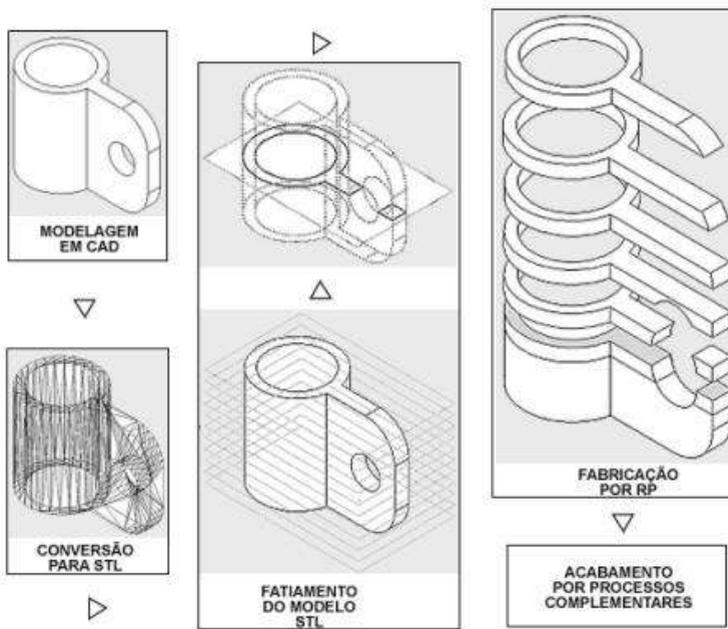


Figura 1 -Esquemático de Manufatura aditiva. adaptado de[11].

Segundo Volpato et al. ,2007, existem mais de 20 sistemas de manufatura aditiva no mercado que se baseiam no mesmo princípio de manufatura por camada, usando diferentes tecnologias de adição de material. De acordo com o ASTM International (2013) [5] os principais processos são separados em sete grupos dependendo o processo de fabricação e o estado inicial da matéria-prima utilizada:

(1) Jateamento de ligante (*Binder jetting*), o processo produz peças através da deposição de líquidos ligantes nas materiais em pó de forma seletiva;

(2) Deposição de energia direcionada (*directed energy deposition*), o processo focada em utilização da energia térmica para fundir materiais depositados;

(3) Extrusão de material (*material extrusion*), construção de objeto baseado em deposição de um material por extrusão;

(4) Jateamento de material (*material jetting*), construção de peça baseado em jateamento seletiva das gotículas de matéria-prima;

(5) Fusão sobre leito de pó (*powder bed fusion*), o processo que constrói peças fundindo seletivamente as regiões da camada de pó;

(6) Adição de laminados (*sheet lamination*), construção da peça baseada em junção das matérias laminadas;

(7) Fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*), que produz as peças por meio de processo de cura da fotopolímero líquido.

2.1.2 Processo de sinterização

Segundo Suk-Joong[12], a sinterização é uma técnica de processamento utilizados para produzir materiais e componentes de densidade controlado através de aplicação da energia térmica sobre pó metálico ou/ cerâmico. Melorose[13], afirma ainda que a sinterização é um termo na área de metalurgia de pó e descreve processamento de material por meio de aplicação de determinada pressão e temperatura por um período de tempo. O percentual, o tamanho e o formato (geometria) dos poros dependem de todos os parâmetros do processo, inclusive das características e propriedades das matérias-primas utilizadas na produção dos componentes.

De um modo geral, a sinterização é um termo usado para descrever a coalescência de uma partícula sólida em pó (metal, cerâmica ou polímero) a uma temperatura elevada abaixo da temperatura de fusão do material. A coalescência é o princípio físico da formação de um corpo uniforme e homogêneo pela fusão de partículas do mesmo material. A coalescência pode ser acelerada se o pó for compactado antes do tratamento térmico de sinterização [14].

A sinterização a LASER é dividida em três fases distintas: a formação de “*necks*” (pescoços) que ocorre quando o pó, ao receber energia do LASER, tem seus átomos excitados fundindo-se em pontos na superfície de contato; A densificação, que aumenta os contatos e diminui a porosidade; O isolamento e arredondamento dos poros. O processo é ilustrado na Figura 2. [9], [14]–[16].

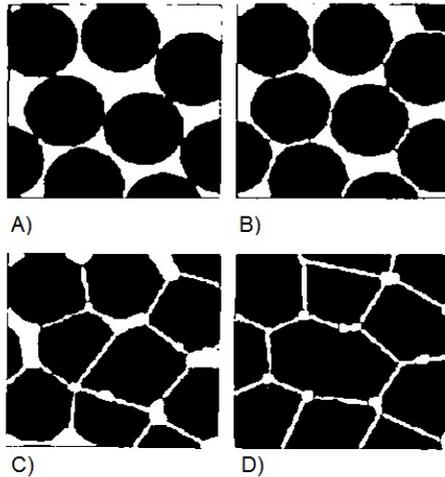


Figura 2 - Fases da sinterização: (a) Partículas originais, (b) formação de "necks", (c) densificação, (d) isolamento dos poros. [14]

2.1.3 Processo de LASER seletivo

O termo processo de LASER seletivo é usado para descrever o processo de Sinterização Seletiva a LASER(SLS) e Fusão Seletiva a LASER(SLM). O Melorose[13] dividem o processo de SLS em três categorias:

- (1) SLS do pó de polimérico, em que o material polimérico é processado pela temperatura relativamente baixa (até 200°C), a câmara da máquina é projetada para pré-aquecer o ambiente de trabalho até próximo da temperatura de fusão de material, O LASER apenas contribui uma pequena diferença da energia a fim de provocar a sinterização;
- (2) SLS indireta de metais, em que o processo aproveita a tecnologia SLS do pó de polimérico para fabricar as peças metálicas, as ligações entre as partículas são estabelecidas por meio de derretimento dos materiais poliméricos revestidas nas partículas metálicas;
- (3) SLS direta de metais, em que pó a ser processado é a mistura de materiais de alto e baixo pontos de fusões, durante o processo somente o material de ponto de fusão baixo é fundido pela fonte de energia e estabelece a ligação com o material de ponto de fusão elevado formando a estrutura sólida.

SLM é um aprimoramento de SLS direta de metais. As principais diferenças são os materiais utilizados e o processo de fusão. Os materiais utilizados são de aço inoxidável, aço de ferramentas e ligas à base de níquel, titânio, e ligas de alumínio, sem quaisquer aditivos. Estes materiais são completamente fundida no processo através do uso de lasers de estado sólido (diodo de Nd: YAG) com potências de laser até 500 W. Através da combinação dos parâmetros do processo, a camada de pó é derretida completamente e camada anterior parcialmente para realizar a aderência entre camadas[13].

O processo de sinterização/fusão seletiva a LASER foi desenvolvido e patenteado pela Universidade do Texas, EUA, e a empresa DTM Corporation foi fundada em 1987 para viabilizar sua comercialização. O primeiro equipamento foi comercializado em 1992. No entanto, em 2001 a empresa 3D Systems, Inc. comprou a empresa DTM Corporation e passou a deter os direitos dessa tecnologia. Em 1994, a empresa EOS GmbH, da Alemanha, lançou seu primeiro equipamento com tecnologia de prototipagem rápida que possui seu princípio de fabricação praticamente o mesmo da tecnologia SLS da 3D System, o sistema EOSINT, porém, esta solução oferece um equipamento dedicado a cada tipo básico de material [1]; [3]; [15]; [16].

Segundo Ajata[19] e Klahn[20], o processo SLS é uma técnica de fabricação por manufatura aditiva que utiliza matéria-prima em pó para fabricar peças 3D, camada por camada, utilizando a energia de um LASER para fundir e unir as partículas de pó de forma seletiva, como ilustrado na Figura 3.

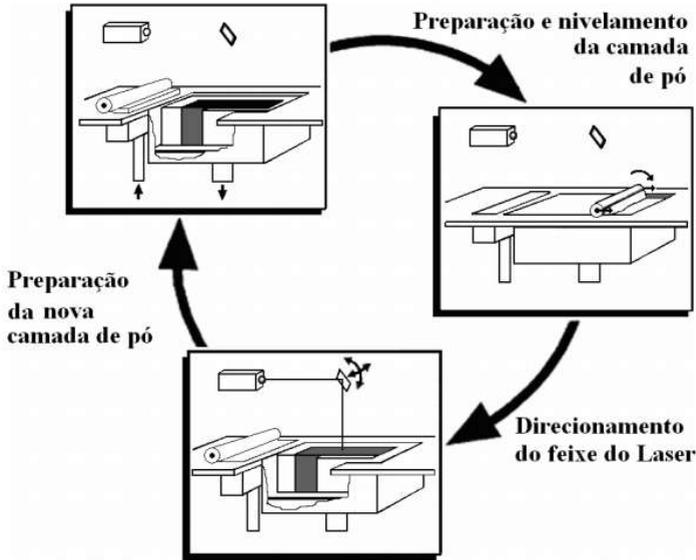


Figura 3 - Esquemático do processo SLS. [15]

A fabricação da peça pode ser dividida em 4 etapas:

- O pré-processamento da informação geométrica e estrutural da peça;
- A adição da matéria-prima ou mistura no depósito de pó no interior da câmara de alimentação;
- A deposição de uma fina camada de pó no interior da câmara de construção por meio do deslocamento de um mecanismo sobre a mesa de construção. A seguir, um feixe de LASER é direcionado para percorrer uma trajetória predefinida no computador, realizando a sinterização, posteriormente com repetição do processo nas camadas subsequentes, até completar a fabricação da peça.
- A fabricação da peça é finalizada com a retirada do pó não sinterizado e acabamento de superfície da peça.

2.1.4 Materiais

Os materiais utilizados no processo SLS são divididos em classes: poliméricos, metálicos e cerâmicos. Estes três tipos de materiais possuem características diferentes e, geralmente são oferecidos pelo fabricante da máquina junto com o parâmetro de entrada que garante o funcionamento

correto do equipamento. Exemplo desses materiais são citados na Tabela 1.[7], [21]

Tabela 1 Materiais tipicamente utilizados no processo SLS/SLM. [13], [17]

Tipo de material	Materiais mais utilizados
Poliméricos	Acrílico, Acrílico-estireno, Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Policarbonato, Poliamida
Metálico	Cu, Fe, Ti-6Al-4V, Aço inoxidável 17-4 PH, inconel 625, Aço ferramental, Aço liga
Cerâmico	Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ , SiC, ZSiO ₄ , hidroxiapatita, Quartzo, Vidro

Os materiais poliméricos foram as primeiras classes de materiais processados por manufatura aditiva. As poliamidas são o material preferido para processo de sinterização de matérias poliméricas a LASER. Embora pertençam a mesma, a poliamida utilizada nesse processo é diferente daquelas utilizadas na injeção plástica na indústria. O processo de sinterização a LASER utiliza principalmente a poliamida 11 ou 12, com um tamanho de partícula em torno de 20 a 50 μm [2], [7], [9].

A Sinterização Seletiva a LASER de materiais cerâmicos ainda requer desenvolvimentos e pesquisas mais detalhadas para o sucesso da tecnologia de fabricação em camadas. Embora pertença a uma das famílias de materiais empregados em processo SLS, as aplicações cerâmicas são pouco difundidas[2].

A sinterização e fusão seletiva a LASER são os métodos de fabricação aditiva que mais utilizam os materiais metálicos dentre dos métodos de manufatura aditiva. O material de adição são fornecidos na forma de pó com uma granulometria de 20 a 30 μm , segundo Gebhardt[7] e de 45 a 60 μm de acordo Venuvinod e Ma[2] e Ready e Farson[21].

2.1.5 Parâmetros do processo SLS/SLM

Os parâmetros mais importantes para fabricação da peça através do processo SLS são [1], [9]:

- a) A potência do LASER: dependendo da matéria-prima a ser processada é utilizado um LASER CO₂ com comprimento de onda em torno de 10 μm de média potência entre 25 a 200 W ou LASER de estado solido (diodo Nd:YAG) de potência acima de 500W [8], [13].
- b) A temperatura do pó na câmara de construção 3D: para obter a sinterização desejada, em alguns materiais como os cerâmicos, é recomendado que a câmara de construção esteja de 10 a 20 °C abaixo da temperatura de fusão do material cristalino e em temperatura de transição vítrea para materiais amorfos. Já para as ligas mais comuns de materiais metálicos, existe uma tendência em se trabalhar com o material na temperatura ambiente, eliminando assim a necessidade de mecanismos para controlar a temperatura em pó. [1], [22].
- c) A velocidade de deslocamento do feixe, a quantidade de energia está sendo entregue às partículas da matéria-prima que devem sempre ser consideradas em conjunto com a potência do LASER e com o diâmetro do feixe sobre a área de trabalho. O uso de uma velocidade reduzida pode causar um excessivo aquecimento do pó, devido ao fornecimento de uma maior quantidade de energia ao material, podendo causar falha como empenamento, aumento da densidade e até degradação do material. Por outro lado, o uso de uma velocidade alta diminui a sinterização de material e impossibilita a aderência das camadas.
- d) A profundidade de sinterização ou espaçamento entre camadas: o parâmetro que afeta a sobreposição das passadas auxiliares na fusão do material proporcionando uma união homogênea entre camadas, como ilustrado na Figura 4.
- e) A estratégia de varredura do LASER sobre a camada: o modo de varredura que o feixe de LASER une a camada de pó. Trajetórias diferentes podem ocasionar diferentes taxas de transferência de calor ao material e alterar a profundidade de fusão. Estas variações podem causar mudanças nas propriedades mecânicas e no acabamento da superfície das peças.
- f) O tamanho, a forma e a distribuição do pó a ser processado exercem influência na densidade de empacotamento e rugosidade na superfície da camada de pó.

- g) Atmosfera controlada, durante o processo, dependendo material de pó a ser processado, a atmosfera da área de trabalho é necessário ser isolada e controlada.

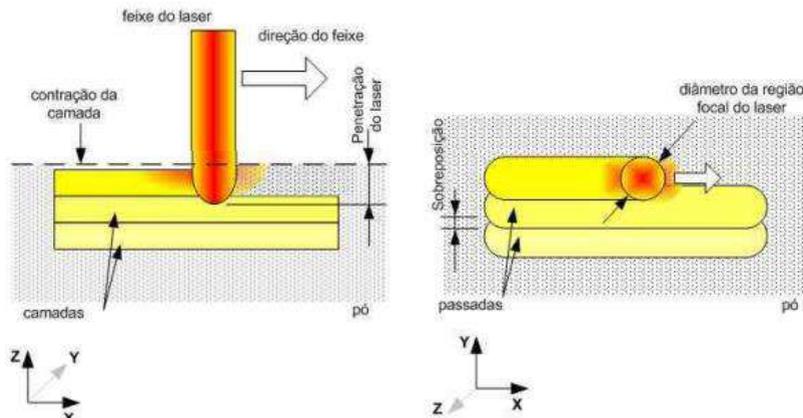


Figura 4 - A influência do parâmetro de SLS. [19]

2.1.6 Vantagens e desvantagens do processo SLS/SLM

As vantagens do processo do SLS são:

- (1) Permitir trabalhar com qualquer material em forma de pó que possa estabelecer ligação entre partículas através da sinterização ou da fusão;
- (2) Os materiais serem atóxicos;
- (3) Não necessitar de estrutura de suporte;
- (4) A margem de precisão serem em torno de $\pm 0,05$ a $0,25$ mm;
- (5) Em muitos casos, as peças saem da câmara de construção já funcionais e podem ser testadas como protótipo ou modelo conceitual;
- (6) Automatizar processos de fabricação.[3]

Por outro lado, as desvantagens do processo de SLS são:

- (1) A precisão da peça dependerem do tamanho e da complexidade;
- (2) a peça apresenta rugosidade elevada no acabamento das superfícies quando comparada com peças obtidas pelo processo de estereolitografia;
- (3) O equipamento tem custo elevado;
- (4) A aderência do pó em regiões confinadas dificultar a limpeza da peça fabricada;

(5) O processo requerer uma atmosfera inerte e isolada, para evitar oxidação e explosão, dependendo do tipo de material.[3]

2.1.7 Máquinas comerciais de SLS

Segundo Gibson[9], diversas empresas como 3D *System* (França/USA), EOS (Alemanha), *Renishaw* (UK), *Concept LASER* (Alemanha), *SLM Solution* (Alemanha) e *Realizer* (Alemanha) fabricam e comercializam as máquinas com processo de LASER seletivo.

A empresa *DTM Corporatio*, USA lançou em 1992 o primeiro modelo da máquina SLS, o *Sinterstation 2000*. Posteriormente, outros modelos foram projetados Estes sistemas são fabricados e fornecidos pela empresa 3D *Systems*, USA, que comprou a DTM em 2001. As máquinas mais recentes oferecem várias melhorias em relação aos sistemas anteriores, em termo de precisão da peça, uniformidade da temperatura, velocidade de construção, repetibilidade de processo, definição de recurso e acabamento de superfície. Porém, as características básicas de processamento e configuração do sistema permanecem inalteradas.

A plataforma do sistema *Sinterstation Pro* mais recente utiliza um design modular em que, a plataforma de construção pode ser removida para um local diferente da parte de resfriamento e de aquecimento, permitindo que o novo módulo de construção possa ser inserido e usado com o mínimo de tempo de inatividade. O layout dos módulos de sistema *Sinterstation Pro* é composto por sete módulos: o sistema SLS *Sinterstation pro*, que fabricar as peças a partir de dados 3D CAD; o módulo de troca rápido (*Rapid Change Module, RCM*), módulo de construção montado sobre esteira para facilitar e acelerar a transporte entre módulos *Sinters-tation pro*, *OTS* e *BOS*; o módulo de alimentação de nitrogênio (*Nitrogen Generator*), que alimenta continuamente o nitrogênio para os sistema SLS; a estação térmica off-line (*Offline Termal Station, OTS*), que responsável pelo pré-aquecimento do RCM antes de ser carregado no sistema SLS e resfria-lo após uma construção foi concluída; a estação de retirada das peças (*Break Out Station, BOS*), onde as peças construídas são removidas do RCM e os pós não sinterizados são transferidos para o IRS; A estação integrada de reciclagem (*Integrated Recycling Station, IRS*) realiza a mistura dos pós reciclados com os pós novos e transferência de materiais misturados para o sistema SLS; O alimentador de pó inteligente (*Intelligent Powder Cartridge, IPC*) carrega os pós para o IRS e fornece automaticamente as informações de matéria-prima para o sistema SLS. Na Figura 5 ilustra layout dos módulos de sistema *Sinterstation Pro*.

Vários tamanhos de plataforma automatizada estão disponíveis para reciclagem e alimentação de material em pó. Há um melhor controle térmico de circuito fechado do que em máquinas de SLS de modelos anteriores.[23].

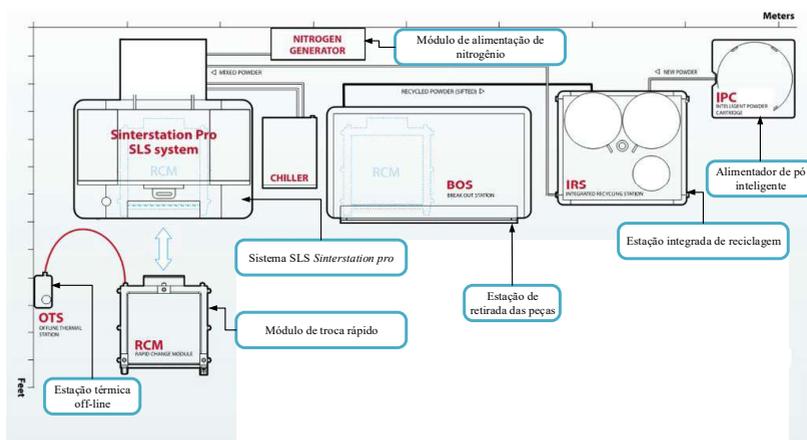


Figura 5 - Layout dos módulos de sistema *Sinterstation Pro* adaptado de [23]

A Figura 6 mostra o princípio de funcionamento do volume de trabalho e distribuidor de pó do sistema *Sinterstation Pro*.

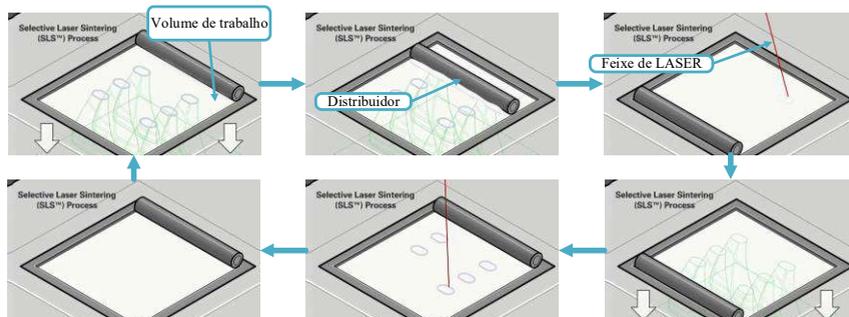


Figura 6 - Princípio de funcionamento de sistema *Sinterstation Pro*. [24]

A empresa alemã *EOS GmbH* adotou uma abordagem diferente da empregada pela *3D System* na concepção das suas máquinas de SLS. As máquinas da *EOS* são projetadas para processar um tipo de material para cada modelo de máquina. Em 1994, foi lançado o primeiro modelo da máquina *EOSINT P* para produção de protótipos de material plástico. No

ano seguinte, a empresa lançou o modelo EOSINT M 250 para a produção direta de moldes de metais fundidos. Em 1998, o modelo EOSINT M 250 *xtended* foi lançado com a tecnologia de Sinterização de metal direta a LASER (DMLS, *Direct Metal LASER Sintering*). Este processo de sinterização de material de forma direta não necessita do pré-aquecimento durante a construção da peça. Estas máquinas utilizam uma mistura de liga especial composta por bronze e níquel desenvolvidos pela *Electrolux Rapid Prototyping* e licenciado exclusivamente para a EOS. A Figura 7 mostra o princípio de funcionamento da máquina SLS da empresa EOSINT[9], [25].

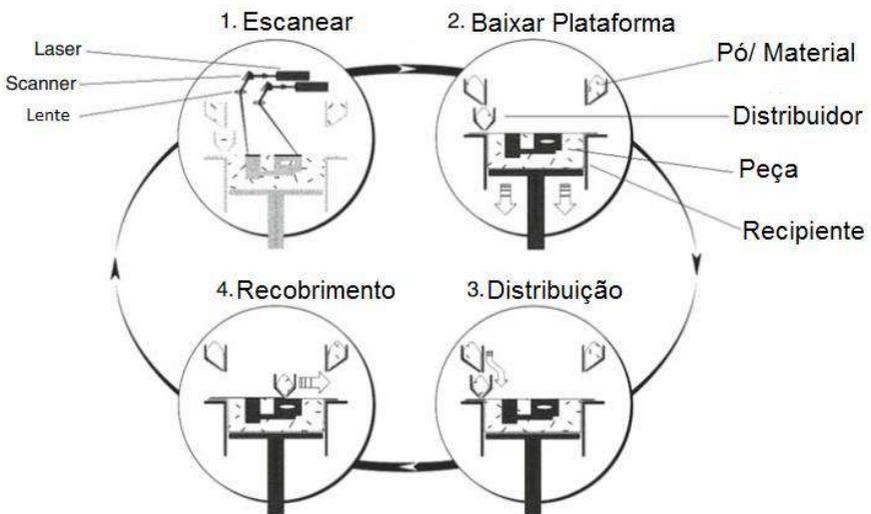


Figura 7 - Princípio de funcionamento da máquina SLS do EOSINT adaptado de [9]

A empresa Britânica *Renishaw* desenvolveu equipamento que reduzir significativamente o tempo de interferência de operador através do sistema de recirculação e peneiramento do material de pó. A segurança do processo de emissão é controlada pelo filtro *dual SafeChange*, detectar e redirecionar a recirculação de gás para manter desempenho ideal e limpeza da câmara. O sistema RenAM (Figura 8) possui características como baixo consumo de gás e método de geração de atmosfera patenteado, proporcionando a maior produtividade e desempenho sem comprometer a qualidade da peça produzida. A Figura 9 mostra o funcionamento do sistema RenAM.



Figura 8 - Sistema RenAM da empresa *Renishaw*. Adaptado de [26]

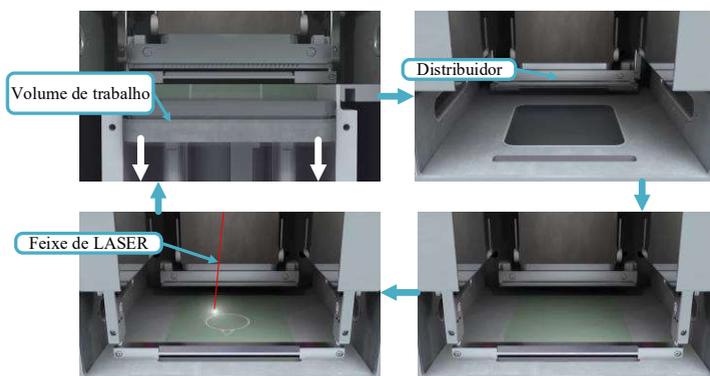


Figura 9 - Funcionamento do serie RenAM da empresa *Renishaw*. Adaptado de [27]

A empresa *Concept LASER* desenvolve a máquina de conceito padrão e sob medida, a separação da câmara de processo e espaço de manuseio facilita a operação e garante segurança do processo, o modelo *Laser-Cusing* trabalha com método de distribuição de pó (Figura 10), que forneça uma redução significativa em tensões no interior da peça produzida, o qual diminuem deformação nas peças de grande volume sólido. [28]

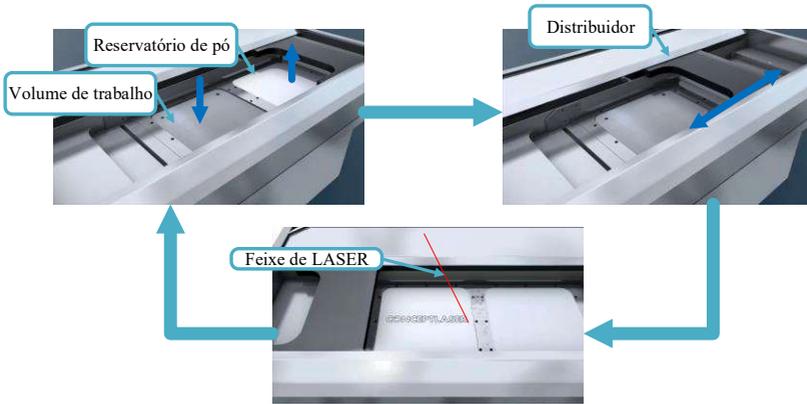


Figura 10- Funcionamento da máquina *LaserCUSING* da *Concept LASER*.
Adaptado de [29]

O modelo SLM 500 HL da empresa *SLM Solution* possui características de capacidade de construção elevada e tecnologia de *quad Laser*, ou seja, o sistema pode ser configurado para utilização do conjunto de duas ou quatro feixe de LASER no mesmo ambiente de construção. O sistema de alimentação de pó é automatizado entre sistema SLM e módulo de peneiramento, Os pós metálicos é peneirados e depositados de forma contínua, diminuindo máximo possível o tempo de reabastecimento de pó para sistema. A Figura 11 mostra o funcionamento do equipamento da empresa *SLM Solution*. A tecnologia de distribuidor bidirecional economiza 50% tempo de produção. A combinação de quatro feixe de LASER deixa área de sobreposição indetectável. [30]

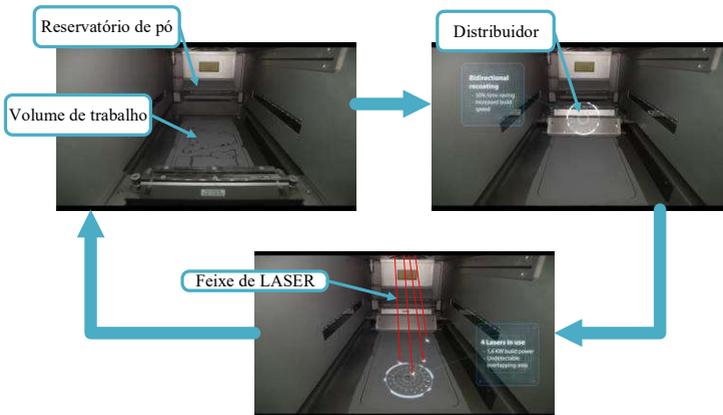


Figura 11 - Funcionamento do modelo SLM 500 HL da empresa *SLM Solution*.
Adaptado de [31]

O modelo SLM300i da empresa *Realizer* foi projetado para utilização em laboratório e industrial, o volume de trabalho de 300x300x300 mm pode ser utilizado para produzir o número máximo de peças. O sistema de cartuchos desenvolvida recentemente diminuem a conversão de material não mais do que duas horas. A Figura 12 mostra o princípio de funcionamento de distribuidor com raspador duplo de movimentação do equipamento SLM da empresa *Realizer*. [32]

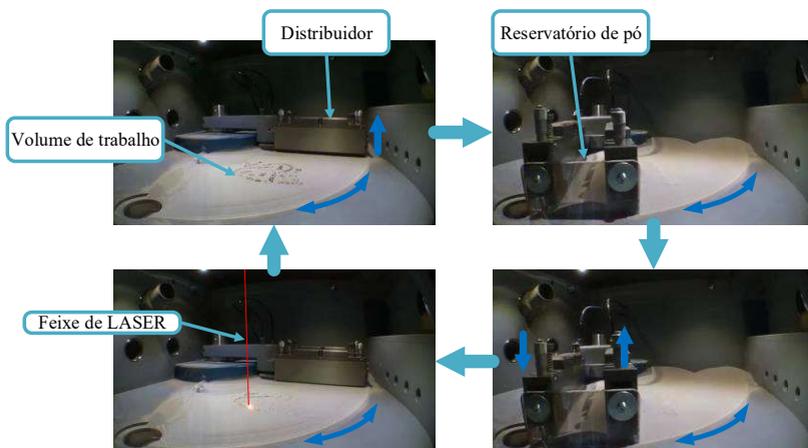


Figura 12 - Princípio de funcionamento de série SLM da empresa *Realizer*. Adaptado de [33]

A Tabela 2 resume as características dos modelos comerciais de dois principais fornecedores que projetam máquinas de processo SLS.

Tabela 2 Característica entre duas máquinas comerciais

Empresa	EOS		3D System
CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS	EOS M 400	EOSINT 800P	Sinterstation Pro 230
Tipo de LASER	Laser de fibra Ytterbium	CO2	CO2
Potência do LASER [W]	1000	50	70
Dimensão da câmara de construção [mm]	400x400x400	700x380x560	550x550x750
Espessura da camada [mm]	0.12	0.12	0.1
Velocidade do Escaneamento	7m/s	Acima de 12m/s	10m/s

Continue da página anterior

Tipo de distribuidor	Raspador bidirecional com duas entradas da alimentação de pó	Raspador bidirecional com duas entradas da alimentação de pó	Raspador bidirecional com duas entradas da alimentação de pó
----------------------	--	--	--

Empresa	<i>Renishaw</i>	<i>Concept LASER</i>
CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS	RenAM 500	X Line 200 R
Tipo de LASER	Laser de fibra Ytterbium	Laser de fibra
Potência do LASER [W]	500	1000
Dimensão da câmara de construção [mm]	250x250x350	800x400x500
Espessura da camada [mm]	-	0.03-0.15
Velocidade do Escaneamento	-	7m/s
Tipo de distribuidor	Raspador bidirecional com uma entrada da alimentação de pó	O volume de trabalho e reservatório movimentam de sentido contrário e simultaneamente, o raspador desloca sobre área de trabalho realizando distribuição
Empresa	<i>SLM Solution</i>	<i>Realizer</i>
CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS	SLM 500 HL	SLM 300
Tipo de LASER	Laser de fibra	Laser de fibra
Potência do LASER [W]	400-700	100-400
Dimensão da câmara de construção [mm]	500x280x365	300x300x300
Espessura da camada [mm]	0.020-0.075	0.020-0.1
Velocidade do Escaneamento	10m/s	-
Tipo de distribuidor	Raspador bidirecional com duas entradas da alimentação de pó	Módulo de movimento composto por distribuidor, reservatório e entrada da gás de proteção

Notas: Nomenclatura baseada no catalogo do fabricante.

2.2 SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MOVIMENTAÇÃO

Uma das primeiras iniciativas dos processos de automação de máquinas foi eliminar a intervenção humana no fluxo dos processos. Com a evolução das tecnologias, as máquinas passaram a executar deslocamento ou tarefa automaticamente a partir de um programa.[34]

Atualmente, os sistemas automatizados possuem diferentes construções físicas dependendo das características e aplicações da máquina. Neste tipo de sistema podem ser incluídos aqueles que executam um movimento bidirecional de apenas um eixo simples, até um sistema formado pelo conjunto de posicionadores para realizar movimentos precisos e em múltiplos graus de liberdade.

Os sistemas automatizados de movimentação são usados para posicionar os componentes ou a ferramenta de corte da máquina ferramenta para o local desejado por projeto. A sua precisão de posicionamento e velocidade determinam a qualidade e produtividade das máquinas ferramentas. A Figura 13 mostra a subdivisão de um sistema automatizado de movimentação: comando/controle, acionamento, mecânico e medição.

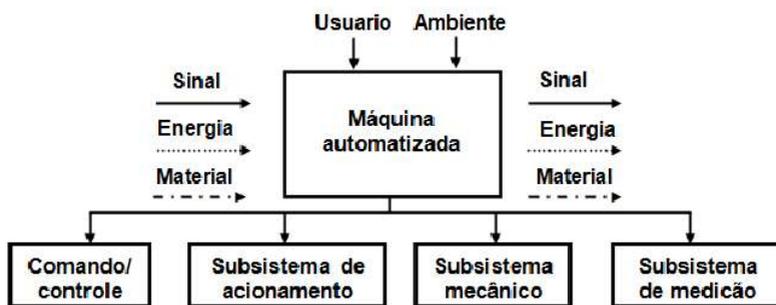


Figura 13 - Subdivisão de um sistema automatizado de movimentação. [34]

A Figura 14 mostra o esquemático de um sistema automatizado de um eixo de posicionamento, onde um programa de comando numérico gerado no sistema CAD/CAM é carregado para um subsistema de comando/controle. Depois de analisar a configuração do sistema e compensar o resultado obtido no subsistema de medição, as informações são

transmitidas para o acionamento, onde é realizado o movimento rotacional que é convertido para o movimento de translação (linear) pelo mecanismo de transmissão.

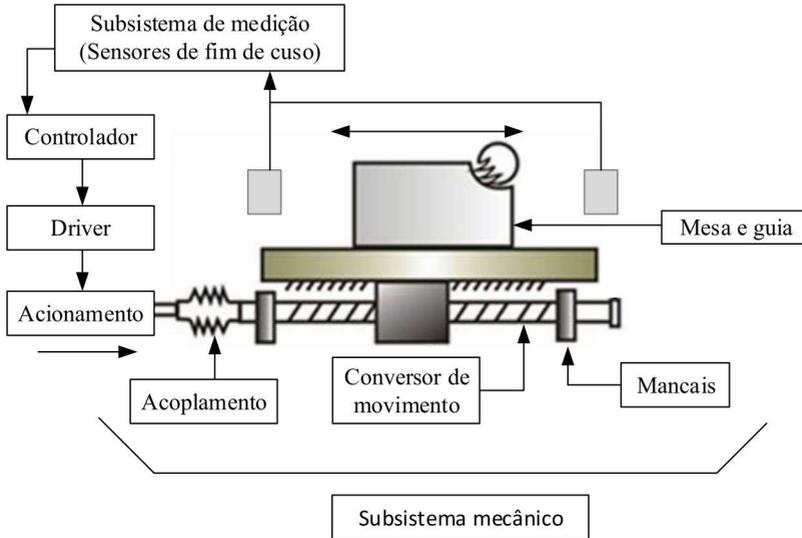


Figura 14 - O esquemático geral de um sistema automatizado de movimentação. Adaptado de [34] e [35].

2.2.1 Mecanismo de transmissão

Segundo Stoeterau[35], a maioria dos acionamentos em máquina-ferramentas realizam movimento rotativo, exceto do movimento rotação do eixo árvore, a maioria dos posicionamento de sistema de movimentação são de padrão translativo (linear). Para transmitir o movimento típico dos acionamento ao padrão translativo de sistema de movimentação, é necessário de um mecanismo de transmissão, que converte o movimento rotativo em translativo (linear). Suas aplicações incluem de trajetória unidirecional até diversos graus de liberdade. Entre diversos tipos de posicionadores, o mecanismo com o fuso esfera e o sistema de transmissão por correia são os mais comumente utilizados como unidade de movimentação de uma máquina-ferramenta, porém, o sistema de pinhão e cremalheira também é empregado quando o curso do sistema for muito longo [36].

O fuso de esfera e castanha possui vantagem de alta eficiência, baixo aquecimento, baixo desgaste e tempo de vida elevada com baixo efeito *stick-slip*. O mecanismo é composto por um fuso de esfera apoiado por mancais de rolamentos nas duas extremidades, e uma castanha com esferas recirculantes é montada na trajetória do fuso como mostra na Figura 15 (A). Uma das extremidades do fuso de esfera é ligada a um motor rotativo diretamente ou a um mecanismo de redução. O sistema de transmissão por correia e polias dentadas é utilizado em várias aplicações como máquina ferramenta e os equipamentos rotativos de alimentação fixa ou móvel. As vantagens são de baixo custo, pouco peso, baixo ruído, fácil de realizar manutenção e flexibilidade. A Figura 15 (B) ilustra um exemplo de sistema de transmissão por correia e polias [36], [37].

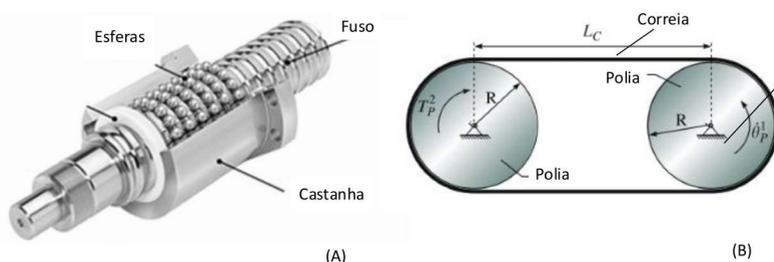


Figura 15 - (A) Montagem de um fuso esfera e castanha, (B) O sistema de transmissão por correia e polias. Adaptado de [36] e [38]

O mecanismo de pinhão e cremalheira é recomendado para sistemas com longa distância de deslocamento. A rigidez do sistema é determinada pela resistência torsional da engrenagem e do eixo de rotação. O movimento do sistema é caracterizado por baixas rotações e elevado torque. Para garantir a precisão do mecanismo, a linha de deslocamento deve ser projetada com alta rigidez e menor folga possível. Porém, há outra possibilidade para eliminar a folga já existente no sistema, que é empregar dois motores e um conjunto de engrenagens, sendo que o motor principal aplica um alto torque para realizar o deslocamento e o motor secundário oferece menor torque para remover a folga como ilustrado na Figura 16.

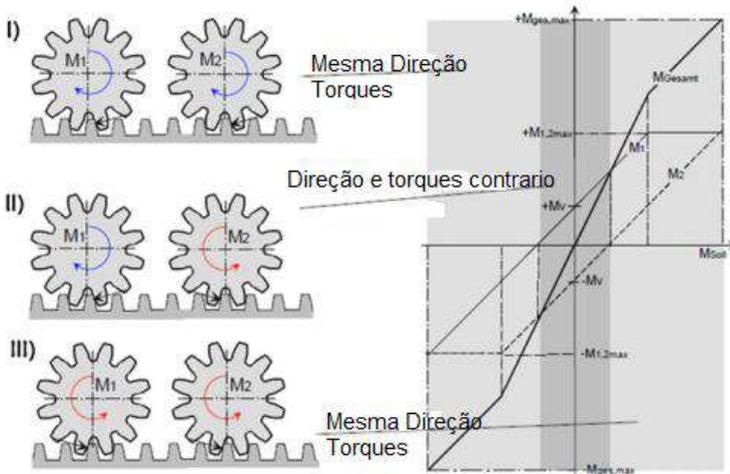


Figura 16 - Mecanismo de pinhão e cremalheira com eliminação de folga. Adaptado de [36]

2.2.2 Comando/ controle

Segundo Stoeterau[35], o sistema de controle é responsável por gerenciar as informações relevantes da máquina, estas informações podem ser divididas em duas fases: As informações primárias incluem as informações principais para controle dos movimentos da máquina como rotação do eixo árvore, direção, aceleração, velocidade de avanço e faixa de deslocamento; As informações secundárias contêm o controle das funções pertinentes e sistemas auxiliares. O sistema de controle atua como interface entre os usuário externo e a máquina de duas formas distintas: Malha aberta, o posicionamento do sistema de movimentação é controlado pelo pulsos transmitido aos acionamento sem realimentação de posição; Malha fechada, onde o sistema de movimentação é realimentado com a malha das informações de posições, velocidade ou equivalentes.

Bertrán [34], afirma ainda, um subsistema de comando/controle é a junção de *hardware* e *software*, baseado principalmente em microeletrônica digital, que permite realizar as funções mostradas no diagrama da Figura 17. Os usuários conectam a função interface através da operação com comando direto ou comando remoto da máquina para realizar a transferência de informações entre o programa e a peça, de forma bidirecional. As informações de geometria são transferidas à função interpolador, que fornece referências de movimentação às funções de

controle de eixo de posicionamento. De modo geral, as características desse subsistema derivam das exigências básicas de precisão e rapidez de funcionamento.

Além dessas, acrescentam-se características dos aspectos de ergonomia inclusos como simplicidade operacional, fácil manutenção, baixo consumo de energia, robustez para o ambiente de chão de fábrica, adaptabilidade com outros subsistemas da máquina, proteção à má qualidade de energia de alimentação e fatores climáticos. [34].

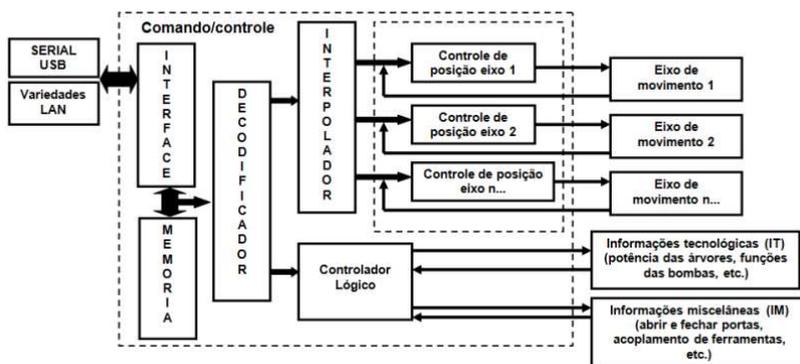


Figura 17 - Diagrama de bloco de um subsistema de comando/controle. [34]

2.2.3 Acionamentos eletromecânicos

Segundo Bertrán 2009 [34], os acionamentos eletromecânicos possuem função de suprir a energia mecânica ao subsistema, na maioria dos casos para produzir deslocamentos ou fixação de massas. As funções de aplicação de acionamento em projeto de automação de máquinas podem ser divididas em três classes: posicionamento, potência/velocidade e miscelâneas.

O acionamento com a função de posicionamento se caracteriza por frequentes ciclos de aceleração e desaceleração, portanto, a carga mecânica preponderante é inercial. As especificações mais importantes são a resolução/precisão do movimento e rapidez de resposta. A grande demanda sobre o acionamento para posicionamento é por força/torque não importando a potência mecânica disponível. Nesta classe se destacam os servo motores (*Brushless*, CC e CA), geralmente executando função de motorização em eixo de movimento/posicionamento.

O acionamento para potência/velocidade caracteriza-se pela função de ter que suprir a parcela predominante de potência mecânica demandada pelo processo do sistema automatizado de movimento. Geralmente tendo também uma função de manter uma velocidade pré-determinada. A característica básica é disponibilizar a potência mecânica suficiente para o sistema. A tendência é obter velocidade de rotação elevada na operação, a potência mecânica nessa função de aplicação são muito maiores do que os outros dois tipos de acionamentos. Esse tipo de acionamento é mais utilizado na motorização de eixo-árvore.

Nos acionamentos com funções miscelâneas estão enquadrados todos os demais casos de motorização no âmbito de um sistema automatizado. As características mais importantes para estas aplicações são baseadas em grandezas secundárias como confiabilidade e custo de aquisição. Exemplos de funções de aplicação: motorização de bombas, ventiladores, trocadores/fixadores de ferramenta, transportadores/removedores de resíduos, alimentadores de material etc.

2.3 MÉTODO PARA ANÁLISE DA CAMADA DE PÓ DEPOSITADA SUPERFÍCIE DISTRIBUÍDA

Para verificar a qualidade da camada depositada de material pelo distribuidor e a qualidade da camada de pó, foi empregado um microscópio digital, que realiza a função de capturar as imagens das camadas. Este equipamento possui as especificações como resolução de 2 megapixels e ampliação de 500 vezes. O objetivo deste método é observar o comportamento dos pós depositados na visão microscópica. Segundo [39], a diferença da distância entre os objetos capturados e a câmera pode ser detectada através das desfocagens apresentadas nas imagens. Nesse caso, comparou-se qualitativamente as imagens obtidas pelo microscópio nos diferentes pontos na área de trabalho. O APÊNDICE D mostra os exemplos das imagens capturadas.

Posteriormente, as imagens foram processadas no *Matlab*, conforme ilustra a Figura 18. São eliminados, primeiramente, os elementos estruturais de baixa nitidez por meio de comando *imopen* e *imsubtract*, ou seja, o processo filtra os pixels das imagens em forma de disco acima de 30 pixels. A seguir, estas imagens são convertidas para uma matriz em escala de cinza pela função *rgb2gray*. O método de análise é finalizado com o processo de transformação da matriz em um gráfico de escala 1:8 e a conversão da imagem em preto e branco. Nesta etapa pode ser observada a uniformidade da distribuição de material, por meio da rugosidade apresentada nos gráficos, e a distribuição de pixels na imagem preto e

branco. As superfícies dos grãos metálicos possuem forma e tamanho irregulares, e as imagens capturadas pelo microscópio são construídas pelos feixes de luz refletidos dessas superfícies, por meio da observação da nitidez nas imagens geradas nesse processo, assim, obtém-se o resultado qualitativo sobre as camadas depositadas [40], [41].

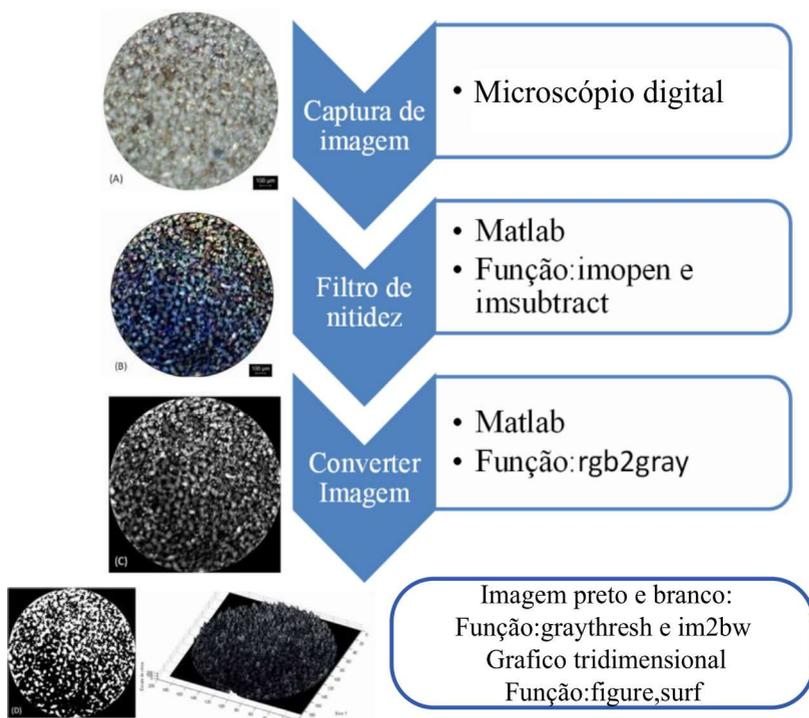
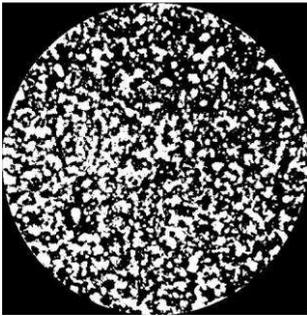


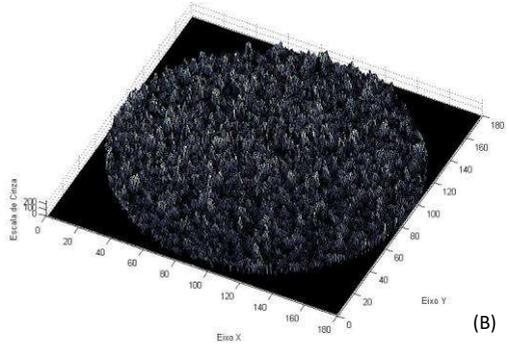
Figura 18 - Análise qualitativa as camadas depositadas

Conforme ilustra a Figura 19, pode-se observar, nas imagens capturadas das camadas uniformes, a presença da estrutura rugosa em toda área e os pixels espalhados uniformemente na imagem preto e branco. Já nas imagens da camada com risco, é possível perceber uma tendência de estrutura de vale localizada na parte superior do gráfico tridimensional, e na imagem preto-e-branco, foi possível visualizar uma área sombreada na imagem processada. Os fenômenos, citados acima, são causados por um processo de filtro na matriz, e os elementos de baixa nitidez são eliminados, ou seja, são definidos como zero. Por meio deste processo, destacam-

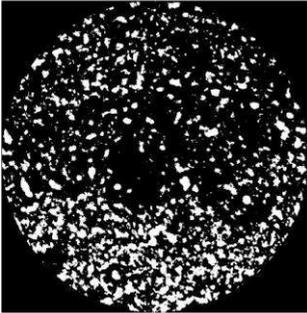
se as áreas que apresentam diferentes distância, ou seja, as imperfeições na camada distribuída.



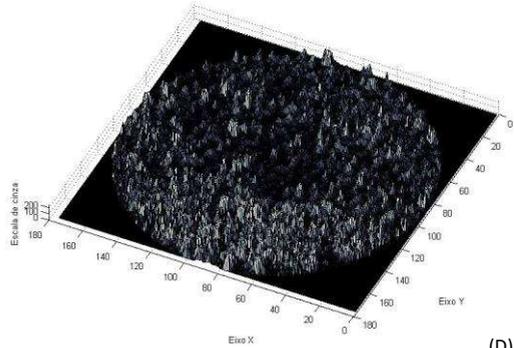
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 19 - Camada uniforme : (A) Imagem preto e branco e (B) Gráfico tridimensional da camada uniforme
Camada com sulco: (C) Imagem preto e branco, (D) Gráfico tridimensional da camada com sulcos

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento desta dissertação de mestrado, com a finalidade de organizar as informações e de sistematizar o desenvolvimento do projeto. Neste segmento foram pesquisados requisitos do projeto, principais literaturas metodológicas, restrições dos equipamentos, critérios de análise dos resultados obtidos e processo de melhoria.

Este projeto inclui as diversas áreas de tecnologias, as limitações para diferentes áreas, que podem influenciar a escolha das soluções para cada segmento e dificultar a decisão final para o desenvolvimento do protótipo. Foram empregadas a ferramenta de metodologia e uma sistematização desenvolvida no Laboratório de *Hardware* (LHW/UFSC) para auxiliar as gerações das alternativas para os problemas ou auxiliar os requisitos encontrados para o projeto de automação de máquina. Segundo Bertrán[34], a sistemática oferece aos projetistas os procedimentos para comparar e combinar soluções das concepções alternativas, e determinar a melhor opção para ser executada.

De acordo com Rozenfeld[42], O desenvolvimento de produto envolve as atividades que busca as especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, a partir das necessidades, restrições tecnológicas e as estratégias competitivas, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo. Back et al[43], afirma ainda, o desenvolvimento de projeto é a realização de uma série de atividades, inicia-se com a busca das informações e das estratégias sobre a tecnologia e as especificações do projeto, finaliza-se com o lançamento do produto. Neste processo é indispensável ter uma metodologia sistemática em função de planejar, gerenciar, monitorar e controlar as etapas do projeto. Com base nisto, foi escolhido o método do Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRO-DIP) para o desenvolvimento da dissertação de mestrado. Como proposta do projeto é desenvolver o módulo de alimentação de pó até a fase de protótipo, as ferramentas na parte de produto deste modelo não serão utilizadas neste trabalho. As etapas do processo deste modelo são mostradas na Figura 20.

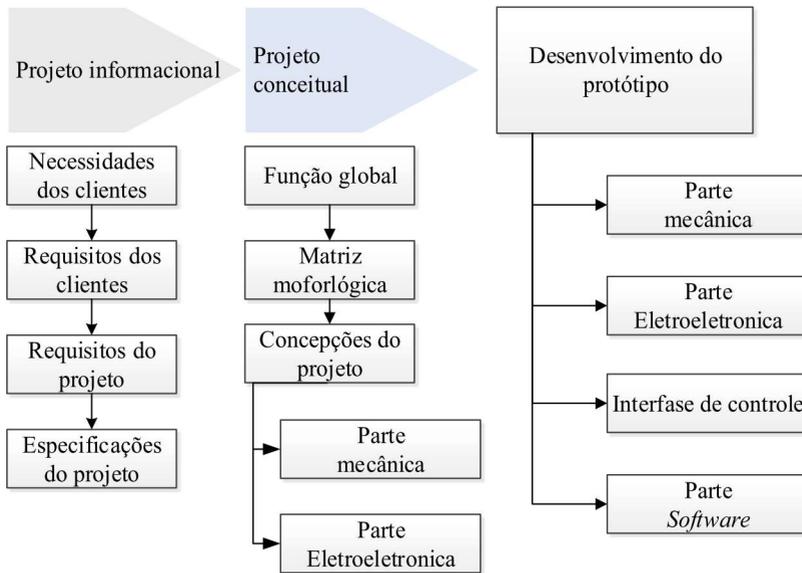


Figura 20 - Etapas do processo de desenvolvimento de método PRODIP adaptado de[43].

3.1 PROJETO INFORMACIONAL

O projeto informacional, segundo Back et al. (2008) [43], inicia-se a atividade de análise, os requisitos dos clientes e as restrições existentes do projeto. A seguir, os requisitos para desenvolvimento do projeto são estabelecidos a partir do conjunto de informações obtidos no processo.

3.1.1 Requisitos dos clientes

Inicialmente, foram formadas as necessidades dos clientes de cada fase do ciclo de vida. Posteriormente, essas necessidades são agrupadas e classificadas no meio do diagrama de afinidades. Após verificar e eliminar os itens similares, os requisitos dos usuários são transformados em forma quantitativa, ou seja, descrição com os parâmetros mensuráveis [42].

As categorias de clientes são separadas por partes e interligadas entre os setores produtivos, como mostra a Figura 21. No entanto, como objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver uma parte de um

equipamento para avaliação interna, os setores de mercado não foram considerados na análise de ciclo de vida do produto.

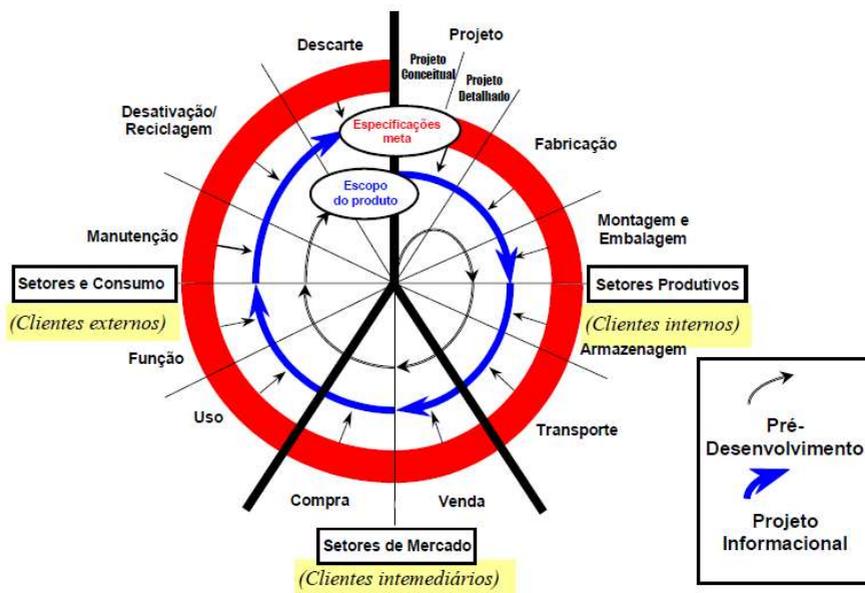


Figura 21 - Ciclo de vida do produto. [43]

Como ilustrado na Figura 21, os setores produtivos incluem as áreas de fabricação, montagem do produto, armazenagem e transporte dos equipamentos. Os técnicos e os colaboradores dos laboratórios da instituição são usuários relacionados a este setor. Os clientes nos setores de consumo são os professores, pesquisadores e os membros do laboratório que utilizam e aproveitam o funcionamento do equipamento.

As necessidades dos clientes foram levantadas a partir das consultas com o professor orientador Walter Lindolfo Weingaertner, com a empresa parceira do projeto *WelleLASER* e, ainda, com os membros participantes na disciplina projeto integrador do curso Engenharia Mecânica da UFSC. As informações foram coletadas em uma linguagem de engenharia e foram eliminadas as repetições, obtendo o resumo das necessidades dos clientes, como mostra na Tabela 3.

Tabela 3 Necessidades dos clientes

Necessidades dos clientes	
Deposição de material	Facilidade de reabastecimento de pó metálico
	Isento de vibrações externas
	Resistência nas condições especiais
	Trabalha com material metálico
Ambiente de construção	Permitir inserir gás de proteção
	Isolamento do ambiente
	Área de trabalho
Equipamento	Adaptável para diferentes modelos de máquinas
	Baixo tempo de preparo para iniciar processo
	Alto grau de automação
	Precisão e a resolução do deslocamento da mesa
	O controle da espessura da camada
	Fácil de fabricar e manutenção
	Durável
Eletroeletrônica	Comunicável com o dispositivo que gerencia a fonte de LASER
	Fácil de instalar
	Organizado – Fácil de manter

As necessidades são classificadas de acordo com a fase de ciclo de vida. Estas informações foram transformadas em características qualitativas, ou seja, os requisitos dos clientes. Como mostra na Tabela 4.

Tabela 4 Requisitos dos clientes

Requisitos dos clientes	
Atributos básicos	Funcionamento simples
	Segurança conforme normas
	Confiabilidade
	Padronização
Atributos do ciclo de vida	Fabricabilidade
	Mantenabilidade
	Montabilidade
	Transportabilidade
Atributos específicos	Modularidade
	Controle de ambiente
	Resolução
	Distribuição de material uniforme
	Tipo de alimentação
	Hermético ao pó
	Isento de vibrações
Tipo de acionamento	

3.1.2 Requisitos de projeto

A obtenção dos requisitos de projeto a partir de requisitos dos clientes, constitui-se na ação que definirá os parâmetros mensuráveis para as características do produto que estão sendo desenvolvidas [42]. A Tabela 5, a seguir, apresenta os requisitos de projeto.

Tabela 5 Requisitos de projeto

Requisitos de projeto
Área útil de trabalho
Comunicação entre equipamento
Controle de ambiente de trabalho
Desvio de distribuição
Entrada de gases
Estabilidade de movimentação
Facilidade de instalação
Fonte de alimentação
Intertravamentos
Isolamento da área de trabalho
Número de componentes
Número de módulos
Peso de equipamento
Precisão na nivelamento da mesa
Proteção LASER
Repetição da deposição de pó
Tempo de distribuição
Tempo de manutenção
Tempo de montagem
Tempo de setup
Tipo de controlador
Tipo de material
Tipo de acionamento

3.1.3 Especificações do projeto

As especificações do projeto são parâmetros quantitativos e mensuráveis que o produto projetado deverá ter. A hierarquização dos requisitos de projeto processado na casa da qualidade, conforme ilustrado no APÊNDICE A, é baseada nas relações entre os requisitos de usuários e requisitos de projeto. Contudo, ainda é necessário estabelecer as metas, que serão avaliadas de acordo com suas importâncias e resultados nas especificações-meta do projeto [42]. Como ilustrado na tabela seguinte.

Tabela 6 Especificações do projeto

	Requisitos de projeto	Especificações-meta	Grau de importância
1	Área útil de trabalho	$\cong 6300\text{mm}^2$	5.6
2	Comunicação entre os equipamentos	Sinal analógico	3.6
3	Controle de ambiente de trabalho	Isolamento	6.0
4	Desvio de distribuição de pó	Minimizar	6.7
5	Entrada de gases	Entrada de Ar com vazão ajustável	3.2
6	Estabilidade de movimentação	Maximizar	5.9
7	Facilidade de instalação	Maximizar	7.0
8	Fonte de alimentação	100 - 240V	4.5
9	Intertravamentos	<1s (tempo de parada)	3.6
10	Isolamento da área de trabalho	Maximizar	4.6
11	Número de componentes	>10 peças	4.4
12	Número de módulos	3 módulos	3.6
13	Precisão no nivelamento da mesa	$\cong 10\mu\text{m}$	2.3
14	Repetibilidade da deposição de pó	<1000 repetição	3.9
15	Tempo de distribuição	>10s	2.5
16	Tempo de manutenção	10h/mês	6.0
17	Tempo de montagem	$\cong 1\text{hora}$	2.7
18	Tempo de setup	$\cong 5\text{min}$	3.6
19	Tipo de controlador	Arduino, PI C-663 Mercury <i>Step</i>	3.9
20	Tipo de material	Material metálica em pó	1.7
21	Tipo de acionamento	Motores	4.0

Fonte: Do autor.

3.2 PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual possui o objetivo de criar várias soluções alternativas para o mesmo problema. A seguir, serão comparadas e combinadas as soluções ao longo do processo de projeto. Enfim, selecionará a melhor concepção para o produto.

Para atingir este propósito são realizadas as seguintes atividades: definir a função global e estruturar as funções do produto, elaborar a matriz morfológica, pesquisar e combinar os princípios de solução e selecionar a concepção através de uma análise comparativa entre as alternativas, considerando as especificações de projeto.[43]

3.2.1 Função global do projeto

A função global do projeto é obter uma visão resumida de projeto, através das funções que o projeto deve realizar. Os elementos nos estados iniciais são processados para gerar os resultados nos estados finais, independente de qual for a solução escolhida. Nesse projeto, a câmara de construção recebe a energia elétrica, o material em pó e o acionamento da máquina de gravação a LASER. Ela realiza a função de deposição do pó para o processo SLS/SLM, gerando uma camada de pó depositada e transferindo o sinal para a máquina de gravação a LASER. Como ilustra na Figura 22. [44]

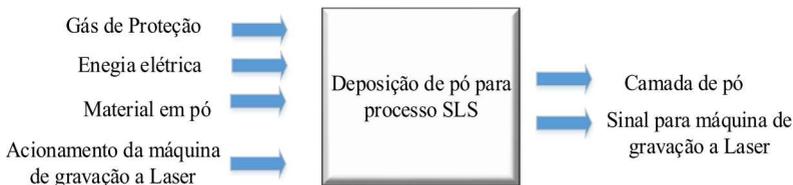


Figura 22 - Função global

3.2.2 Estrutura funcional

Após estabelecer a função global, será realizado o desdobramento funcional com a finalidade de melhor compreender as etapas de atividades

que o sistema deverá passar e desenvolver. Como mostra na Figura 23 [42].

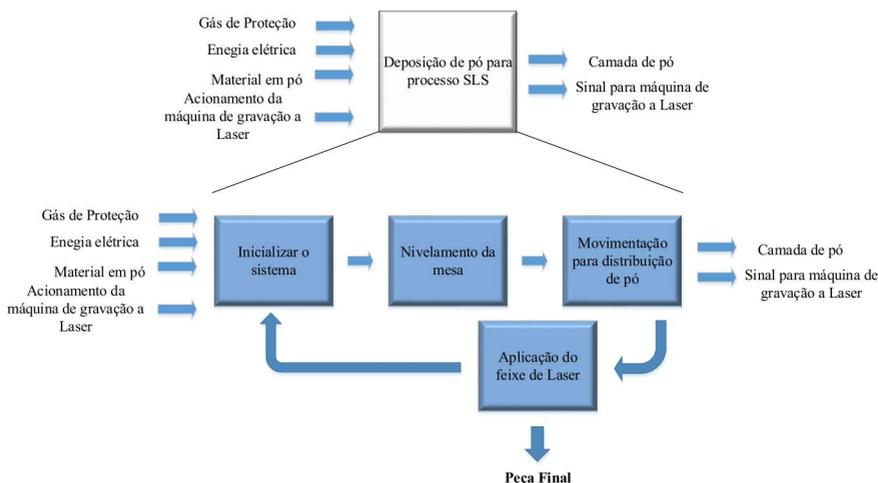


Figura 23 – Desdobramentos da função global.

Nesta atividade, a função global pode ser decomposta em segmentos de menor complexidade. Assim, pode-se obter os passos do funcionamento do produto, facilitando o levantamento de princípios de soluções para estrutura de funcional [42], [43], como ilustrado na Figura 24. O processo deve iniciar com a alimentação de material em pó antes de energizar o sistema, por questão da segurança, a área de trabalho é isolada, o gás de proteção é injetado no ambiente para evitar a oxidação dos componentes. Após receber o acionamento da máquina de gravação a LASER, o sistema irá iniciar o processo com o nivelamento da mesa de trabalho. O distribuidor de pó é acionado para depositar matéria-prima na área de trabalho e seu movimento é cessado quando os sensores limitantes de trajetória são ativados. Depois desta etapa, finaliza-se o ciclo, mandando o sinal para acionar a aplicação do feixe de LASER e esperando a máquina de gravação a LASER confirmar a finalização do trabalho. Em seguir a mesa de trabalho é abaixada por um incremento e o distribuidor de pó aplica uma nova camada de pó na área de trabalho.

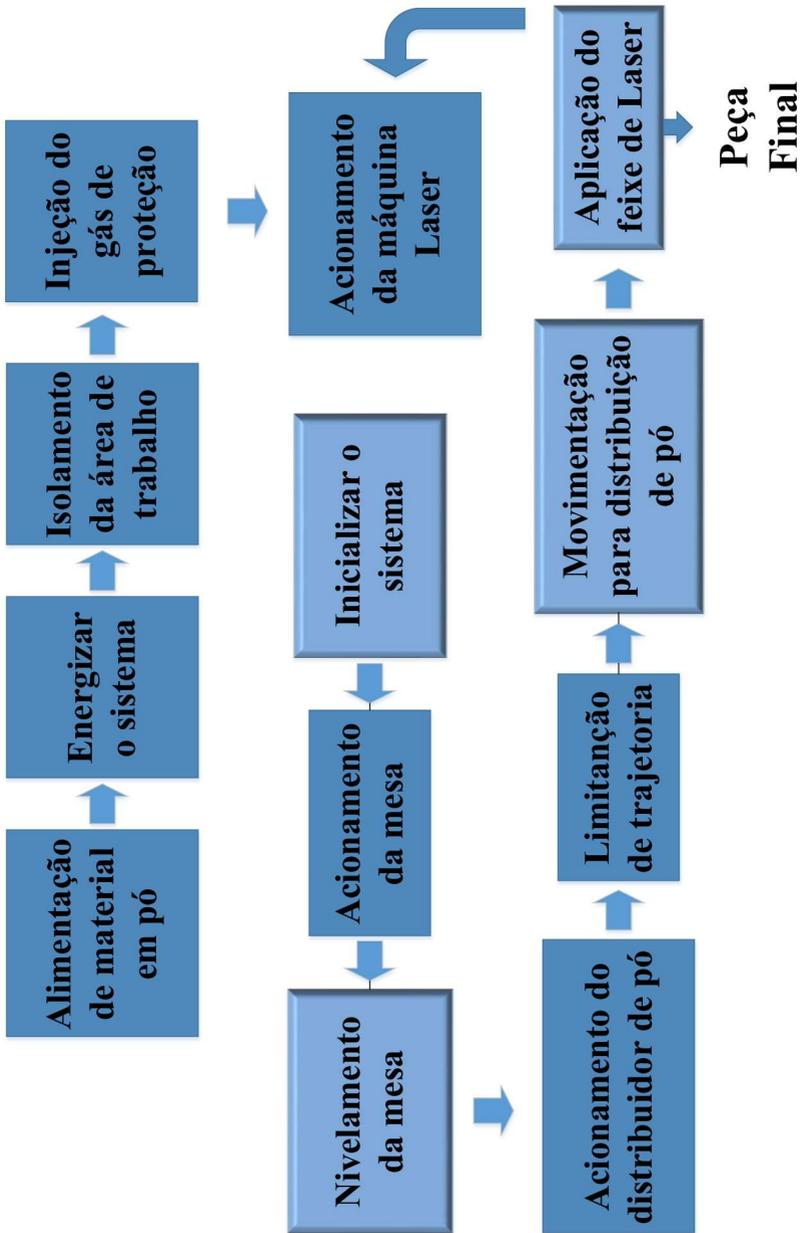


Figura 24 – Estrutura funcional.

3.2.3 Princípio de solução

Esta etapa apresentam os princípios de solução, que combinou as soluções de forma adequadas para cada uma das funções elementares e gerou a concepção para modelagem do esboço de projeto inicial [42].

Tabela 7 - Combinações das soluções

Funções	Concepção 1	Concepção 2	Concepção 3
Alimentação de material em pó	Manual (quantidade de material pré-calculado)	Manual (quantidade de material pré-calculado)	Funil retângular
Energizar o sistema	Chave alavanca	Chave alavanca	CLP LASER
Isolamento da área de trabalho	Caixa de vidro	Carenagem da máquina LASER	Câmara externa
Injeção da gás de proteção	Injeção mangueira pneumática e controlado por fluxômetro	Sistema pneumática e controlado por regulador de pressão	Sistema pneumática e controlado por regulador de pressão
Acionamento da máquina de gravação a LASER	Microcontrolador	Comunicação Serial	CLP LASER
Acionamento e nivelamento da mesa	Atuador linear	Modulo de movimentação com Fuso de esferas recirculantes	Modulo de movimentação com Fuso de esferas recirculantes
Acionamento da distribuidor de pó	Sistema de movimentação translativo	Sistema de movimentação translativo	Braço rotativo
Limitação e medições de trajetória	Fim de curso e encoder integrado	Contador elétrico e encoder integrado	Microcontrolador

Fonte: do autor

Pra avaliar as concepções, Rozenfeld[42] sugere que seja aplicada a matriz de decisão. O objetivo principal desta atividade é escolher, dentre as concepções formadas anteriormente, o melhor conceito que será desenvolvido no protótipo final.

As três concepções foram inseridas na matriz de decisão e os requisitos de projeto que possuem o grau de importância mais elevado é considerados como critérios de avaliação. Neste método, uma das concepções é escolhida como referência e outras duas são comparadas com esta referência. Para cada critério de avaliação será indicada a concepção melhor, igual ou pior que a referência. Como ilustrado na Tabela 8, a concepção 1 é considerada como solução adotada por ser a de mais fácil construção e avaliação de acordo com os critérios e os pesos selecionados.

Tabela 8 Matriz de decisão

Requisito dos projeto	Grau de importância	Concepção 1	Concepção 2	Concepção 3
Facilidade de instalação	7	=	0	+
Desvio de distribuição	6.7	+	0	-
Controle de ambiente de trabalho	6	+	0	-
Repetição do deposição de pó	6	=	0	-
Tipo de acionamento	6	+	0	=
Estabilidade de movimentação	5.9	=	0	-
Área útil de trabalho	5.6	-	0	+
Isolamento da área de trabalho	4.6	+	0	-
Fonte de alimentação	4.5	=	0	+
Número de componentes	4.4	+	0	=
Tipo de material	4.4	=	0	+
Tipo de controlador	4	+	0	=
Precisão na nivelamento da mesa	3.9	+	0	-
Tempo de montagem	3.9	+	0	=
Comunicação entre equipamento	3.6	+	0	=
	Soma+	9	0	4
	Soma-	1	0	5
	Soma=	5	0	5
	Total	14	0	9

Fonte: do autor

3.2.4 Concepção do sistema protótipo

Após obtenção da solução do protótipo foi feita a modelagem inicial para o esboço da concepção, idealizando o funcionamento e identificando os possíveis problemas apresentados no projeto. A concepção escolhida é ilustrada detalhadamente na Figura 25.

O funcionamento do protótipo é composto por dois sistemas de movimentação, a parte eletroeletrônica e um PC, onde as informações de um arquivo CAD é decodificada de PC para a parte eletroeletrônica, gerando o pulso para acionar a parte mecânica e estabelecer a comunicação com a máquina de gravação a LASER.

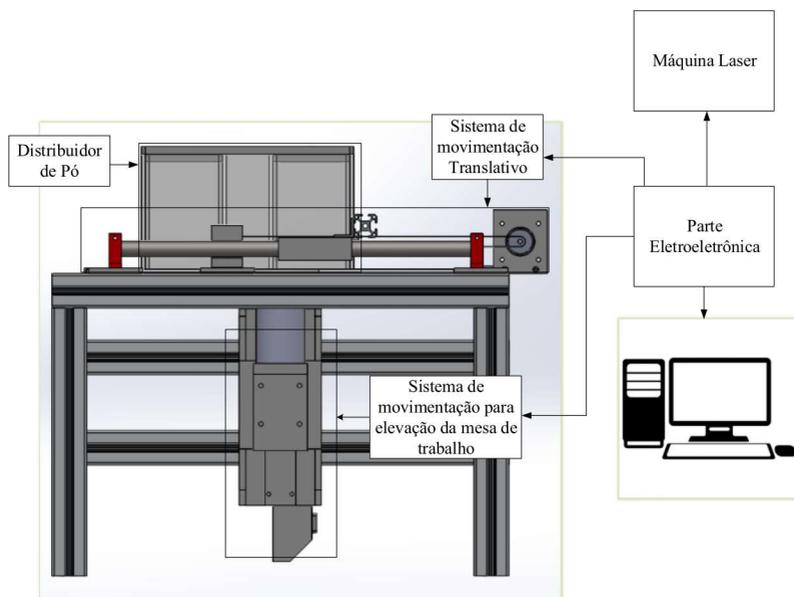


Figura 25 - Esquemático de protótipo

A Figura 26 pode-se ver mais detalhadamente o conceito do sistema de deposição do pó metálico.

O sistema de deposição de pó é composto por diversos componentes funcionais que em conjunto permitem a aplicação de camadas de pó metálico no volume de trabalho.

O volume de trabalho é uma cavidade cilíndrica com um diâmetro de 80 mm, com uma abertura na mesa de trabalho. Na parte inferior

desta cavidade cilíndrica se encontra o acionamento de precisão para a elevação do pistão, num curso de 80 mm. Os passos de descida do pistão podem ser programados em passos de 0,01 mm.

Para prever a estanqueidade e impedir a possibilidade de contaminação com pó metálico o volume de trabalho é envolto por uma camisa elástica.

A mesa de trabalho é composto de uma placa de vidro “float” com 8 mm de espessura e uma abertura de 100 mm na região central. As dimensões da placa de vidro são de 335,8 mm x 502 mm, coincidindo com as dimensões da mesa de trabalho das máquinas de gravação a LASER da empresa WELLE LASER LTDA.

Sobre a mesa de trabalho encontra-se o acionamento para o distribuidor de pó.

O distribuidor de pó é composto por uma caixa de vidro com três cavidades. A cavidade central, em forma de cunha, com uma abertura inferior de 1mm, serve de depósito de pó. A fenda da abertura inferior serve como dosador de pó sobre a área de trabalho. As duas cavidades laterais são as cavidades de proteção para a execução do trabalho de SLS/ SLM. A superfície inferior do distribuidor de pó é lapidado, de forma a minimizar a folga entre a mesa de trabalho e o distribuidor de pó.

O acionamento do distribuidor de pó é composto de um anel retangular que envolve o distribuidor de pó, acionado transversalmente por um motor de passo e correia dentada. A caixa do distribuidor de pó é arrastado pelo anel, sem um acoplamento rígido.

Ao ser arrastado sobre a superfície de trabalho, a fenda da abertura inferior do reservatório de pó libera pó metálico para o volume de Trabalho.

Como mencionado anteriormente, a distribuição e o isolamento da câmara de construção são feitos através de uma caixa de vidro movimentada por um motor de passo. Essa solução foi adotada principalmente por ser um mecanismo simples, com facilidade na fabricação dos componentes e disponibilidade de material no laboratório para sua construção. A utilização do motor de passo traz as vantagens como: baixo custo e facilidade de controle, sendo que existe uma infinidade de drivers de programação que suprem a necessidade do projeto.

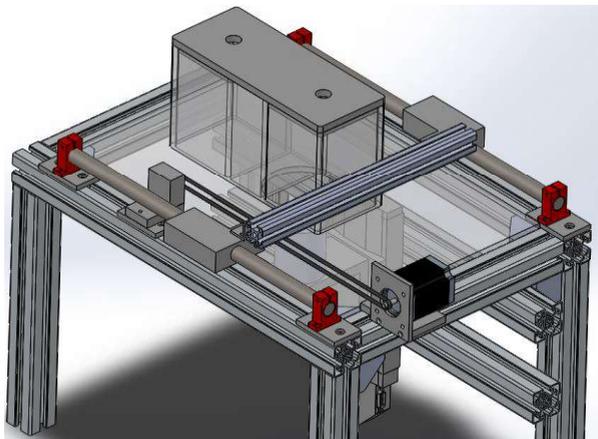


Figura 26 - Conceito de Sistema de movimentação para deposição de pó

Como ilustrado na Figura 27, um módulo de atuador linear é selecionado para realização do movimento de descida da mesa de construção, que libera o espaço de espessura definida para que as partículas metálicas possam ser distribuídas de forma uniforme.

O controle de atmosfera será feito através da camisa elástica que está fixada no tubo da mesa de elevação e da caixa de vidro na parte de distribuição de material.

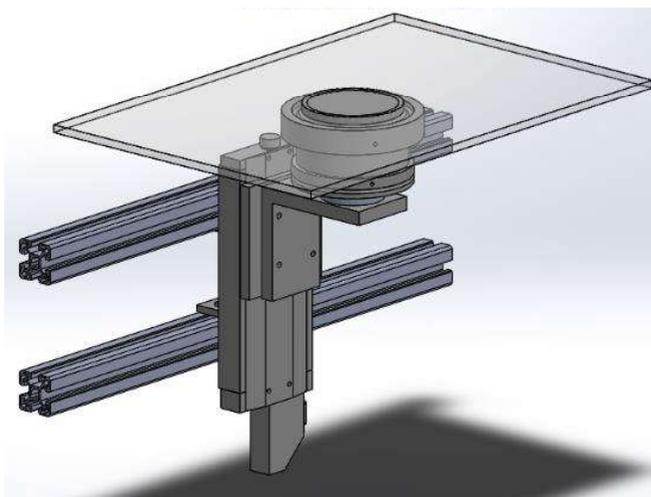


Figura 27 - Conceito de Sistema de movimentação para elevação da mesa de trabalho

4 CONSTRUÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo serão apresentados os componentes e as características do protótipo. O protótipo é fabricado de acordo com o princípio de solução selecionado na fase de projeto conceitual. O desenvolvimento de protótipo foi dividido em cinco etapas: mecânica, eletroeletrônica, interfase de controle e *Software*, como ilustrado na Figura 28. As imagens reais do protótipo estão no APÊNDICE B.

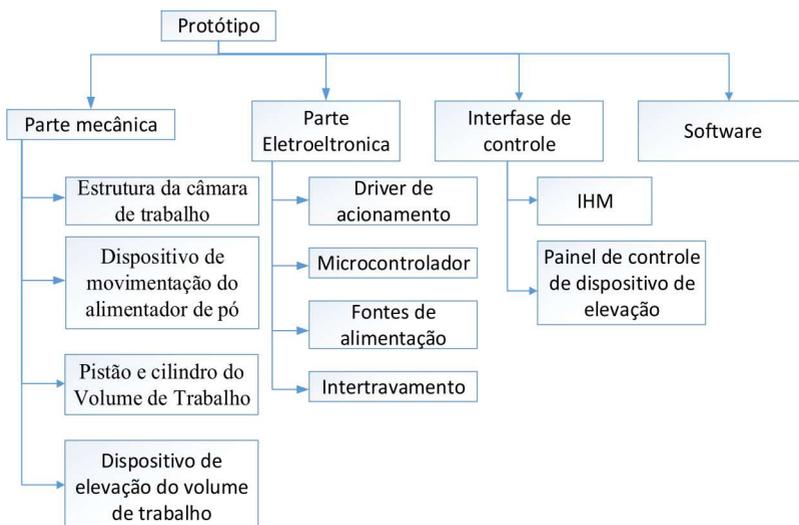


Figura 28 - Desenvolvimento do protótipo

4.1 PARTE MECÂNICA

A parte mecânica é constituída pelos seguintes módulos: estrutura da câmara de trabalho, dispositivo de movimentação horizontal do alimentador de pó, conjunto de anel de isolamento e mesa de elevação.

A estrutura tem a dimensão idêntica da mesa de trabalho de carenagem da máquina de gravação a LASER da empresa WELLE LASER LTDA. Ela suporta a mesa de trabalho, a o volume de trabalho e os acionamentos horizontais e verticais.

O dispositivo de movimentação tem a função de deslocar o distribuidor de pó entre os extremos da mesa de trabalho com velocidade uniforme, garantindo a distribuição de material na sobre o volume de trabalho. O anel de isolamento é constituído pelos elementos responsáveis pelo

controle da atmosfera no ambiente de trabalho. O sistema de elevação tem a função de elevar e baixar o pistão dentro da cavidade que define o volume útil de trabalho para processamento pela máquina. Sobre o pistão encontra-se uma placa de sacrifício sobre a qual é construído o componente por SLS/SLM. O sistema de elevação inicialmente realiza nivelamento da placa de sacrifício com a mesa de trabalho e controla a espessura das camadas sucessivas a ser depositadas.

4.1.1 Estrutura da câmara de trabalho

O sistema mecânico foi projetado para servir como um módulo adaptável nas máquinas de processamento a LASER da empresa *Welle-LASER Ltda*. A dimensão da estrutura da câmara de trabalho é baseada no arquivo da modelagem da carenagem do modelo LS 2000 desta empresa. A Figura 29 mostra, de forma esquemática, a carenagem sem a mesa de trabalho e montagem com protótipo.

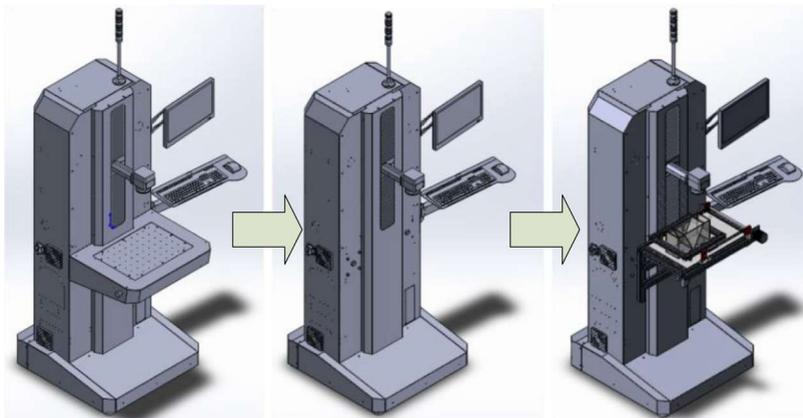


Figura 29 - Carenagem da máquina de gravação a LASER LS 2000 e montagem com protótipo [45].

Pela indisponibilidade de uma estrutura da máquina WELLE LS 2000, foi construída uma estrutura em perfis do tipo *BOSCH* 40x40. Sobre estrutura de perfil foi montada uma lâmina de vidro com 8 mm de espessura e um furo de 100mm no centro, para servir de mesa de trabalho. Na parte superior, foi instalado o dispositivo de movimentação horizontal, para a movimentação do alimentador de pó, também empregando perfis de alumínio *BOSCH* 40x40, dimensionados de acordo com a área de tra-

balho da máquina de gravação a LASER. Os perfis longitudinais, localizadas na parte de posterior, suportam a mesa de elevação. O gabinete elétrico do equipamento é fixo em uma das laterais.

A Figura 30 mostra o sistema completo montado, nele contém, também, as interfaces de homem máquina (IHM), que são constituídos por um computador e um painel de comando conectado no gabinete que permite os usuários observarem e ajustarem os parâmetros de processo.

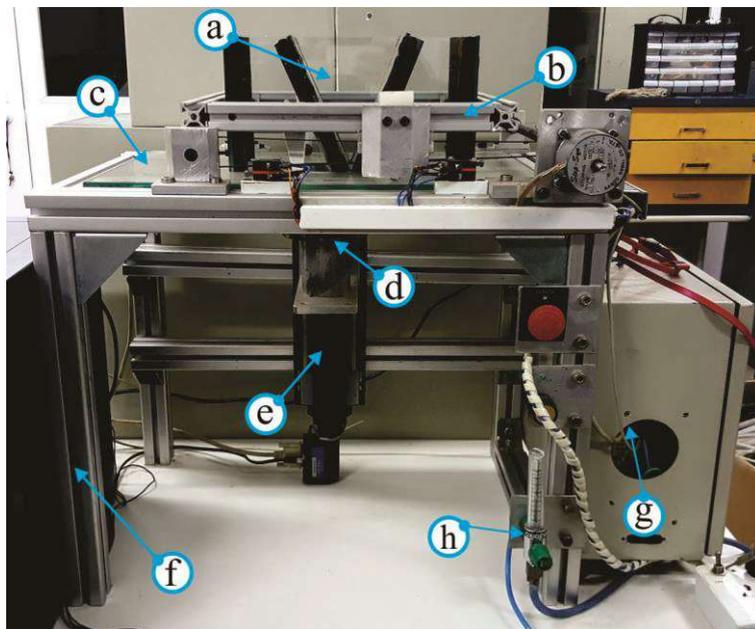


Figura 30 - Visão geral do sistema: Alimentador de pó (a); Dispositivo de movimentação do alimentador de pó (b); Mesa de trabalho (c); Pistão e cilindro do volume de trabalho (d); Dispositivo de elevação do volume de trabalho (e); Estrutura da câmara de trabalho (f); Gabinete de controle (g); Rotâmetro (h).

4.1.2 Dispositivo de movimentação do alimentador de pó

O dispositivo de movimentação do alimentador de pó foi projetado para viabilizar a distribuição da matéria-prima sobre a mesa e a área de trabalho. Inicialmente é baseado em um sistema de movimentação guiado por duas barras cilíndricas, que é movimentado através de um conjunto de polia e correia dentada, acionada por motor de passo. O intuito deste sistema é converter o movimento rotacional do motor de passo para o

deslocamento translativo. A Figura 31 mostra o modelo deste sistema feito em CAD.

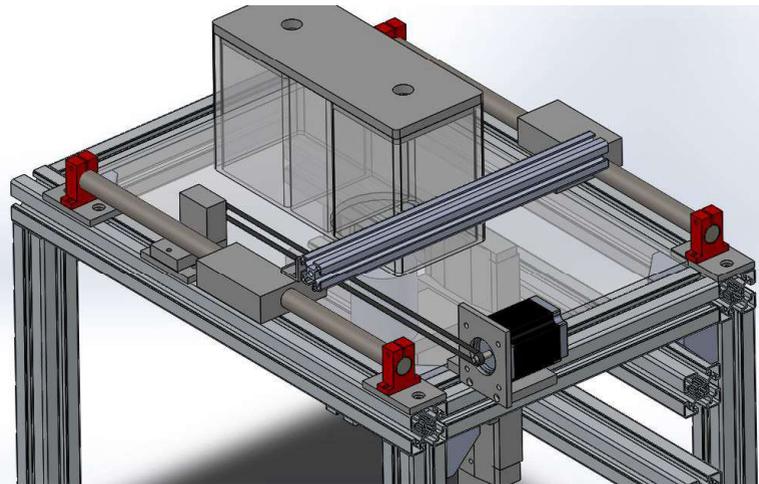


Figura 31 - Primeira concepção para o dispositivo de movimentação do alimentador de pó

A falta de paralelismo entre as barras se mostrou problemática, gerando resistência e travamento no deslocamento do alimentador. Verificou-se que se tinha bons resultados de deslocamento, promovendo a propulsão do alimentador de pó diretamente pela correia dentada. Para obter uma simetria de deslocamento, foi montado um segundo conjunto de polias, acopladas por eixos ao primeiro conjunto, de forma que o único motor de passo acionasse os dois conjuntos de polias, conforme mostrado na Figura 24.

A segunda concepção do acionamento do distribuidor de pó simplificou a montagem dos componentes. Considerando que o deslocamento do alimentador de pó não necessita de uma referência de posição longitudinal exata, o acoplamento entre o reservatório de pó e o sistema de avanço é apenas um encosto. Um anel acoplado às correias dentadas, que contorna o reservatório do alimentador, permite que este seja empurrado nas duas direções. A planicidade da mesa de vidro e a planicidade da parte inferior do reservatório que a abertura de folga entre o reservatório e a mesa se mantenha pequena. O dispositivo de movimentação do alimentador estão ilustrados na Figura 32 e Figura 33.

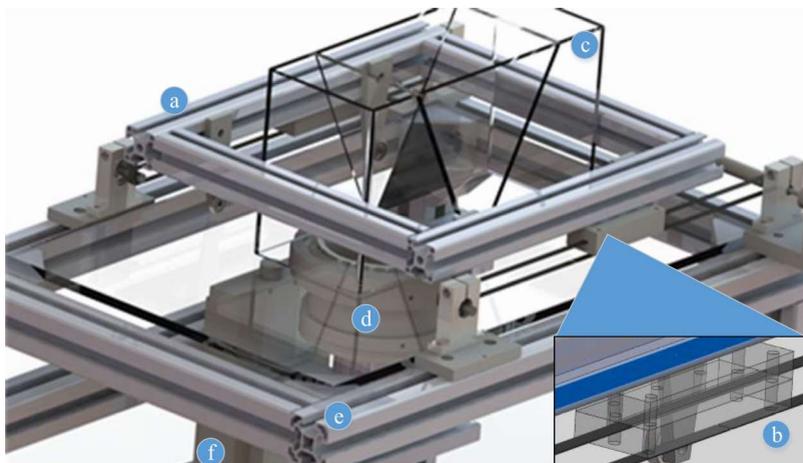


Figura 32 - Conceção final de dispositivo de movimentação do alimentador de pó: Anel de propulsão (a); Montagem da correia dentada com as chapas com rebaiço (b); Alimentador de pó (c); Mesa de trabalho (d); Estrutura da câmara de trabalho (e); Atuador linear (f).

Na concepção mostrada na Figura 32 a inserção do segundo conjunto de polias e uma correia dentada paralela ao primeiro conjunto promoveu um deslocamento mais estável do anel que contorna o recipiente do alimentador. A rigidez torcional do eixo que acopla a polia acionada principal e suficientemente levada para não introduzir desalinhamentos no movimento do anel.

A transmissão do movimento do motor de passo ao eixo que acopla as duas polias motoras ocorre por meio do acoplamento flexível unindo a ponta do eixo de motor com uma extremidade da barra cilíndrica. O anel de perfil *BOSCH* 30x30 de alumínio que contorna o reservatório de pó está acoplado às correias dentadas por intermédio de duas chapas com rebaiços, uma para cada lado, como mostrada na Figura 32 (B). Desta forma, a função de movimentar o reservatório de pó sobre a mesa de trabalho foi satisfeita. A Figura 33 ilustra a imagem do dispositivo de movimentação do alimentador de pó.

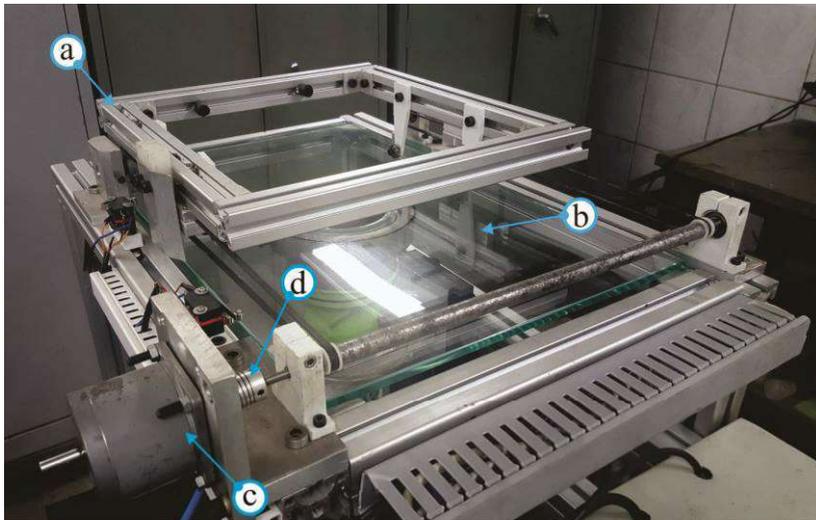


Figura 33 - Imagem do dispositivo de movimentação do alimentador de pó: Anel de propulsão (a); Mesa de trabalho (b); Motor de passo (c); Acoplamento flexível (d).

Para o deslocamento do dispositivo de movimentação foi utilizado um motor de passo com resolução de $1,8^\circ$, que possui um mínimo de 200 posições de parada por cada rotação completa. Segundo SANYO DENKI [28], o modelo 103-770 apresenta comprimento de 90,45 mm contando eixo passante, flange de padrão NEMA 23 e seis fios de ligação elétrica. A configuração adotada no driver de acionamento para exercer sua função, foi 400 pulsos para cada rotação completa e ligação unipolar.

A nova construção possui dois sistema de polia e correia localizados nas laterais. Os dois sistemas foram montados através de uma barra cilíndrica que garante o movimento simultâneo. A transmissão de movimento ocorre por meio do acoplador flexível ligado na ponta do eixo de motor e barra cilíndrica. Na parte de movimentação da correia, foram feitas duas chapas com rebaixo para cada lado, e elas foram montadas junto ao quadro de perfil de alumínio *BOSCH* 30x30. A função final da montagem é transferir o movimento da correia para caixa de vidro.

4.1.3 Dispositivo de elevação do volume de trabalho

Para o deslocamento do pistão do volume de trabalho, a melhor solução foi emprego de um atuador linear. Na escolha deste componente

foi considerado um atuador linear modelos M410DG, da empresa PI (*Physiki Instrumente*), e foi levado em consideração a qualidade de trajetória e posicionamento de deslocamento exigida nesse projeto. Conforme mencionada na especificação do projeto, os desvios tolerados no movimento de descida do atuador linear deve ser em torno de $10\ \mu\text{m}$. O curso de deslocamento do atuador escolhido é de 100 mm. O módulo é mostrado na Figura 34.

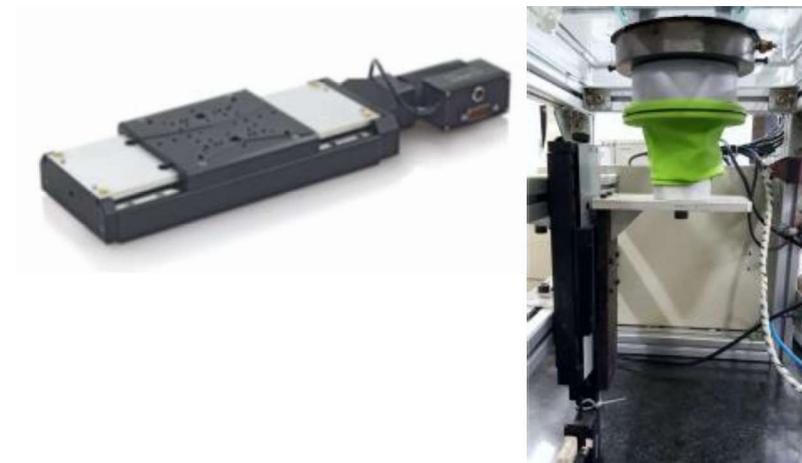


Figura 34 - Atuador linear modelo M410DG e montagem do dispositivo de elevação do volume de trabalho

4.1.4 Acionamento

Os componentes de acionamento foram localizados entre o sistema eletroeletrônico e o mecânico. Esses componentes possuem funções de transformar energia alimentada e pulso elétrico para energia mecânica que realiza o movimento e posicionamento

O acionamento no posicionamento vertical é integrado no módulo linear que combina um motor DC e um redutor sem folga, fornecendo até $1\ \mu\text{m}$ de resolução para cada incremento de movimento.

4.1.5 Pistão e cilindro do volume de trabalho

Um dos principais componentes que isola a área de trabalho e distribui o gás de proteção para ambiente é o Pistão e cilindro do volume de trabalho, constituído pelas cinco peças cilíndricas e uma camisa elástica, conforme ilustrado na Figura 35.

O pistão de elevação do volume de trabalho, com um diâmetro de 79,9 mm e altura de 95 mm, está preso ao atuador vertical por intermédio de uma cantoneira, como mostrado na Figura 35. Na parte superior do pistão é fixada, a placa de sacrifício, que possui um diâmetro de 79,9 mm, 0,1 mm menor que o diâmetro do cilindro para permitir um acoplamento deslizante.

O cilindro do volume de trabalho, com um diâmetro interno de 110 mm está preso à parte inferior da mesa de trabalho, ajustado e colado com resina na posição do orifício da mesa de trabalho.

Para evitar que o pó metálico que possa pela folga entre o pistão de elevação e o cilindro, prejudique o funcionamento dos componentes do sistema de acionamento vertical, o cilindro está acoplado ao pistão por uma camisa elástica. A camisa elástica é presa na parte externa inferior do cilindro e na parte inferior do pistão, de forma que a luva não obstrua os movimentos do pistão para o interior da cavidade do cilindro.

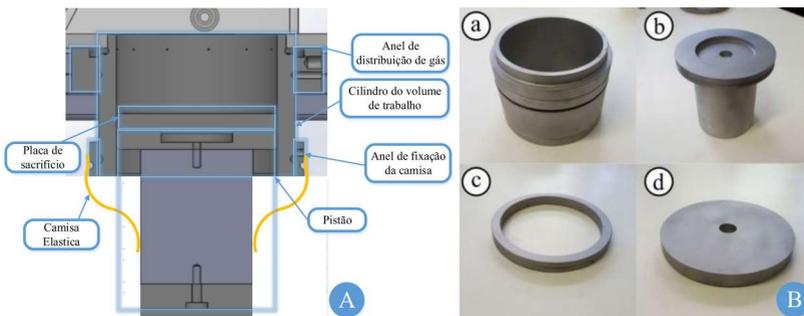


Figura 35 – (A) Esquemática e (B) Imagem dos componentes do pistão e cilindro do volume de trabalho: Cilindro do volume de trabalho (a); Pistão (b); Anel de fixação da camisa (c); Placa de sacrifício (d)

O anel de distribuição de gás de proteção é colado abaixo da mesa de trabalho. Um furo roscado M6 permite conectar uma mangueira pneumática, cuja função é injetar o gás de proteção. No meio desse anel é fixada cilindro do volume de trabalho, que possui oito furos com diâmetro

de 0,8 mm para distribuir o fluxo do gás de proteção na camada distribuída.

A camisa elástica, montada entre o cilindro e o pistão, cumpre principalmente a função de estanqueidade, tanto dos gases de proteção empregados, como também para evitar que o pó metálico atinja os elementos mecânicos disposto abaixo da mesa de trabalho. Para testar a camisa elástica é avaliado o deslocamento do atuador linear e o regime elástico do material a ser adotado, também é considerando possível acúmulo de pó metálico e desgaste por aplicação continuada de esforço. Foram feitos vários testes de montagem com diversas materiais elastomeros como: luva de látex, luvas de cirúrgicas e preservativos. A única solução, que possui elasticidade para ser montada entre anel de fixação e pistão da mesa de construção sem ocorrer danificação, foi a luva de látex, porém, essa peça deve ser considerada consumível no sistema, pois a luva é danificada após alguns ciclos de uso, como ilustrado na Figura 36. Devido à vida útil limitada da camisa elástica, é necessário um anel de acoplamento de fácil montagem durante processo. Para esta solução foi usinado um anel de fixação na extremidade inferior montado com dois parafusos laterais.



Figura 36 – (A) Camisa elástica montada na base do pistão e na parte externa inferior do cilindro de trabalho (B) camisa elástica danificada.

4.2 COMANDO E CONTROLE ELETRO-ELETRÔNICO

A eletroeletrônica é constituída principalmente pelo subsistema de comando/controle, formado com os elementos elétricos e eletrônicos, montados no gabinete do sistema e na IHM, que permite realizar as funções de comunicação e transferência das informações entre usuário e equipamento. A Figura 37 mostra um esquema simplificado do gabinete elétrico e a correlação entre os elementos do gabinete e os elementos externos, com a parte mecânica e IHM.

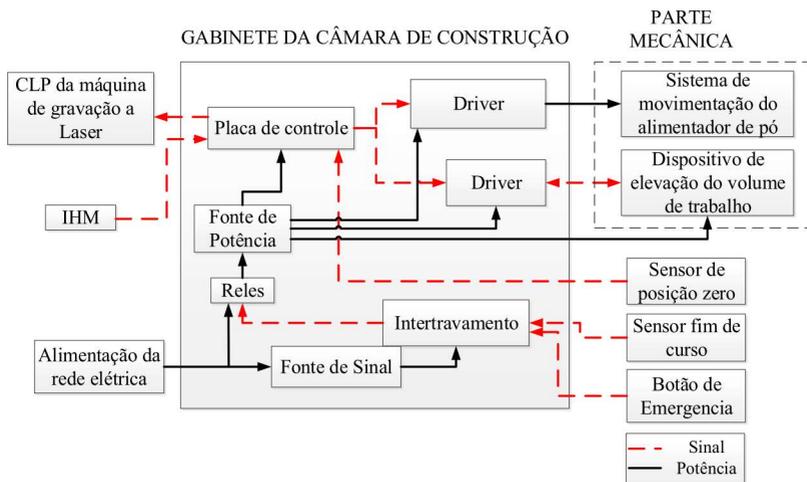


Figura 37 - Esquema simplificado do gabinete elétrico

Os sistema de movimentação do sistema mecânico, citados anteriormente, estão apresentados no esquema como uma das saídas para o sistema eletroeletrônica, onde o recebimento do sinal é controlado pelos drivers. Os periféricos com transdutores, botão de emergência, CLP e IHM estão associados no bloco de intertravamento e placa de controle. Eles são responsáveis pela entrada de sinais para o equipamento, que executa funções referentes a cada evento ocorrido. A rede elétrica fornece a energia para os blocos dos componentes do gabinete, que serão apresentadas nas seções seguintes.

4.2.1 Placa de controle

A placa de controle é um dos componentes mais importantes da parte eletroeletrônica. É o elemento que recebe as informações dos periféricos conectados no gabinete do equipamento, e transfere os pulsos elétricos para as saídas digitais.

Esta placa é constituída por um módulo *Arduino nano* e demais componentes elétricos. A seleção deste elemento foi motivada pela disponibilidade e as vantagens como: os números de pinos de I/O (Input e Output) e a plataforma programável. A Figura 38 ilustra o detalhamento das conexões externas da placa de controle e suas funções.

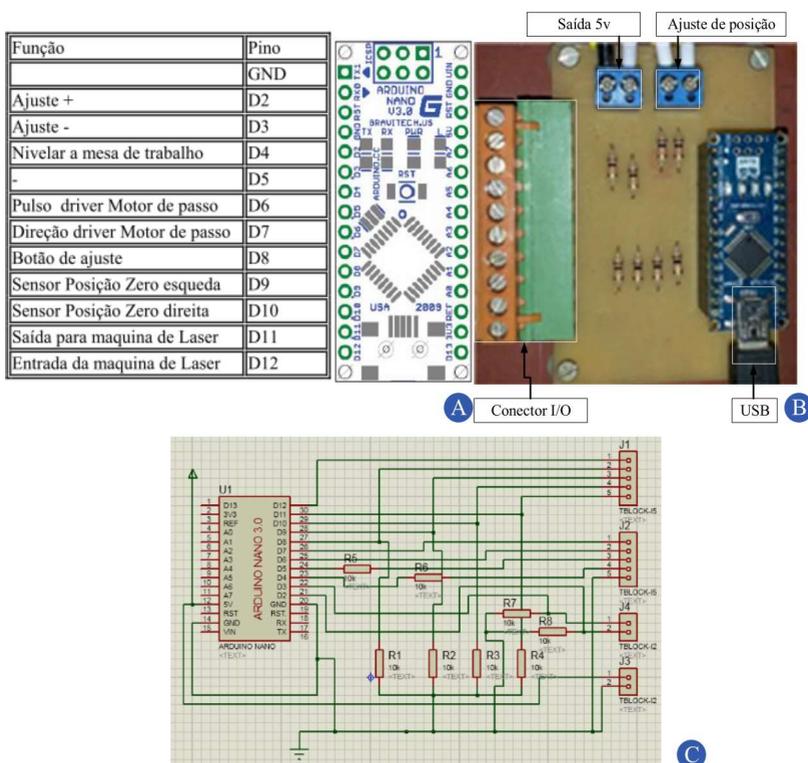


Figura 38 - As funções referente a cada pino do Arduino (A), a placa física (B) e o circuito da placa de controle (C). Adaptado do Arduino LLC (2015) [46]

A entrada USB, localizada na extremidade inferior direita da Figura 38 (B), é responsável pela alimentação da placa de controle e modificação do código-fonte gravado no microcontrolador. O conector I/O é a principal entrada e saída da placa, cujas funções englobam a comunicação com a máquina de gravação a LASER, o controle de IHM e os sinais digitais a serem processados no driver de acionamento. A saída de 5 V na parte superior da placa é a fonte de alimentação para os elementos como transdutores e os botões, que irão ser descritos posteriormente. O bloco de ajuste de posição está ligado ao painel IHM. Ele recebe o comando deste painel e realiza o posicionamento manual do sistema.

4.2.2 Drivers de acionamento

O driver do sistema de acionamento processa a tensão e a corrente para o componente de acionamento. Assim, o sistema realiza o movimento de acordo com as grandezas mecânicas necessárias a partir de sinais de comando provenientes da placa de controle. Esse segmento deve atender aos requisitos de posicionamento como: controle de velocidade e resolução de incremento.

Para o sistema de movimentação do alimentador de pó foi empregado um driver do motor de passo modelo *2H Microstep Driver*. Esta solução foi adotada, pois a configuração do driver é compatível na corrente e o valor de resolução deve estar dentro de uma faixa específica do motor. O intervalo de alimentação do driver vai de 18 a 50 V CC, a faixa do pico de corrente varia de 1 a 4,20 A e o número de pulso por revolução pode ser ajustado de 400 até 25600 pulsos/revolução. A Figura 39 mostra o esquema da conexão do driver [47].

Para controlar o acionamento do sistema de movimentação do alimentador de pó, o driver é alimentado por uma fonte CC de 24 V. A resolução selecionada foi de meio passo e a configuração para corrente nominal foi de 0,71 A, que atende a especificação do motor de passo.

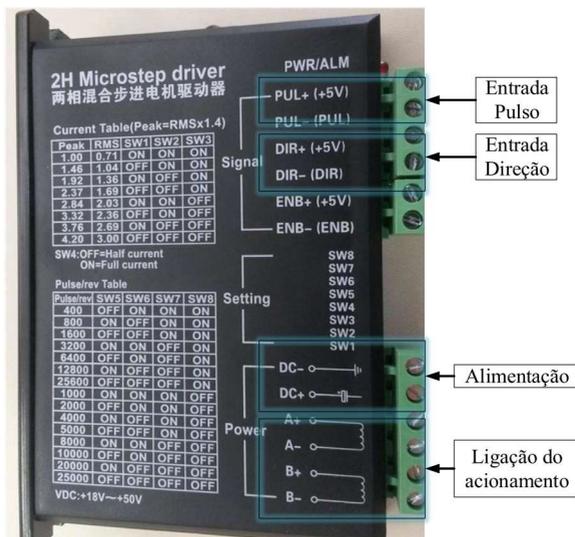


Figura 39 - Esquemático do *Driver*

No dispositivo de elevação do volume de trabalho, o atuador linear da empresa *Phisik Instrument* possui um driver específico para controlar o módulo de acionamento. O driver utilizado é o modelo *C863 DC MOTOR CONTROLLER* da série *Mercury*, alimentado pela fonte de 15V CC. A comunicação deste driver é por meio da saída de padrão D-Sub de 15 pinos para o atuador linear. O conector Mini DIN de 9 pinos faz a comunicação com a placa de controle e a porta USB comunica com o computador, como ilustrado na Figura 40 [48].

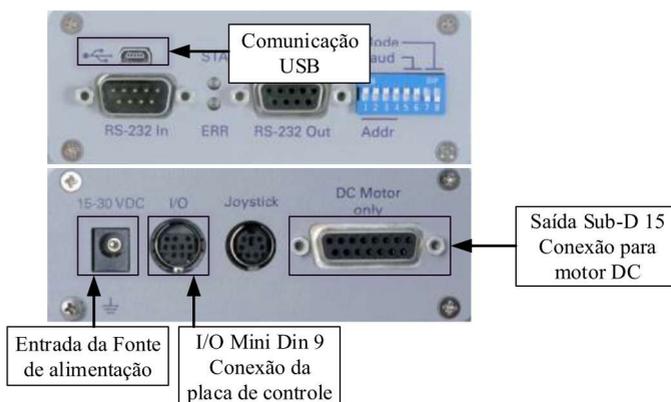


Figura 40 - Conexões do C863 DC MOTOR CONTROLLER. Adaptado de [48].

4.2.3 Fontes de alimentação

As fontes de alimentação são componentes elétricos que transformam a energia fornecida da rede local para os equipamentos eletroeletrônicos do sistema, com parâmetros elétricos adequados. Geralmente estes parâmetros são baseados no valor da tensão e da corrente, dependendo do componente utilizado.

Conforme citado anteriormente, as fontes disponíveis no sistema podem ser divididas em duas classificações: as fontes de sinais e de potências. As fontes de sinais fornecem a energia para a placa de controle, os relés e outros componentes periféricos. As fontes de potência alimentam os itens que necessitam de mais demanda de energia, como os drivers e referentes acionamentos.

As alimentações do tipo de sinais estão presentes em duas partes: no intertravamento e nos relés, que são alimentados por umas das saídas da fonte modelo MS-100-24 para atender o pré-requisito de 24 V do relé. Na placa de controle, os componentes conectados são alimentados com tensão de 5V na saída da fonte de alimentação USB. A Figura 41 apresenta o modelo da fonte de alimentação USB utilizado nessa aplicação.



Figura 41 - Fonte de alimentação 5V

O *driver* e o atuador linear já possuem a fonte de potência indicada do próprio fabricante. O modelo HEG42-150300-7 da empresa *HiTRON electronics Corporation* fornece energia para o *driver C863 DC MOTOR CONTROLLER*, e a fonte do modelo PUP55-14-B1-S da empresa *PRO-TEK Electronics Corporation*, para o atuador M410DG. Na Figura 42 estão as mostradas as especificações de duas fontes. O *driver* do motor de passo é alimentado pela segunda saída da fonte MS-100-24 para atender a tensão de 18 a 50 V CC[48].

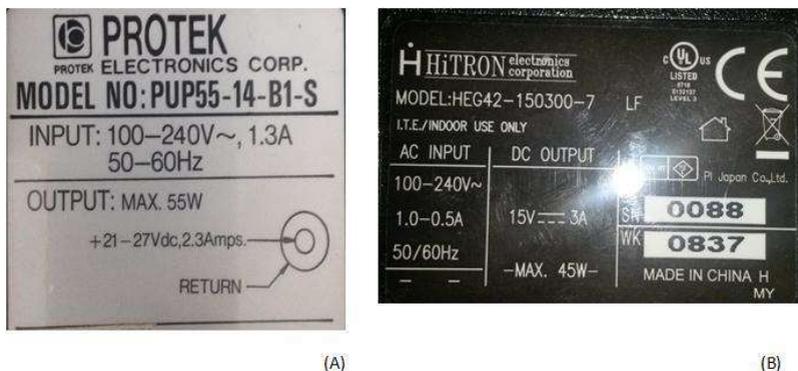


Figura 42 – Placas de identificação das fontes: (A) modelo PUP55-14-B1-S da empresa PRO-TEK Eletronics Corpration; (B) modelo HEG42-150300-7 da empresa HiTRON electronics Corporation

4.2.4 Circuito de intertravamento

Durante a execução de tarefas em uma máquina automatizada, podem ocorrer falhas inesperadas, e, em muitos casos, estas falhas podem comprometer o funcionamento do sistema e comprometer a segurança para o ambiente e o operador da máquina.

As falhas citadas anteriormente incluíam o movimento que ultrapassava os limites estabelecidos do fim de curso, o mau funcionamento na parte eletroeletrônica e as condições indesejadas que devem ser preventivamente corrigidas antes de inicializar a operação na máquina. Para isto, é necessário instalar um circuito de intertravamento, cuja função é conter o funcionamento de sistema sem passar por um bloco lógico.

O estabelecimento do circuito de intertravamento é baseado nas informações das condições lógicas e nos diferentes elementos do sistema. O funcionamento desse circuito deve ser acionado por os componentes limitantes e de fácil acesso para os usuários, como o botão de emergência e os sensores de fim de curso.

A Figura 43 mostra o circuito de intertravamento. A alimentação do sistema é fornecida pela fonte de 24V, que energiza o fim de curso quando a chave geral for acionada. Os dois sensores do tipo normalmente fechado formam a ligação em série, que garante o corte de energia do sistema, assim que um dos sensores for acionado. Um botão de normalmente aberto é ligado paralelamente nessa parte do circuito, que possui

função de liberar o intertravamento manualmente quando ocorre a mudança de estado dos sensores. Este segmento permite que o operador realize o ajuste manual via painel IHM, se a unidade de movimentação ultrapassar o limite estabelecido. A chave do tipo normalmente fechado PE representa o botão de emergência localizado na estrutural mecânica.

Os dois blocos K1 e K2, localizados na parte inferior do circuito, correspondem aos relés que executam as funções de intertravamento para o sistema eletrônico. Os pontos de A1 e A2 representam as conexões que energizam as bobinas de relé. Estas bobinas são responsáveis por estabelecer os contatos dos terminais, que passam a energia para as fontes. O estado dos relés são normalmente fechado. Esta situação pode ser alterada dependendo das condições ocorridas nos componentes na parte anterior do circuito e quando o usuário considera as ações realizadas potencialmente perigosas. Neste caso, o suprimento de energia pode ser interrompido imediatamente, pois os terminais estão conectados diretamente no gabinete elétrico.

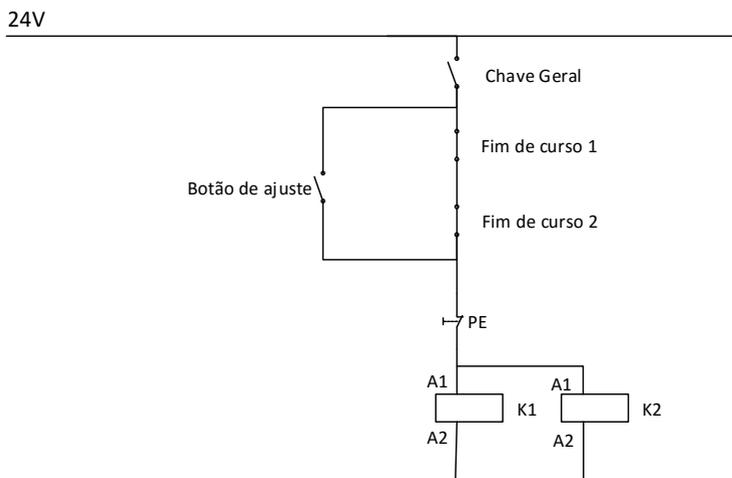


Figura 43 – Esquema do Circuito de intertravamento

4.3 INTERFACE DE CONTROLE

O usuário aproveitará este segmento para realizar a função de gerenciamento e comando do sistema. A interface foi projetada em duas partes: a IHM e um painel de controle de eixo vertical do *software PIMi-kroMove*, ambos serão apresentados a seguir.

4.3.1 Interface Homem Máquina (IHM)

O painel de IHM é um dos principais elementos que permite o usuário estabelecer comunicação com a parte de controle do equipamento. A base deste elemento é formada por uma Placa de Circuito Impresso (PCI) de controle, uma chave de acionamento geral e um botão de ajuste, conforme apresentado na Figura 44.

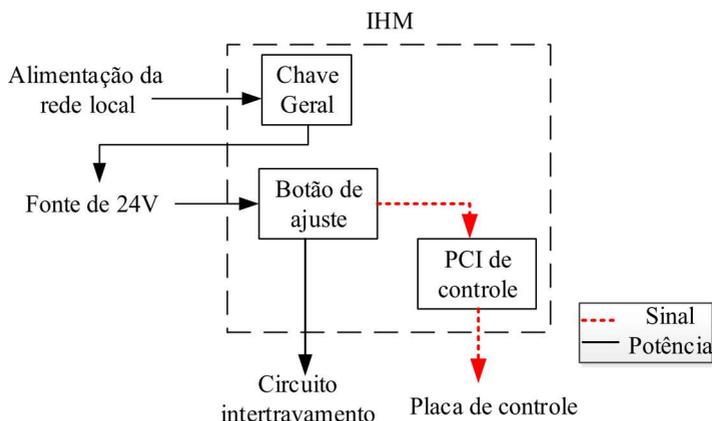


Figura 44 - Esquema de IHM

Os itens incluídos no bloco IHM representam as funções essenciais para o usuário comandar o funcionamento do sistema, independente de outro meio de comunicação. A chave geral, localizada na parte superior do painel, é responsável por energizar a fonte de alimentação. O botão de ajuste está localizado na entrada do circuito de intertravamento. Neste segmento só será acionado se o sistema de movimentação precisar entrar no módulo de ajuste manual. Para poder ajustar manualmente os eixos de movimento em duplo sentidos, foi projetado uma PCI de controle. Conforme a Figura 45. O PH+ e PH- representam os botões de controle para a movimentação do distribuidor de pó, e o ME+ e ME-, para a mesa de elevação ou futura aplicação de ajuste focal do LASER. O pino 1 do conector é ligado ao botão de ajuste para que a PCI de controle entre em funcionamento só quando a chave de ajuste é acionada.

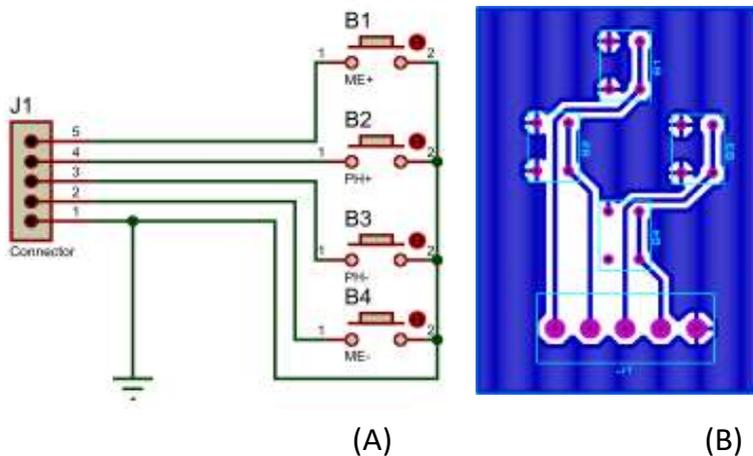


Figura 45 - PCI de controle: (A) Circuito; (B) PCI

4.3.2 Painel de controle da mesa de elevação (eixo vertical)

O sistema de atuador linear do sistema de elevação possui uma construção mais sofisticada. A empresa *PhisikInstrument* forneceu, no próprio programa, um painel de controle para que os usuários visualizassem a posição do eixo, e ajustassem os parâmetros de movimento como velocidade e deslocamento para cada incremento.

Como exibido na Figura 46, o quadro de eixo disponível mostra o modelo de atuador que está sendo controlado. O estado de eixo pode mudar entre *on target*, *moved*, *unreferenced*, *referenced* e *lost*. O estado de eixo *on target* finaliza o objetivo de movimento. O estado *moved* irá aparecer quando o eixo está ocupado para realização de um movimento. O estado *unreferenced* indica que não houve referência do eixo, sendo assim, modifica-se para o estado de *referenced*, que realiza o processo de referência do eixo. O estado *lost* irá aparecer quando o eixo perder a referência ou quando ocorrer um erro no sistema. A posição do eixo indica o valor do deslocamento da posição *Home* em unidade de milímetro. Os botões de ajuste podem ser utilizados para deslocamento do eixo. O alvo para posicionamento é usado quando há necessidade que o eixo se mova para uma posição numericamente conhecida. Os parâmetros como o incremento e a velocidade podem ser ajustados na parte da configuração.[49]



Figura 46 - Painel de controle da mesa de elevação (eixo vertical). [49]
Figura 1

4.4 SOFTWARE

A composição do *Software* é formada pelo programa de controle *PIMikroMove* da empresa *PhisikInstrument* e pelo *Arduino Software*. Este último é o ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment, IDE*) da plataforma de Arduino.[49], [50].

O *PIMikroMove* é a interface principal para utilização do atuador linear da empresa *PhisikInstrument*. Esta interface permite monitorar, ajustar e programar o equipamento em tempo real. O *Arduino Software IDE* é um aplicativo básico na utilização da placa de controle, que possui um microcontrolador Atmega328P da família AVR de empresa Atmel Corporation [51]. Os detalhes sobre *Software* são apresentados a seguir.

4.4.1 *Arduino Software IDE*

A placa de controle é construída baseada na utilização do microcontrolador Atmega328P, da série AVR fabricada pela empresa *Atmel Corporation*. São disponibilizados diversos *softwares* destinados a programar o microcontrolador, por exemplo, o próprio fabricante oferece uma plataforma de desenvolvimento chamada de *Atmel Studio*, para compilar e gravar o código-fonte de programação [46], [51].

No entanto, considerando a questão que necessita de uma plataforma livre e fácil de utilizar, foi empregado o ambiente de programação denominado como *Arduino Software IDE*, mais conhecido popularmente como *Arduino*. Para o desenvolvimento do código-fonte foi utilizada a linguagem *processing*, que é um programação *open source* baseada em linguagem C/C++. A Figura 47 mostra a interface durante a programação do *Arduino Software IDE*.

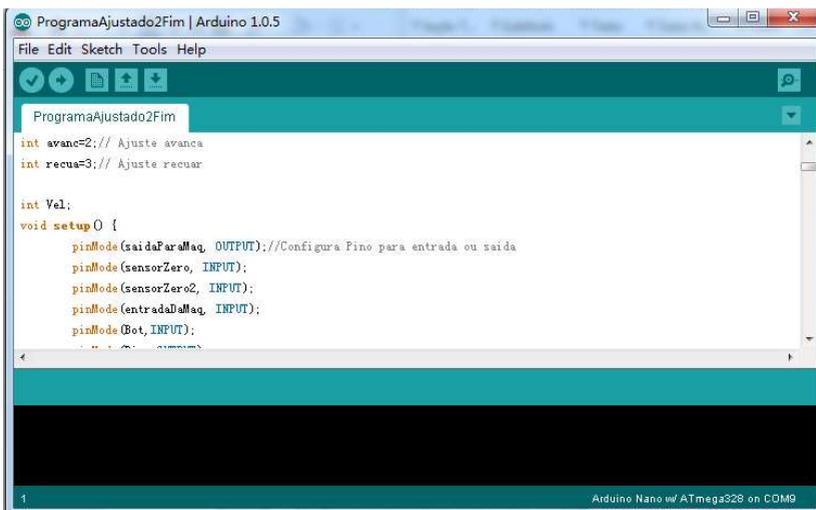


Figura 47 - Interface de programação do *Arduino Software IDE*

O código-fonte foi desenvolvido para realizar a função de controle do sistema. Seu funcionamento inclui desde o recebimento de sinais dos sensores até a decodificação dos sinais para comandar o movimento dos eixos. Este código permite também aos usuários alterarem no processo de equipamento e configurarem as posições iniciais dos eixos. Para melhor

apresentar a lógica de funcionamento, o código-fonte é dividido em três partes: *Setup*, *Loop* e as duas funções declaradas.

A função *Setup* inicia-se quando a placa de controle é energizada, criando as variáveis necessárias para execução do processo e configurando as portas digitais para saída ou entrada. Neste momento, para notificar a inicialização do equipamento, um sinal é emitido em uma das saídas digitais declaradas. Antes de iniciar o processo é preciso verificar se os sensores de posição zero, instalados na parte mecânica, não estão sendo acionados por nenhum obstáculo, caso contrário, o programa é interrompido até que o erro seja solucionado. Na Figura 48 está o fluxograma da função *Setup*.

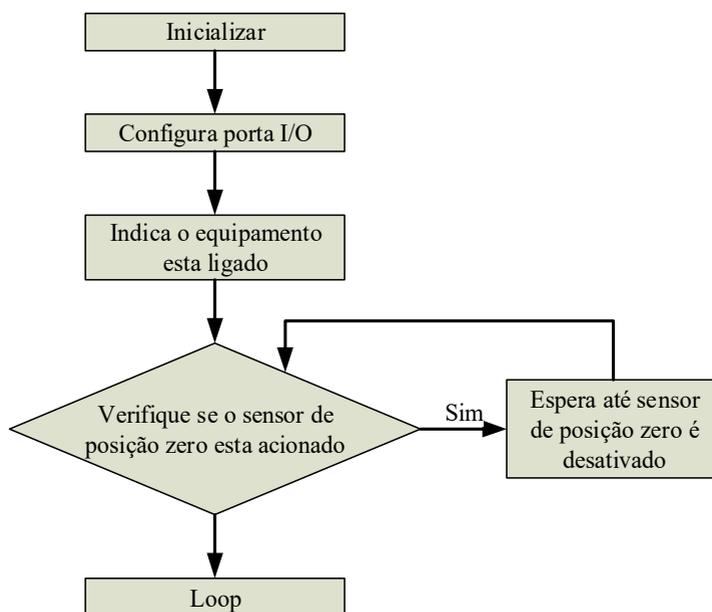


Figura 48 - O fluxograma da função *Setup*

A função *Loop* é responsável pela escolha entre duas funções declaradas para continuar o funcionamento do sistema. Como já foi relatado anteriormente, é preciso avaliar se o botão de ajuste está acionado, antes de iniciar a deposição de material, para que o sistema de posicionamento possa ser ajustado pela IHM. O fluxograma da função *Loop* é ilustrado na Figura 49.

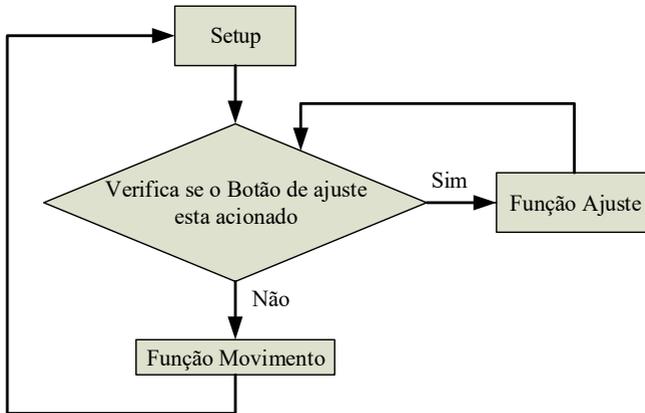


Figura 49 - Esquema da função Loop

A terceira parte do código-fonte é formada pelas duas funções declaradas: a função de ajuste e a função de movimento. A função de ajuste representa o processo de ajuste de posição manual, que é controlado pelos botões PH+ e PH- da IHM. Assim que o sistema recebe o comando, a placa de controle emitirá os sinais digitais para o *driver*, que realizará o deslocamento no sistema mecânico. Na Figura 50 mostra o esquema para essa função declarada.

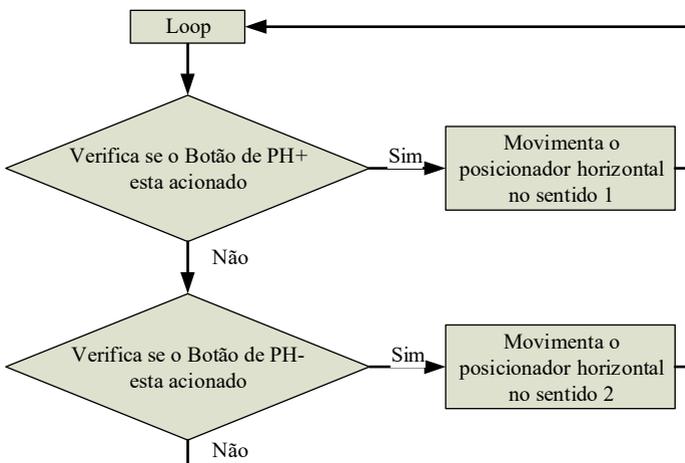


Figura 50 - Esquema da função ajuste

A função de movimento é a parte mais importante do código-fonte. Este segmento é responsável pela transformação da informação digital vinda do elemento externo em comando para os acionamentos e outros periféricos conectados nas portas digitais I/O da placa de controle. Assim que o programa sair da *Loop* e se direciona a essa função, é estabelecida a comunicação entre a câmara de construção e a máquina de gravação a LASER. O programa espera um sinal de permissão para inicializar o processo e notifica a área de trabalho que está sendo ocupada para realizar o processo de distribuição de material, garantindo o isolamento da área de trabalho. Um sinal digital é mandado para a porta I/O do controlador *C863 DC MOTOR CONTROLLER*, onde realizará o deslocamento do eixo vertical e nivelar a mesa de trabalho. A seguir, é verificado o sentido de movimento do posicionador horizontal por meio do estado do sinal digital na saída DIR. Após este procedimento o sentido de movimento é invertido. A seguir, é realizada a distribuição, processando o sinal PWM na saída PUL até que os sensores de posição zero alterem o estado. Um sinal é mandado para a máquina de gravação a LASER, com o intuito de notificar a finalização do processo. Neste momento, o programa volta para a *Loop*, fechando o ciclo de funcionamento, como mostra a Figura 51.

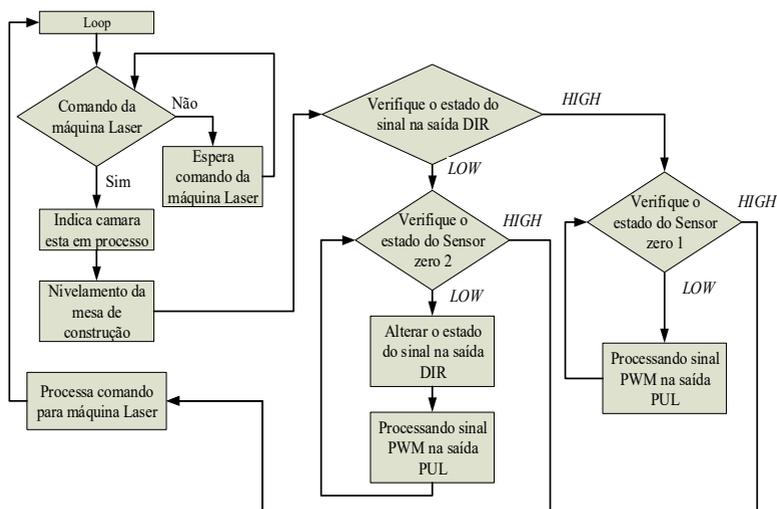


Figura 51 - Esquema da função do movimento

4.4.2 PIMikroMove

O atuador linear empregado na elevação do pistão do volume de trabalho é um dos componentes essenciais para este projeto, que exige o grau de precisão mais elevado e o controle em tempo real. O próprio fabricante deste produto oferece um *software* para trabalhar junto ao controlador *C863 DC MOTOR CONTROLLER*. Suas funções incluem a inicialização do eixo de movimento até o monitoramento do equipamento durante o funcionamento. A interface principal do *software* (Figura 52) permite ao usuário monitorar e modificar os dados e o parâmetro de controle diretamente. Outras funções são a programação dos macros e o teste das portas I/O. [49]

	Stage	<	<	Target	>	>	Step size	Position	HALT	State	Velocity	Servo	Use
AXIS1	M-405.DG	<	<	25.000004	>	>	0.100000	25.000004	HALT	on target	1.000000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AXIS2	M-111.2DG	<	<	0.000000	>	>	0.100000	0.000000	HALT	unreferenced	1.750000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AXIS3	V-106	<	<	0.000000	>	>	0.010000	0.0000	HALT	unreferenced	25.000000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
X	HEXAPOD_AXIS_X	<	<	2.700000	>	>	0.100000	2.700000	STOP	on target	0.500000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Y	HEXAPOD_AXIS_Y	<	<	0.180000	>	>	0.100000	0.180000	STOP	on target	0.500000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Z	HEXAPOD_AXIS_Z	<	<	0.280000	>	>	0.100000	0.280000	STOP	on target	0.500000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
U	HEXAPOD_AXIS_U	<	<	0.000000	>	>	0.100000	0.000000	STOP	on target	0.500000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
V	HEXAPOD_AXIS_V	<	<	-0.000000	>	>	0.100000	-0.000000	STOP	on target	0.500000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
W	HEXAPOD_AXIS_W	<	<	-0.000000	>	>	0.100000	-0.000000	STOP	on target	0.500000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 52 - Interface principal do Software PIMikroMove. [49]

Figura 2

A programação dos macros é realizada na interface de *Host macros* (Figura 53). As linhas de comando destes macros podem ser inseridas no campo de edição, onde pode ser configurado o tempo de espera e o número de repetição dos comandos. Nesta janela, também podem ser consultadas as referências sobre a função e a utilização dos macros. A lista dos arquivos contém todos os macros programados para observar a execução dos macros durante processo. O arquivo cabeçalho dos macros devem ser adicionados na opção de auto inicialização, localizada na parte inferior da interface. Quando o equipamento entrar em processo automatizado, isto significa que a função *Autoconnect* será acionada.

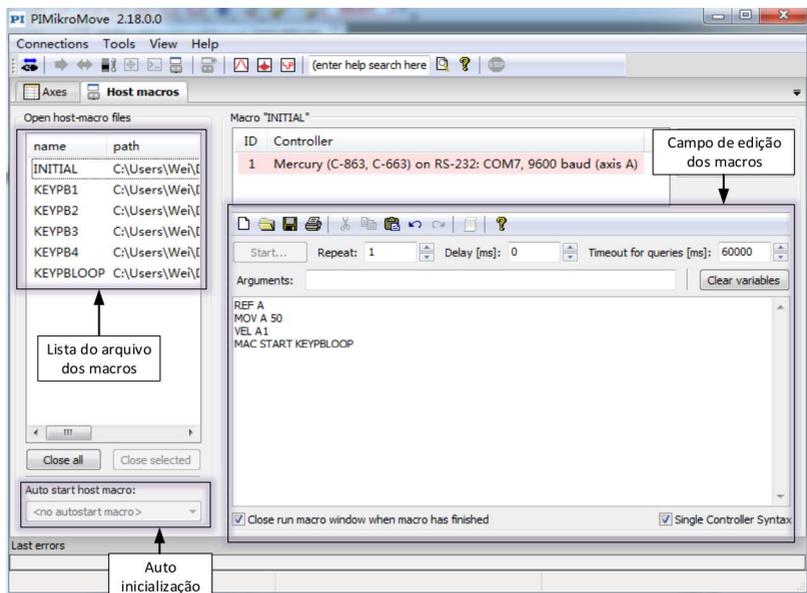


Figura 53 - Interface de programação de macros, adaptado de Physik Instrumente (PI) GmbH (2005) [49]

O programa dos macros age junto com o código-fonte gravado na placa de controle. Assim que a conexão é estabelecida, o atuador linear realizará a função de referência e configurará os parâmetros do eixo, e o eixo mover-se-á para a posição zero. Saindo do arquivo *INITIAL*, é inicializado o arquivo *KEYBLOOP*, que é o macro responsável pelo gerenciamento das funções nas portas I/O. O botão 1 é a entrada que recebe o sinal emitido na saída do microcontrolador e eleva a mesa para a posição de trabalho. O botão 2 e o botão 3 são as portas conectadas na IHM para realizar o ajuste manual no eixo vertical. O esquema dos macros é ilustrado na Figura 54.

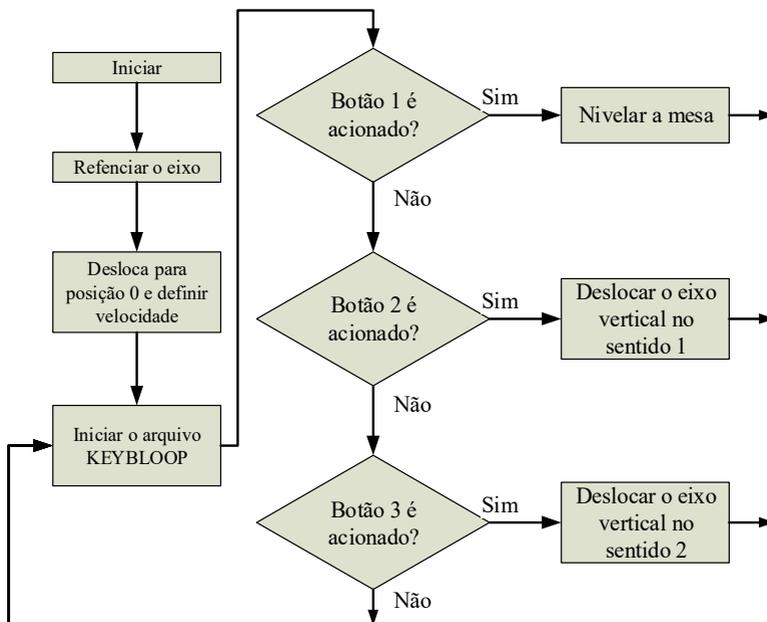


Figura 54 - Esquema dos macros do sistema de elevação do pistão

5 CONSTRUÇÃO E DESCRIÇÃO DO DISTRIBUIDOR DE PÓ METÁLICO

Neste capítulo serão apresentados os componentes desenvolvidos para a distribuição do material pulveriforme, apresentando detalhadamente suas concepções e características. No final do processo foi verificado o funcionamento do sistema em situação real, obtendo os elementos para analisar a eficiência do equipamento e descrever as vantagens e desvantagens sobre este trabalho.

5.1 PARTE DE DISTRIBUIÇÃO

Nos processos de SLS/ SLM é necessário depositar camadas regulares e finas sobre a área de trabalho para cada fatia a ser produzida. Entre as possibilidades de aplicação destas camadas, selecionou-se a deposição por gravidade e a eliminação do excesso pela raspagem por um rodo. Para satisfazer estas necessidades foram estudadas diversas possibilidades de deposição de pó: Tubeira circular, com movimentação em duas coordenadas sobre a área de trabalho (movimentação em coordenadas polares ou cartesianas). Para viabilizar esta concepção é necessário dispor-se de um sistema de dosador de pó metálico. A segunda opção é o emprego de uma tubeira linear que despeja o pó metálico sobre a área de trabalho em uma única passagem. Esta solução necessita de apenas um movimento de deslocamento da tubeira. Na Figura 55 mostra estas concepções para alimentador de pó.



Figura 55 – Dispositivo de deposição de pó metálico com movimentação angular, com dois reservatórios (A) e com um reservatório (B).

Para a obtenção de camadas regulares e finas, um rodo deve eliminar o excesso de pó metálico despejado sobre a área de trabalho. Este rodo deve ser guiado com velocidade uniforme e com precisão elevada de posição vertical, de forma que a camada de pó aplicada seja regular. O rodo pode ser guiado por um conjunto de guias lineares ou pela superfície da mesa de trabalho.

Uma terceira concepção integra a função de alimentação do pó metálico e de rodo em um único componente. Nesta concepção, a mesa de trabalho assume a função de guia da posição do rodo. O recipiente do pó metálico com uma abertura inferior, é assentado sobre a mesa de trabalho, de forma que, quando é deslocado sobre a área de trabalho, um volume de pó metálico, estabelecido pelo incremento de descida do pistão, é acrescido.

Os componentes que atuam na realização do processo de distribuição de pó são constituídos pelos seguintes elementos: a placa de vidro, que define a área de trabalho; a caixa de vidro, que possui a função de cavidade de trabalho e também a função de distribuidor do pó metálico de forma definida; e o pistão na mesa de elevação junto a placa de sacrifício, que limita as espessuras das camadas para materiais distribuídas, conforme apresentado na Figura 56. A seguir, são apresentados os detalhes sobre cada um desses elementos.

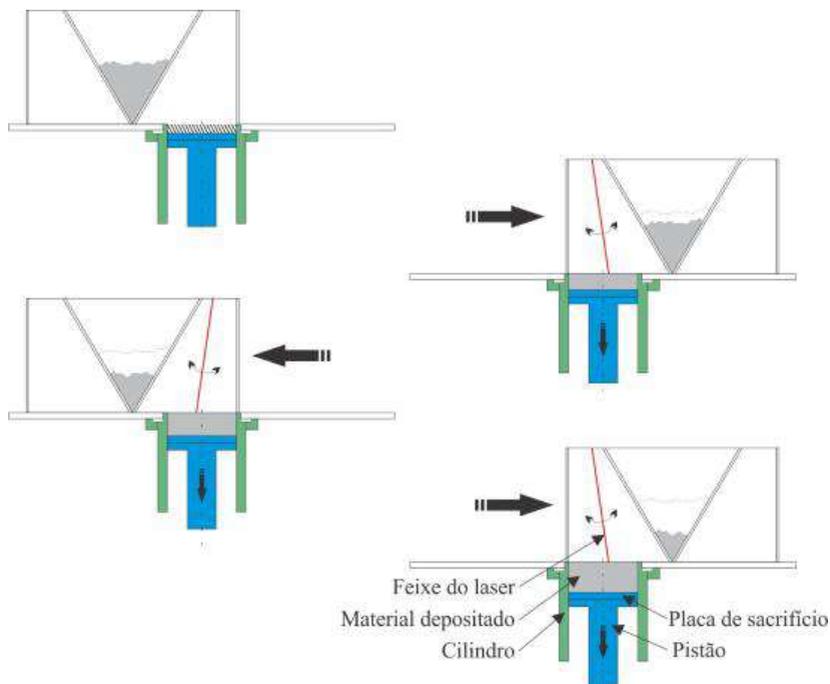


Figura 56 - Processo de distribuição do pó metálico

5.1.1 Placa e Distribuidor

O conjunto da placa e distribuidor é formado pela mesa de trabalho e distribuidor de pó metálico.

5.1.1.1 Mesa de trabalho

A distribuição do pó é realizado sobre uma área de trabalho fixada na região retangular da mesa de trabalho. Esta área está em contato direto com o pó metálico, sofrendo desgaste mecânico. Portanto, o componente para esta área deve ser feito com material de boa resistência ao desgaste mecânico e baixa reatividade química para não formar a reação com o pó metálico. Para atender às necessidades de planicidade, resistência ao desgaste e facilidade de substituição, alta dureza, baixa rugosidade, boa capacidade de lapidação e baixa condutividade térmica, obteve-se por empregar uma placa de vidro *float* com 8 mm de espessura para a mesa de

trabalho. Na região da área de trabalho foi previsto um orifício para situar o volume de trabalho.

O dimensionamento da placa de vidro foi definido baseado na área da mesa de trabalho da máquina de gravação a LASER da empresa *Welle-LASER*. A espessura da placa foi definida em 8 mm para garantir robustez. A cavidade para área de trabalho é feita na região centro da placa. O diâmetro desta abertura é de 100 mm, limitada pelas dimensões do alimentador de pó e da movimentação deste sobre a mesa de trabalho. Esta dimensão limita as dimensões das peças a fabricar, que são relativamente pequenas, como implantes dentários. A Figura 57 mostra a dimensões da placa de vidro.

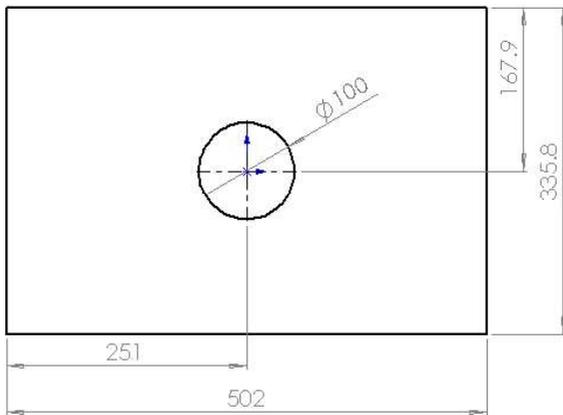


Figura 57 - Dimensão da placa de vidro

5.1.1.2 Recipiente de pó e distribuição do pó metálico

Para cumprir simultaneamente as funções de recipiente, de distribuidor e de raspador do excesso de pó metálico, foi concebida uma solução na qual um recipiente cilíndrico de vidro, aberto em suas extremidades é colocado sobre a mesa de trabalho e preenchido de pó metálico.

Ao se deslocar este sobre a área de trabalho, o volume decorrente do incremento de abaixamento do pistão é preenchido pelo pó que está no recipiente. Os contornos do recipiente cumprem a função de raspador e nivelador da camada depositada.

Ensaio preliminares, realizados no escopo da disciplina “Projeto Integrado” do curso de graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, empregando um copo de vidro cortado, com suas extremidades lapidadas,

mostraram que se obtém um bom resultado na deposição de uma camada, principalmente com regularidade da superfície da camada de pó deixada na área de trabalho. Verificou-se que a quantidade de pó metálico que era raspado da área de trabalho no retorno do cilindro de vidro sobre a área de trabalho era significativo. Verificou-se também pequenas diferenças na regularidade da camada depositada, em função da geometria do recipiente cilíndrico e da raspagem pela borda ser dependente da largura efetiva do comprimento de contato do vidro na direção de deslocamento.

Numa segunda concepção, também desenvolvida no escopo da disciplina acima referenciada, construiu-se um recipiente de vidro na forma de um reservatório retangular a partir de lâminas de vidro. Nesta segunda concepção acrescentou-se duas cavidades complementares ao recipiente de pó metálico, que nas posições de deslocamento extremas do recipiente de pó metálico, cercam integralmente a área de trabalho, objetivando possibilitar o controle da atmosfera na região de trabalho, Figura 58. O volume de recipiente de pó foi dimensionado para atender o preenchimento total do volume de trabalho.

Para garantir uma planicidade da superfície inferior do reservatório de vidro, depois de montada e colada com silicone, esta superfície foi lapidada empregando uma pasta de lapidação de carboneto de silício sobre um disco de lapidação de porcelanato retificado e polido.

Nesta segunda concepção verificou-se que a quantidade de pó que se acumulava fora do perímetro cercado pelo reservatório de pó, aumentava em cada passagem. Decidiu-se então reduzir a largura da banda de deposição, inserindo dois planos inclinados de vidro no interior da cavidade retangular.

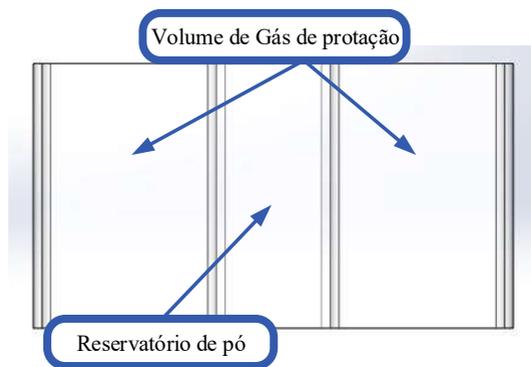


Figura 58 – Detalhe do distribuidor de pó com reservatório retangular.

Para determinar a inclinação destes planos inclinados, de forma que o pó deslizasse livremente em suas superfícies, verificou-se o ângulo de deslizamento natural, inclinação na qual o pó desliza sem necessidade de propulsão para deslizar para a parte inferior. O experimento é realizado por meio de deposição dos pós de ferro numa chapa inclinada. Um transferidor é fixado lateralmente para verificar o ângulo de inclinação desta chapa. Esse ângulo é aumentando gradativamente até que os pós de ferro iniciem o escorregamento, conforme ilustrado na Figura 59. Foi obtido um ângulo de 35° para inclinação mínima de escorregamento dos pós de ferro. As aberturas nas tampas nas duas cavidades da caixa de vidro é destinada para a entrada do feixe de Laser. A Figura 60 mostra a imagem do reservatório com os dois planos inclinados montado no interior da cavidade de reservatório.

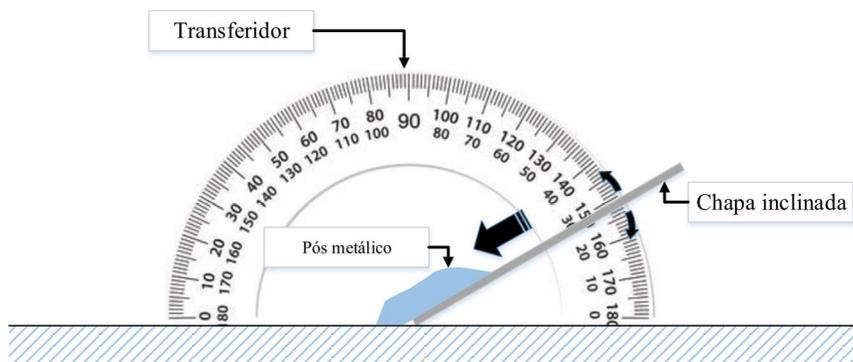


Figura 59 - Experimento para verificar o ângulo de escorregamento

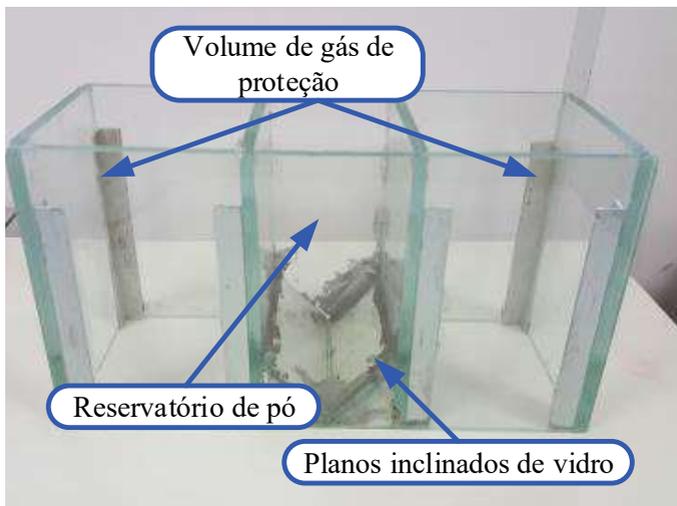


Figura 60 - Imagem do reservatório com os dois planos inclinados

A partir desta segunda concepção e sua modificação para abertura de alimentação linear, foi projetada uma terceira concepção onde todo o reservatório tem o formato de uma cunha. O comprimento total interno é de 265mm, incluindo as duas cavidades de ambiente controlado. A largura da caixa de 100 mm é baseada na dimensão do diâmetro do volume de trabalho, localizado centralmente abaixo da superfície de trabalho. Para satisfazer um volume de pó igual ao volume de trabalho, a altura do recipiente é de 150 mm. Os planos inclinados da cavidade de pó foram montados com uma inclinação de 62° . Para escolha deste valor foi considerado que além de ter que garantir o escorregamento livre do pó para a fenda de alimentação e um volume suficiente para preencher o volume de trabalho, Figura 61. Para garantir a uma maior resistência da caixa de vidro, nos cantos foram coladas cantoneiras de alumínio de 16 mm. A superfície inferior da caixa de vidro foi lapidada até que todas as partes estivessem sobre o mesmo plano referencial e a abertura da fenda de alimentação apresentasse uma largura uniforme de 1mm. Na Figura 61 mostra as dimensões e a caixa de vidro após a montagem.

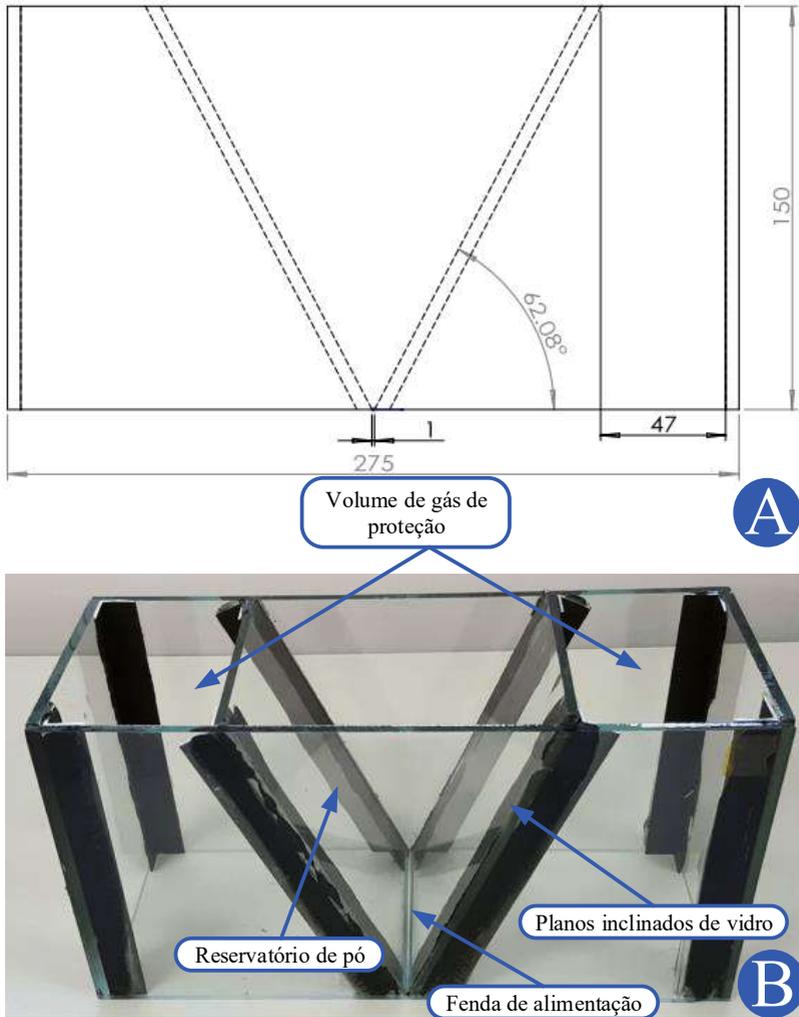


Figura 61 - (A) Dimensões e (B) Imagem do distribuidor de pó

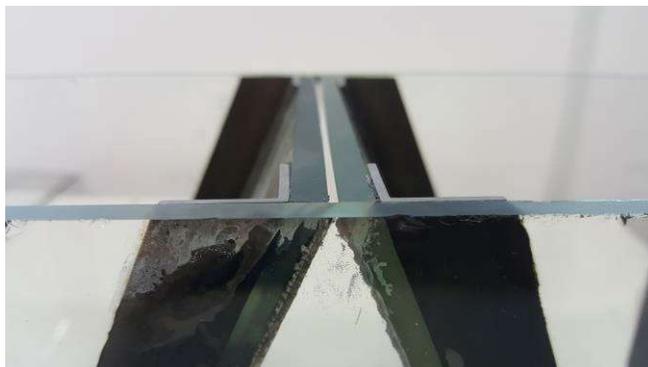


Figura 62 - Superfície inferior da caixa de vidro lapidada

5.1.2 Placa de sacrifício

Quando inicializar o equipamento, o pó metálico será depositado sobre uma superfície localizada na parte central da área de trabalho. Esta superfície vai sofrer o processo de fusão por varredura do feixe de LASER. Por essa razão, é preciso fabricar uma peça consumível para a superfície de construção. Para atender esse requisito, foi projetada uma placa de sacrifício, que é sustentada por um disco montado na ponta do pistão. A fixação da placa de sacrifício é feita por meio de um ímã instalado no disco de sustentação. A intenção para esta construção é facilitar a fixação e retirada da placa de sacrifício no início e final do processo.

5.1.3 Pistão

Para pode realizar a movimentação de deslizamento livre no cilindro de trabalho, o diâmetro do topo do pistão e da placa de sacrifício no anel de isolamento, foram confeccionados com 0,1 mm menor que o diâmetro do cilindro.

Numa concepção inicial de isolamento da parte inferior. Uma camisa deveria envolver o pistão e ser fixa no lado externo inferior do cilindro de trabalho. No entanto, esta concepção foi descartada, pois o atrito entre a camisa elástica e a parede do cilindro dificultam o movimento do pistão e da placa de sacrifício no interior do cilindro, danificando a camisa elástica durante o funcionamento da máquina. Na concepção final, a camisa elástica é fixada no pistão, que é feito por um cilindro de alumínio com 80mm de altura. Somando-se a altura com a espessura dos dois discos, a montagem desse segmento atinge a trajetória definida para a mesa

de elevação. Como a forma de fixação das duas peças é por meio de campo magnético, foi feito um ressalto na superfície de contato da placa de sacrifício, e um rebaixo no disco de sustentação, para que as duas peças possam ser encaixadas sem desvio lateral. A montagem desses componentes pode ser observada na Figura 63 (A), e a Figura 63 (B) e (C) mostra a imagem real da peça.

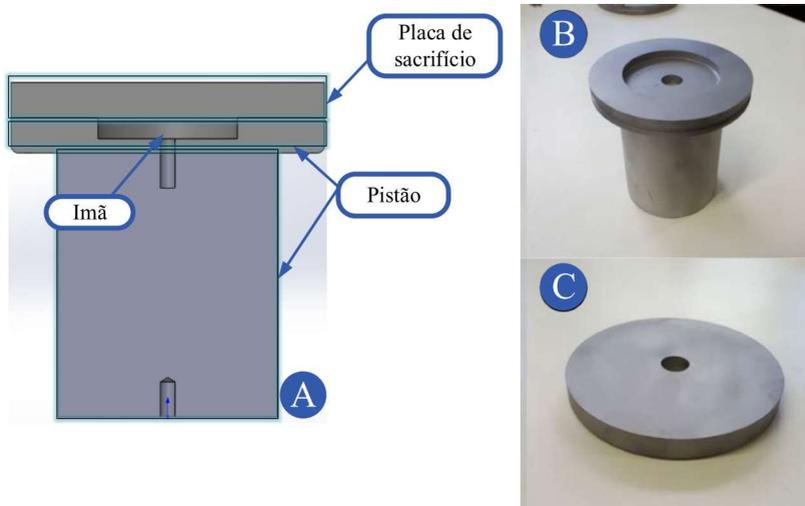


Figura 63 - (A) Montagem da placa de sacrifício na pistão, (B) imagem real da pistão e (C) placa de sacrifício.

5.1.4 Alimentação de gás no volume de trabalho

Para permitir um trabalho em atmosfera inerte, foi prevista um distribuidor de gás na parte superior do cilindro do volume de trabalho. No circuito de alimentação de gás foi instalado um rotâmetro que permite controlar a vazão na faixa de 10 L/min. A vazão de gás de proteção é controlada manualmente. A Figura 64 mostra o rotâmetro instalado na lateral da estrutura do equipamento.

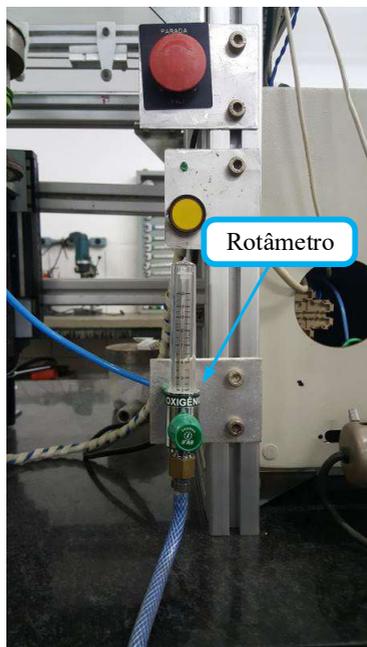


Figura 64 – Rotâmetro (Medição da vazão com um flutuador em um tubo cônico)

6 RESULTADOS DE PREENCHIMENTO DA CAVIDADE DE TRABALHO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos feitos durante o desenvolvimento do projeto de mestrado. Além de avaliar o correto funcionamento do equipamento é avaliada a característica das superfícies da camada de pó alimentada no volume de trabalho. E serão sugeridas possíveis soluções para trabalhos futuros.

6.1 POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO COM LASER E EXPERIMENTO DE DISTRIBUIÇÃO DE PÓ

Na fase inicial dos experimentos foi verificada a funcionalidade do sistema de comando e controle e verificação dos movimentos do sistema de distribuição de pó e sistema de elevação do pistão.

O sistema de movimentação do alimentador foi testado sem a caixa de vidro e com a caixa de vidro, para verificar se nas velocidades pretendidas de distribuição de pó ocorriam problemas que tivessem que ser reparados ou corrigidos no software.

O sistema de elevação do pistão foi verificado em termos de funcionalidade. Verificou-se o incremento mínimo, medindo a profundidade da cavidade (Superfície da mesa até o topo do pistão) para incrementos programados.

Tanto o sistema de movimentação do alimentador de pó como também o sistema de elevação do pistão se mostraram funcionais. Verificou-se um pequeno atrito entre o Pistão e o cilindro na região de maior profundidade do pistão, causado por um desalinhamento de montagem.

Na sequência foram efetuados os ensaios de distribuição de pós metálicos.

O experimento feito para verificar o funcionamento da distribuição de pó metálico no volume de trabalho foi realizado em diferentes condições. Os resultados obtidos desta etapa forneceram as informações e as amostras para analisar a eficiência deste equipamento em uma situação real, e também, indicar as possíveis melhorias para os trabalhos futuros e/ou fazer integração do equipamento nas outras máquinas.

Os ensaio se resumem em aplicar sucessivas camadas planas de pó metálico na cavidade de trabalho. A deposição de cada camada de pó metálico antecede a varredura de um feixe LASER sobre a camada, ou seja,

o processo preparativo para o sistema realizar o processo SLS/SLM. Os elementos variantes nos experimentos contêm a especificação do pó metálico e o fluxo de gás de proteção.

Foram avaliados seguintes aspectos durante o experimento de deposição de pó metálico na câmara de construção:

- a) as variações das camadas depositadas utilizadas diferentes faixas de granulometrias dos pós metálicos;
- b) os rendimentos da deposição dos materiais;
- c) a uniformidade das camadas depositadas;
- d) avaliação desgaste de distribuidor de pó metálico.

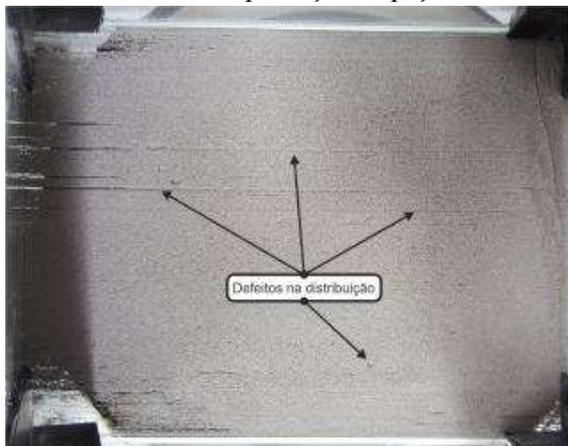
O experimento de distribuição de pó metálico foi documentado com uma câmera digital com 16 megapixels e um microscópio digital para captura as imagens, uma balança com capacidade de 1000 g e divisão de 0,1 g, para determinar as massas das amostras. As imagens capturadas são processadas pelo programa *Matlab (MATrix LABORatory)* em matriz para melhorar a compreensão das informações obtidas.

6.2 COMPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA CAMADA DEPOSITADA

Com a utilização de um botão e um *LED* foi possível executar a parte da deposição das camadas, as atividades fundamental na práticas da tecnologia SLS/SLM, verificando a capacidade do sistema protótipo e a solução proposta no início do projeto.

No primeiro experimento foram avaliadas as camadas feitas com um pós de ferro AHC 100.29 do fabricante *Höganäs*, cuja composição é de 99,94% de ferro puro (Fe) de diâmetro média de 124,35 μm (ANEXO A), Na sequência foram empregados os pós da mesma especificação, porém, peneirados para um diâmetro médio de 60 μm (segundo [21], é recomendado utilizar o pó metálico com granulometria média $\geq 55\mu\text{m}$). A seguir, é verificada a qualidade do matérias depositadas por meio de visualização. A Figura 65 (A) mostra a imagem da camada distribuída de um material de diâmetro média 124,35 μm que não passou por nenhum processo de peneiração. É possível encontrar vários riscos e imperfeições nas camadas distribuídas. Essas imperfeições são causadas pelos grãos de granulometria maior e aglutinados de grãos, que ficam aprisionados na face do distribuidor de material e dificultam os escorregamentos dos pós de granulometria menor. Se for aplicado o feixe de LASER, a falta de

material nas ranhuras pode causar defeitos no componente produzido. Na parte B está a imagem da camada feita por pó metálico de diâmetro médio de $60\ \mu\text{m}$. Nessa imagem mostra, que houve uma deposição uniforme de material, embora apresente uma falha no canto do lado, causada pela entrada do gás de proteção. Esta região localiza-se fora da área de trabalho, sendo assim, não interfere a produção da peça.



(A)



(B)

Figura 65 - (A) Imagens da camada depositada de pó de ferro com material não peneirado e (B) pós metálicos de diâmetro médio $60,22\ \mu\text{m}$

Para verificar as variações das camadas depositadas sob influência dos pós metálicos de características diferentes, foram preparadas amostras de pó de quatro faixas granulométricas: 35 - 63 μ m, 63 - 90 μ m, 25 - 90 μ m e 90 - 120 μ m. No ANEXO A são fornecidas as especificações dessas matérias. Na realização dos experimentos, foram empregadas amostras de pós metálicos de 200g. O fluxo de gás de proteção foi controlado numa vazão de 1L/min. O protótipo depositou, no processo, as camadas de 100 μ m por trintas repetições e velocidade de 565,2 mm/min em cada sequência de deposição para cada material. Dentre estas faixas granulométricas, o pó de 35 a 63 μ m foi analisado isoladamente por não se dispor a mesma quantidade de material. Este experimento foi conduzido com apenas 100g de material, e como os grãos das partículas são reduzidos, foi necessário diminuir a vazão do gás de proteção para 0,5l/min. A Tabela 9 mostra os dados dos experimentos realizados de sistema protótipo.

Tabela 9 Dados dos experimentos

Granulometria(μm)	Massa adicionada	Vazão de gás(l/min)	Num passada
38-63	100,00	0,5	15
63-90	200,46	1	30
90-125	200,97	1	30
25-90	200,88	1	30

Fonte: do autor

A densidade das amostras de pós metálicos foi calculado conforme a norma ISO 3923-1:2008[52], que mostra o método de medição da densidade aparente de pós metálicos, onde introduz o amostra numa proveta graduada e realiza-se a relativa vibração para os grãos ocuparem os espaços. Feito isso é realizado a leitura do volume determinar a massa da amostra descontando a tara da proveta numa balança de modelo UX4200H, cujo especificação de faixa de medição entre 0,5 a 4.200g, repetibilidade de 0,01g. As densidades aparentes são obtidos através de divisão da massa pelo volume de cada amostra. Os resultados desse experimento podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 Cálculo das densidades aparentes

Granulometria(μm)	Volume(ml)	Massa(g)	Densidade(g/ml)	Densidade(g/mm³)
38-63	40	138,4	3,4600	0,003460
63-90	50	170	3,4000	0,003400
90-125	50	170,18	3,4036	0,003404
25-90	50	151,99	3,0398	0,003040

Fonte: do autor

O volume depositado foi estimado com base do número de passagens do distribuidor sobre a superfície de trabalho, considerando a espessura de cada camada e a área de trabalho. A massa depositada pode ser estimado multiplicando este volume com o densidade aparente do pó, obtido nos experimentos realizados anteriormente.

A medida que o reservatório transfere o pó para o volume de trabalho, o nível superior de pó no reservatório não abaixa de forma regular, e o fim do experimento é ditado pelo fim do fornecimento de pó em alguma região ao longo da largura da fenda de distribuição. O rendimento de deposição é calculado pela relação entre e a massa adicionada ao reservatório e a massa depositada no volume de trabalho no final do experimento (começo de falhas na deposição), conforme mostrada na Tabela 11.

Tabela 11 Teste de rendimento

Granulometria(μm)	Volume depositado (mm^3)	Densidade (g/mm^3)	Massa Adicionada (g)	Massa depositada (g)	Rendimento para amostras de (100 e 200g) (%)
38-63	9537,75	0,0034	100	33,00	33,00
63-90	19075,5	0,0034	200,46	64,86	32,35
90-125	19075,5	0,0034	200,97	64,93	32,31
25-90	19075,5	0,0030	200,88	57,99	28,87

Fonte: do autor

Os resultados obtidos na distribuição de pó de aço na faixa da granulometria de 25 a 125 μm não apresenta problemas significativos em termos da qualidade da superfície da camada depositada. Verificou-se também, que uma contaminação do pó metálico por partículas maiores, leva a formação de riscos na superfície da camada depositada.

Além da aquisição de dados, foram avaliadas as qualidades das camadas depositadas pela visualização da imagem, como ilustrado na Figura 66. Por meio destes dados, é possível afirmar que a distribuição dos pós metálicos utilizado sofrerão pouca influência, se o protótipo trabalhar com os pós metálicos na faixa da granulometria de 25 a 125 μm .

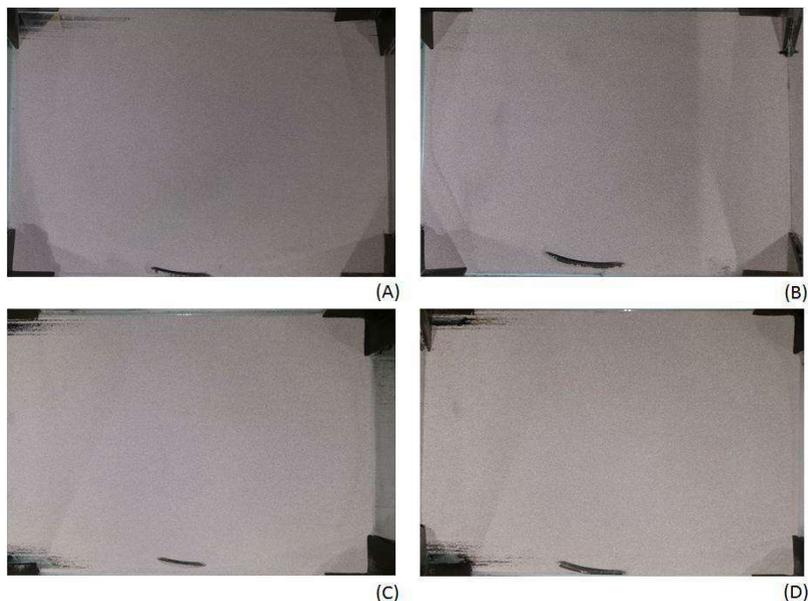


Figura 66 - Comparação das camadas distribuídas com material de (A) 35 a 63 μm , (B) 63 a 90 μm , (C) 25 a 90 μm e (D) 90 a 120 μm

Na etapa seguinte, foi aplicado o método de análise da superfície distribuída. A Figura 67 ilustra a imagem obtida desse processo. Nesta etapa pode ser observada a uniformidade das camadas depositadas por meio da presença da estrutura rugosa nos gráficos tridimensionais. O APÊNDICE D mostra todas as imagens capturadas e seus resultados obtidos no processo de análise.

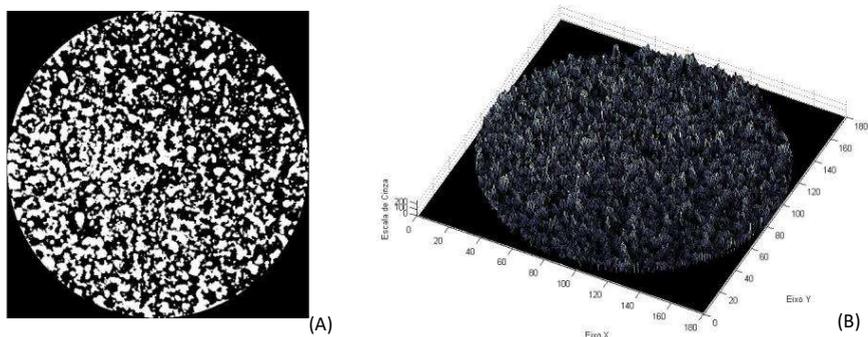


Figura 67 - (A) Imagem em preto-e-branco e (B) gráfico de tridimensional obtido na matlab

6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PÓ

Durante a realização do experimento foram encontrados falhas e pontos desfavoráveis para o funcionamento do sistema-protótipo. Alguns desses fatores são influenciados pelos elementos externos do processo, escolhas das soluções e métodos de usinagem. Outros fatores são encontrados depois de um período de experimento, surgindo por meio de desgaste dos componentes.

Um dos primeiros problemas encontrados está relacionado com a injeção de gás de proteção. Por não se trata de um processo real, optou-se pela utiliza de apenas o ar comprimido como gás de proteção. A injeção dos gases é controlada por um rotâmetro para oxigênio seco sem o filtro na entrada de gás, ilustrado na Figura 68 (A). No uso de ar comprimido para verificar a funcionalidade do sistema, a umidade inerente à rede de distribuição de ar comprimido do bloco B da Engenharia Mecânica se mostrou inadequada, pois a umidade condensou na tubulação e no volume de trabalho, levando a oxidação de peças metálicas e atrapalharam o processo da distribuição do pó metálico. Na Figura 68 (B) e (C) estão as imagens da deposição com presença da umidade no ambiente e das peças oxidadas.

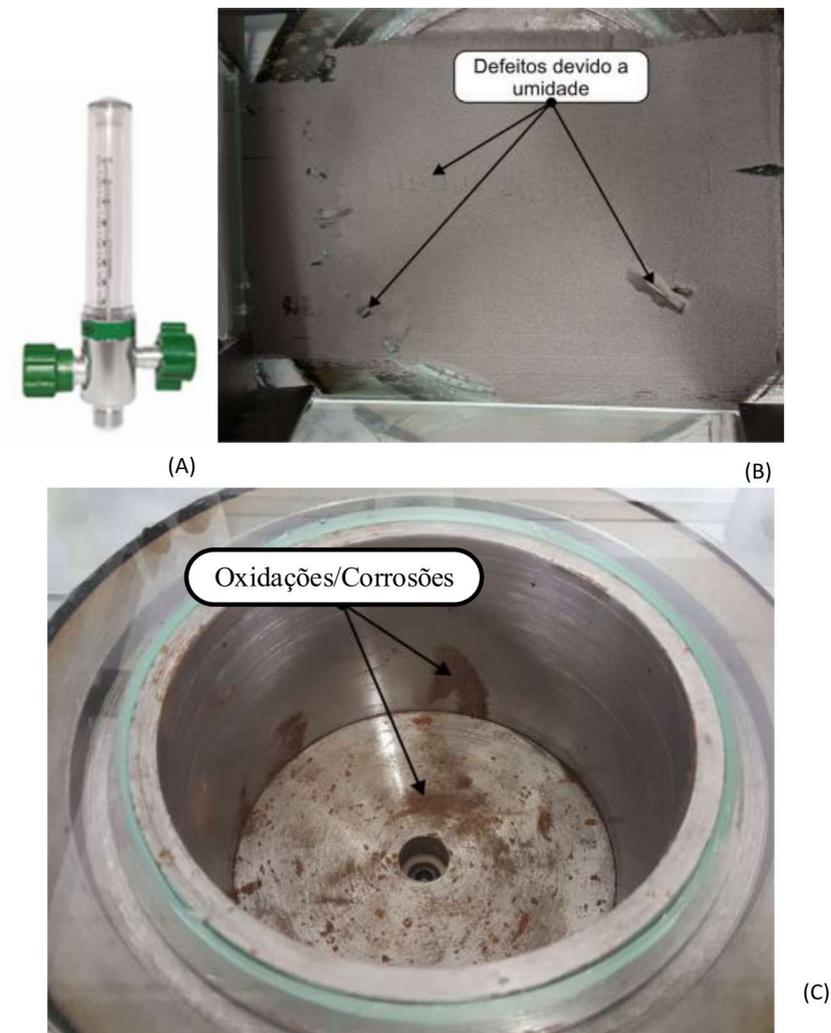


Figura 68 - (A) O rotâmetro de oxigênio, (B) distribuição de material com presença da umidade no ambiente e (C) oxidação das peças.

Outro problema encontrado foi o desgaste da superfície de assentamento do recipiente distribuidor de material. As placas de vidro inclinadas do reservatório apresentam um ângulo agudo na fenda de alimentação. Verificou-se que após alguns experimentos o canto vivo agudo desta região apresentou lascamentos, modificando a forma que se dá a

passagem do pó metálico sob esta superfície. Os dois fatores resultam em desvio da planicidade da superfície de assentamento da caixa de vidro do alimentador de pó. Verificaram-se lascamentos ao longo de toda a extensão da largura da fenda de alimentação, causando riscos nas camadas distribuídas e vazamento dos materiais no lado da caixa de vidro, como ilustrado na Figura 69. Para analisar detalhadamente o comportamento da camada distribuída, foi capturado uma imagem utilizando o microscópio, e esta imagem é processada no *Matlab* com o mesmo procedimento descrito anteriormente. Como mostra no APÊNDICE E, foi possível visualizar uma área sombreada na imagem processada e também diferença de rugosidade no gráfico tridimensional.

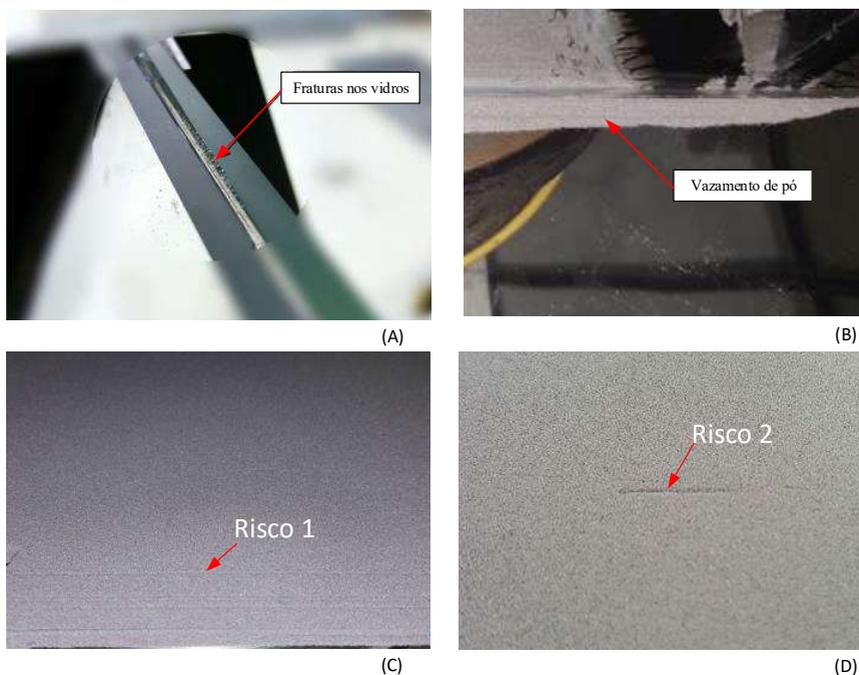


Figura 69 - Fraturas nos cantos agudos dos vidros inclinados do reservatório de pó (A); Vazamento de pó de aço nos contornos de reservatório de pó (B); Riscos presentes nas camadas depositadas (C) e (D).

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi construída uma bancada automatizada para distribuição de pó metálico em uma área de trabalho para aplicação em processos de SLS/SLM. A metodologia PRODIP se mostrou adequada para a organização das informações e na busca de soluções de problemas. O desenvolvimento de projeto foi baseado nos princípios de soluções encontrados. Após a conclusão da bancada de ensaios foram testadas as funcionalidades do distribuidor de pó e da mesa de elevação avaliando as características de camadas de pó metálico aplicadas. Foi observado teoricamente que o protótipo pode ser acoplável a diversos modelos de máquinas LASER e pode realizar a fase preparativa do processo SLS. É necessário realizar mais testes na máquina LASER para comprovar sua aplicação.

O desenvolvimento do sistema de distribuição de partículas foi feito com base nos requisitos de projeto. Os maiores desafios foram referentes às fabricações dos componentes para atender a funcionalidade do equipamento e ao mesmo tempo aproveitar os dispositivos disponíveis, por exemplo, o atuador linear e o motor de passo no subsistema de acionamento.

As soluções, tanto da parte eletroeletrônica quanto do *software*, que trabalham em conjunto, permitiram que tanto a distribuição do pó e a elevação da mesa de trabalho se dessem de forma satisfatória. A programação, o *software* da placa de controle e o macro do *PIMikroMove* podem ser alterados para aplicações específicas. O circuito de intertravamento e a IHM foram projetados para manter as interações entre os usuários e o equipamento em condição estável.

Nos experimentos feitos com o protótipo, com o intuito de analisar o funcionamento do equipamento na execução dos processos preparativos de impressão 3D de tecnologia SLS/SLM, realizou-se a integração de equipamento por meio de comunicação digital de duas vias. O resultado demonstra que é possível estabelecer a comunicação desse protótipo com as máquinas de LASER de forma simples, sem requerer a instalação de um novo software.

Na análise e na avaliação da superfície depositada dos materiais com características conhecidas e distintas observou-se que as camadas distribuídas pelo protótipo possuem qualidade uniforme e satisfatória para os processos posteriores.

Durante o experimento são encontrados alguns problemas referentes à realização da deposição de pós metálicos. Especialmente os relacionados a estanqueidade do sistema de fornecimento de gás de proteção. Os testes realizados com ar comprimido sugerem a necessidade de filtro na entrada do gás. A umidade do ar comprimido pode atrapalhar o processo e levar a oxidação das peças metálicas na mesa de elevação; outro problema encontrado foram os desgastes das peças de distribuição, que causam imperfeições nas camadas distribuídas.

Os resultados obtidos confirmaram que o protótipo cumpre suas funções: de distribuição de pó metálico, de ser modular, de comunicação com a máquina LASER e a interação com o usuário. A distribuição foi realizada em trinta camadas de 100 μm de espessura, o material de ferro AHC 100.29 do fabricante *Höganäs*, em forma de pó obteve característica uniforme, comprovando a funcionalidade da câmara de construção para a máquina do processo SLS/SLM.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprofundar o conhecimento sobre a tecnologia de fabricação por meio de equipamento SLS e sua melhoria, recomenda-se que sejam realizados os seguinte itens nos trabalhos futuros:

- a) Implementar o cabeçote LASER e testar a câmara de construção como máquina de SLS para verificar mais detalhadamente o funcionamento de sistema;
- b) Projetar alterações nos componentes de deposição de materiais, possibilitar substituição das peças desgastadas;
- c) Desenvolver alterações para placa de vidro na área de trabalho, evitando acúmulo dos materiais vazados pelo distribuidor de material;
- d) Implementar o sistema de filtro na entrada da gás de proteção;
- e) Pesquisa sobre método facilitado de instalação dos conjuntos de anel de isolamento na mesa de elevação;
- f) Analisar a possibilidade de instalação de novos componentes para isolamento da área de trabalho, além da camisa elástica.

REFERÊNCIAS

- [1] VOLPATO, N.; HENRIQUE AHRENS, C.; PETRUSCH, G.; DE CARVALHO, J.; ROBERTO LOPES DOS SANTOS, J.; VICENTE LOPES DA SILVA, J. **Prototipagem rápida - tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007. 272p.
- [2] VENUVINOD, P. K.; MA, W. **Rapid prototyping: laser-based and other technologies**. 1st. ed. Hong Kong: Kluwer Academic, 2004. 400p.
- [3] STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser material processing**. London: Springer London, 2010. 576p.
- [4] GRIMM, T. **User's guide to rapid prototyping**. Dearborn, michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2004. 404p.
- [5] ASTM INTERNATIONAL. **F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies Rapid Manufacturing Association**, 2013. Disponível em: <<http://www.ciri.org.nz/nzrma/technologies.html>>. Acesso em: 20 mai 2016
- [6] GMBH, ©. P. I. (PI). **MS163E Software Manual Mercury™ GCS Commands PI General Command Set Engineer**
- [7] GEBHARDT, A. **Understanding additive manufacturing**. Munich: Hanser Publication, 2011. 167p.
- [8] PINKERTON, A. J. **Lasers in additive manufacturing**. 4. Ed. London: Springer, 2015. 576p.
- [9] GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. NY: Springer New York, 2015. 510 p.
- [10] SANTOS, F. C. dos. **Desenvolvimento de software para equipamento de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser (sls)**. 2009. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2009.
- [11] V. E. BEAL, “**Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção.**,” 2002.98p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), 2002.
- [12] SUK-JOONG L.KANG. **Sintering densification, grain growth, and microstructure**. Oxford: Elsevier, 2005. 279p.
- [13] POPRAWE, R. **Tailored Light 2**. 1 ed. Aachen: Springer Berlin Heidelberg, 2011. 604p.

- [14] SOLANO, M. R. C. **Fabricação de dispositivos porosos de policaprolactona e ibuprofeno por sinterização seletiva a laser para aplicações em regeneração óssea**. 2013. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2013.
- [15] GALIOTTO, A. **Estudo da sinterabilidade de materiais ferrosos contendo elevados teores de sulfetos como aditivos**. 2005. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2005.
- [16] KRUTH, J.-P.; LEVY, G.; KLOCKE, F.; CHILDS, T. H. C. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607001540>>. Acesso em: 04 fev 2016
- [17] LEVY, G. N.; SCHINDEL, R.; KRUTH, J. P. Rapid Manufacturing and Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State of the Art and Future Perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2003p.
- [18] HO, H. C. H.; GIBSON, I.; CHEUNG, W. L. Effects of energy density on morphology and properties of selective laser sintered polycarbonate. **Journal of Materials Processing Technology**, 1999q.
- [19] AJATA, F. **Análise de equipamento protótipo de sinterização seletiva a laser para a fabricação de peças poliméricas com gradação funcional de material**. 2012. 241p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2012.
- [20] KLAHN, C.; LEUTENECKER, B.; MEBOLDT, M. Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing. **Procedia CIRP**, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827115008938>>. Acesso em: 02 fev 2016
- [21] READY, J. F.; FARSON, D. F. **Lia handbook of laser materials processing**. Orlando: Laser Institute of America, 2001. 740 p.
- [22] XING, J.; SUN, W.; RANA, R. S. 3D modeling and testing of transient temperature in selective laser sintering (SLS) process. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, 2013. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402611007017>>.
Acesso em: 04 fev 2016

[23] 3D SYSTEMS. **Sinterstation ® Pro SLS ® System**, California :3D Systems Corporation, 2008. 2 p.

[24] **Sinterstation ® Pro SLS ® System**. 4'08" Direção: 3D System.
Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=lc0uVO_uT0s>. acesso em março de 2015.

[25] NICKELS, L. Additive manufacturing: A user's guide. **Metal Powder Report**, 2016. 6p. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026065716001478>>. Acesso em: 2 jan 2016

[26] Renishaw, "**Renishaw fact sheet : additive manufacturing**," 2016. [Online]. Disponível em: <<http://resources.renishaw.com/en/details/renishaw-fact-sheet-additive-manufacturing--58726>>. Acesso em Março de 2015.

[27] **Renishaw AM250 Video**.4'45" Direção: Renishaw. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ecqeAXJnMz8>>. Acesso em Abril de 2015.

[28] Concept, "**X line 2000R ® Metall-Laserschmelzanlage**." p. 2, 2016.

[29] **Concept Laser Additive Metal Animation**. 8'41" Direção: Concept. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=5KzgrUPRzNw>>. Acesso em março de 2015.

[30] SLM Solutions, "**Sieving station PSX Unpacking station PRS Selective Laser Melting System**." 2016. 2p. Disponível em: <<https://slm-solutions.com/products/machines/slmr500hl>>. Acesso em Março de 2015

[31] **SLM 500HL New Advancements Released**. 1'57" Direção: SLM Solution. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bl0OdSsMDok>>. Acesso em Abril de 2015.

[32] Realizer, "**Datenblatt SLM 300**." 2p. Disponível em: <<http://www.concept-laser.de/en/industry/automotive/machines.html>>. Acesso em Abril de 2015

- [33] **REALIZER SLM 100 Selective Laser Melting**. 0'56" Direção: Realizer. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=UT7lQNhOweA>>. Acesso em Abril de 2015.
- [34] BERTRÁN, J. A. R. **Sistematização do processo de projeto em automação de máquinas cartezianas com acionamento eletromecânico-ênfase no posicionamento**. 2009. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2009.
- [35] LIMA STOETERAU, R. **Projeto de máquinas ferramentas introdução ao projeto de máquina ferramentas modernas**. 2004. 114 p. Apostila - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2009. Acesso em: 14 jun 2016
- [36] ALTINTAS, Y.; VERL, A.; BRECHER, C.; URIARTE, L.; PRITSCHOW, G. **Machine tool feed drives** *CIRP Annals - Manufacturing Technology* CIRP, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.010>>. Acesso em: 3 mar 2016
- [37] CHOWDHURY, S.; YEDAVALLI, R. K. Dynamics of belt-pulley-shaft systems. **Mechanism and Machine Theory**, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094114X15002700>>. Acesso em: 14 mar 2016.
- [38] ČEPON, G.; BOLTEŽAR, M. Dynamics of a belt-drive system using a linear complementarity problem for the belt-pulley contact description. **Journal of Sound and Vibration**, 2009.
- [39] ZHANG, F. quan; LU, L. ping; SHEN, M. de; CHEN, L. yi; CUI, G. zhao. Measurement Method to Object Distances by Monocular Vision. **journal Journal**, 2009.
- [40] THE MATHWORKS, I. **Mathworks imopen**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/images/ref/imopen.html>>. Acesso em: 14 mar. 2016.
- [41] GAO, Y.; XING, J.; ZHANG, J.; LUO, N.; ZHENG, H. Research on measurement method of selective laser sintering (SLS) transient temperature. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B7GVT-4P4FSYR-1/2/85877d004dd50cb5860a61569bda89ba>>. Acesso em: 06 jun 2016

- [42] BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. da. **Projeto integrado de produtos : planejamento, concepção e modelagem**. Barueri:Manole, 2008. 601p.
- [43] ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C. de; SILVA, S. L. da; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. **Gestão de desenvolvimento de produtos - uma referência para melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542p.
- [44] KULMAN, C. **Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes funcionais**. 2006. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2006.
- [45] WELLE LASER. **LS2000**. Disponível em: <<http://wellelaser.com/en/ls2000/>>. Acesso em: 8 jul. 2015.
- [46] ARDUINO LLC. **Arduino Nano**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>>. Acesso em: 31 out. 2015.
- [47] SHENZHEN MAKER WORKS TECHNOLOGY CO., L. **Makeblock 2H Microstep Driver** Disponível em: <<http://blog.makeblock.cc/wp-content/uploads/2012/11/Makeblock-2H-Microstep-Driver-User-Guide.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2015.
- [48] PHYSIK INSTRUMENTE (PI). **User Manual C-863 Mercury™ DC Motor Controller**: Release 1.3.0
- [49] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH. **PIMikroMove SM 148E Software Manual @Engineer**: Release 1.0.0
- [50] ARDUINO LLC. **Download the Arduino Software**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 10 maio. 2015.
- [51] ATMEL CORPORATION. **ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH DATASHEET** Disponível em: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf>. Acesso em: 10 maio. 2015.
- [52] THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3923-1 Metallic powders — Determination of apparent density — Part 1: Funnel method**. Switzerland, 2008. 5p.

ANEXO A RESULTADO DE GRANULOMETRIA

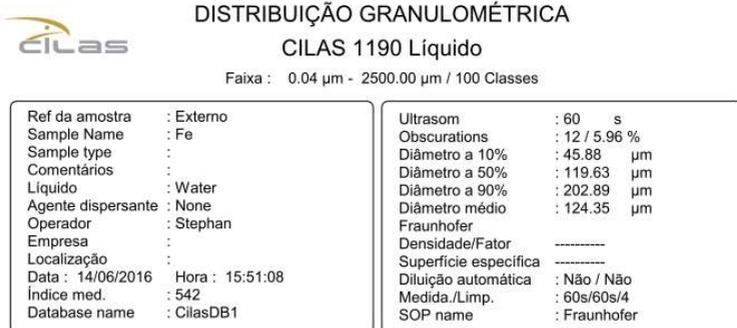


Figura A1- Resultado de granulometria dos pós de ferro não peneirado

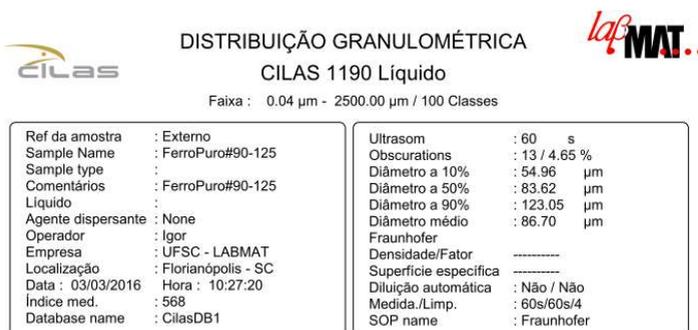


Figura A2- Resultado de granulometria dos pós de ferro de 90-125 µm

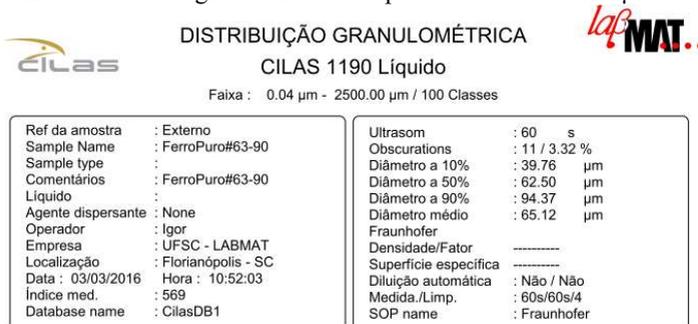


Figura A3- Resultado de granulometria dos pós de ferro de 63-90 µm



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: Externo	Ultrason	: 60 s
Sample Name	: FerroPuro#25-90	Obscurations	: 13 / 3.93 %
Sample type	:	Diâmetro a 10%	: 35.34 µm
Comentários	: FerroPuro#25-90	Diâmetro a 50%	: 58.07 µm
Líquido	: Water	Diâmetro a 90%	: 88.68 µm
Agente dispersante	: None	Diâmetro médio	: 60.22 µm
Operador	: Igor	Fraunhofer	:
Empresa	: UFSC - LABMAT	Densidade/Fator	: -----
Localização	: Florianópolis - SC	Superfície específica	: -----
Data : 03/03/2016	Hora : 11:54:22	Diluição automática	: Não / Não
Índice med.	: 570	Medida./Limp.	: 60s/60s/4
Database name	: CilasDB1	SOP name	:

Figura A4 - Resultado de granulometria dos pós de ferro de 25-90 µm



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: Externo	Ultrason	: 60 s
Sample Name	: FerroPuro#38-63	Obscurations	: 13 / 2.43 %
Sample type	:	Diâmetro a 10%	: 32.42 µm
Comentários	: FerroPuro#38-63	Diâmetro a 50%	: 48.60 µm
Líquido	: Water	Diâmetro a 90%	: 72.22 µm
Agente dispersante	: None	Diâmetro médio	: 50.72 µm
Operador	: Igor	Fraunhofer	:
Empresa	: UFSC - LABMAT	Densidade/Fator	: -----
Localização	: Florianópolis - SC	Superfície específica	: -----
Data : 03/03/2016	Hora : 12:15:39	Diluição automática	: Não / Não
Índice med.	: 571	Medida./Limp.	: 60s/60s/4
Database name	: CilasDB1	SOP name	:

Figura A5 - Resultado de granulometria dos pós de ferro de 38-63 µm

APÊNDICE A - QFD

Requisito do Cliente		Requisito do projeto																								
		Área útil de trabalho	Comunicação entre equipamentos	Controle de ambiente de trabalho	Desvio de distribuição	Entrada de gases	Estabilidade de movimentação	Facilidade de instalação	Fonte de alimentação	Intravassamento	Isolamento da área de trabalho	Numero de componentes	Numero de modulos	Peso de equipamento	Prezido na nivelamento da mesa	Proteção Laser	Repetição do deposição de pó	Tempo de distribuição	Tempo de manutenção	Tempo de montagem	Tempo de setup	Tipo de controlador	Tipo de material	Tipo de acionamento		
RC: Requisitos do Cliente	Básicos	Fabricamento	3	9	9	3	1	9	3	9	9	3	1	1	3	9	9	9	3	9	3	9	9	9	9	
		Segurança	3	9	9	3	1	9	9	9	3	1	1	9	9	1	9	1	3	1	3	3	3	3	3	
		Confiabilidade	9	3	9	9	3	3	9	3	9	1	3	3	9	9	9	1	9	1	9	3	3	9	1	3
	Ciclo de vida	Padrão	3	3	3	1	9	1	1	9	9	9	3	3	1	3	9	1	3	9	1	3	5	1		
		Fabricabilidade	9	3	3	3	9	9	9	9	9	1	3	3	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
		Mantabilidade	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	9	3	3	3	3	3	3	3	
	Específicos	Movibilidade	1	3	1	1	9	9	1	1	9	9	9	3	9	9	9	1	1	9	1	3	3	1		
		Transportabilidade					3	3	1	3	9	3	9	9	9	9	9	1	1	1	1	1	1	1		
		Modularidade	1	1	3	3	3	9	3	3	3	9	3	3	3	3	3	3	3	9	1	3	9	9		
		Controle de ambiente	9	9	9	9	1	1	9	1	9	1	1	9	1	3	1	1								
		Resolução	3	3	3	9	1	9	3	1	9	1	1	9	9	9	3	3	3	3	3	1	9	1		
		Distribuição de material	9	3	9	3	9	3	1	1	3	1	1	9	9	9	9						1	9	9	
		Tipo de alimentação	1	9	3	1	1	9	3	1	9	1	1	3	1	3	1						3	3	3	
		Híbrido ao pó	9	3	9	3	9	3	1	1	9	1	1	9	9	9	3	3						1		
		Item de vibrato	3	9	9	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	9						9	9	
Tipo de acionamento		1	3	1	1	9	3	1	1	9	1	1	9	1	3	9	3	9					3	3	9	
Grau de importância (req. produto)		62	40	66	74	35	65	77	49	40	51	48	40	25	43	27	66	30	40	43	19	44	48	66	1098	
Percentual		5.6	3.6	6.0	6.7	3.2	5.9	7.0	4.5	3.6	4.6	4.4	3.6	2.3	3.9	2.5	6.0	2.7	3.6	3.9	1.7	4.0	4.4	6.0	100	

Forte	9
Moderado	3
Fraco	1
Inexistente	

++	Posit. Forte
+	Posit. Fraco
	Inexistente
-	Neg. Fraco
--	Neg. Forte

○	não importa a variação do valor
↑	quanto maior o valor melhor
↓	quanto menor o valor melhor

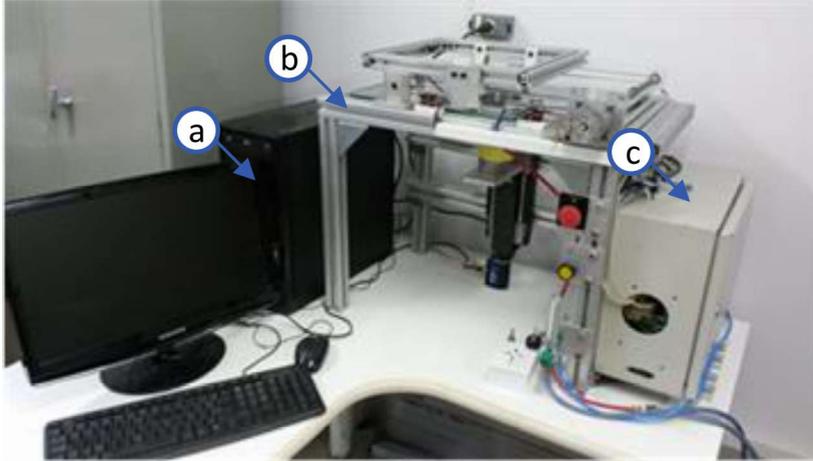
APÊNDICE B - AS IMAGENS DO EQUIPAMENTO

Figura B1- Vista geral do sistema protótipo: Computador (a); Sistema de deposição de pó (b); Gabinete de controle (c).

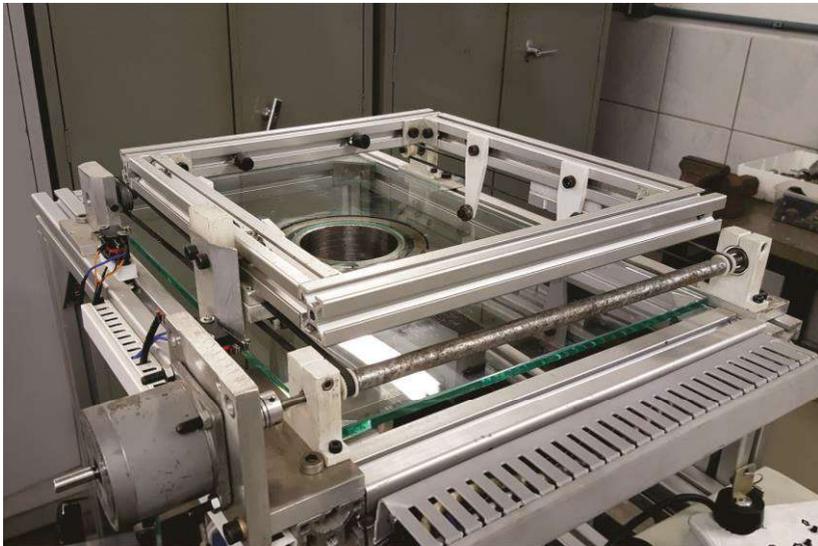


Figura B2- Dispositivo de movimentação do alimentador de pó

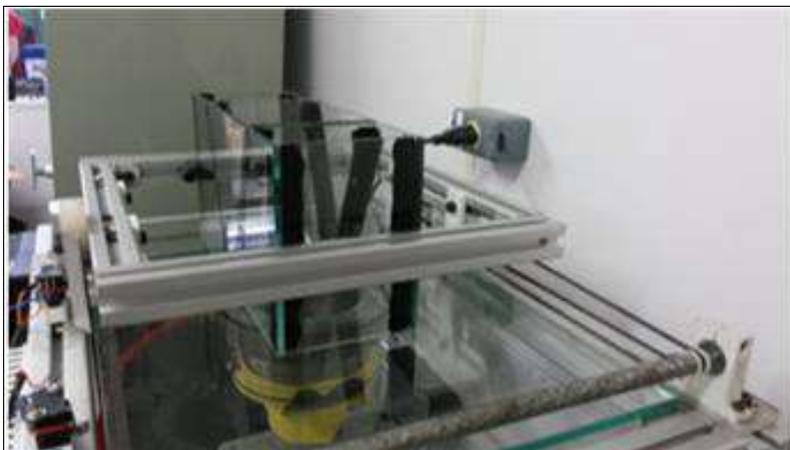


Figura B3- Montagem com distribuidor de pó



Figura B4- IHM

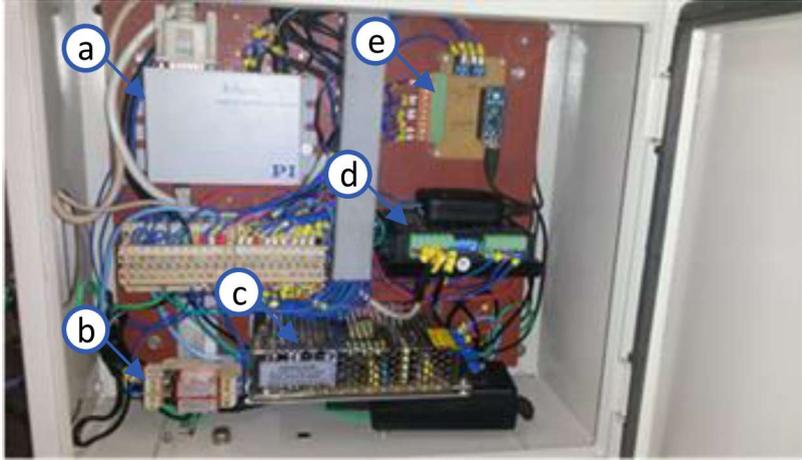


Figura B5- Vista geral do Gabinete: Driver C863 DC Motor Controller (a); Relé K1 e K2 (b); Fonte de alimentação (c); Driver 2H microstep (d); Placa de controle (e).

APÊNDICE C - CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO

```

int saidaParaMq = 12; // Saída para máquina Laser
int entradaDaMq = 11; // Entrada para máquina Laser
int sensorZero = 10; // Sensor de posição zero
int sensorZero2 = 9; // vazia
int Bot = 8; // Botão de Ajuste
int Dir = 7; // Direção do motor de passo
int Pul = 6; // Pulso do motor de passo
int camaraLig = 5; // LRD
int nivelDaMesa = 4; // Nivelamento da mesa
int avanc = 3; // Ajuste avança
int recua = 2; // Ajuste recuar

int Vel;

void setup() {
  pinMode(saidaParaMq, OUTPUT); // Configura Pino para entrada ou saída
  pinMode(sensorZero, INPUT);
  pinMode(sensorZero2, INPUT);
  pinMode(entradaDaMq, INPUT);
  pinMode(Bot, INPUT);
  pinMode(Dir, OUTPUT);
  pinMode(Pul, OUTPUT);
  pinMode(camaraLig, OUTPUT);
  pinMode(nivelDaMesa, OUTPUT);
  pinMode(avanc, INPUT);
  pinMode(recua, INPUT);
  Vel = 3;
  digitalWrite(camaraLig, 1);
  delay(1000); // Indica câmera está ligada
  while (digitalRead(sensorZero) == 0) {
    delay(1000); // O processo só vai continuar se nenhum dos sensores fim de curso está
    acionado
  }
}

void loop() {
  if (digitalRead(Bot) == 0) {
    configPosi();
  }
  else {
    movNormal();
  }
}

void configPosi() {
  if (digitalRead(avanc) == 1) {
    digitalWrite(Dir, HIGH);
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
      digitalWrite(Pul, HIGH);
      delay(1);
      digitalWrite(Pul, LOW);
      delay(1);
    }
  }
  if (digitalRead(recua) == 1) {
    digitalWrite(Dir, LOW);
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
      digitalWrite(Pul, HIGH);
      delay(1);
      digitalWrite(Pul, LOW);
      delay(1);
    }
  }
}

void movNormal() {
  while (digitalRead(entradaDaMq) == 0) {
  }
  digitalWrite(saidaParaMq, 0);
  delay(1000);
  digitalWrite(nivelDaMesa, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(nivelDaMesa, LOW);
}

```

```

if (digitalRead(sensorZero)==LOW){
  digitalWrite(Dir,LOW);
}
if(digitalRead(sensorZero2)==LOW){
  digitalWrite(Dir,HIGH);
}
if(digitalRead(Dir) == LOW){
  while(digitalRead(sensorZero2)==HIGH){
    for(int i = 0; i < 10; i++){
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
    }
    digitalWrite(Dir,HIGH);
  }
  while(digitalRead(sensorZero2)==LOW){
    for(int i = 0; i < 10; i++){
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
    }
  }
}
else {
  while(digitalRead(sensorZero)==HIGH){
    for(int i = 0; i < 10; i++){
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
    }
  }
  digitalWrite(Dir,LOW);
  while(digitalRead(sensorZero)==LOW){
    for(int i = 0; i < 10; i++){
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,HIGH);
      delayMicroseconds(Vel);
      digitalWrite(Pul,LOW);
      delayMicroseconds(Vel);
    }
  }
}
digitalWrite(saídaParaMaq,1);
delay(1000);
}

```

APÊNDICE D – O PROCESSO DE ANÁLISE DAS IMAGENS

A Figura D1 mostra as imagens capturadas pelo microscópio, as posições das imagens obtidas está de acordo com local apontado na área de trabalho.

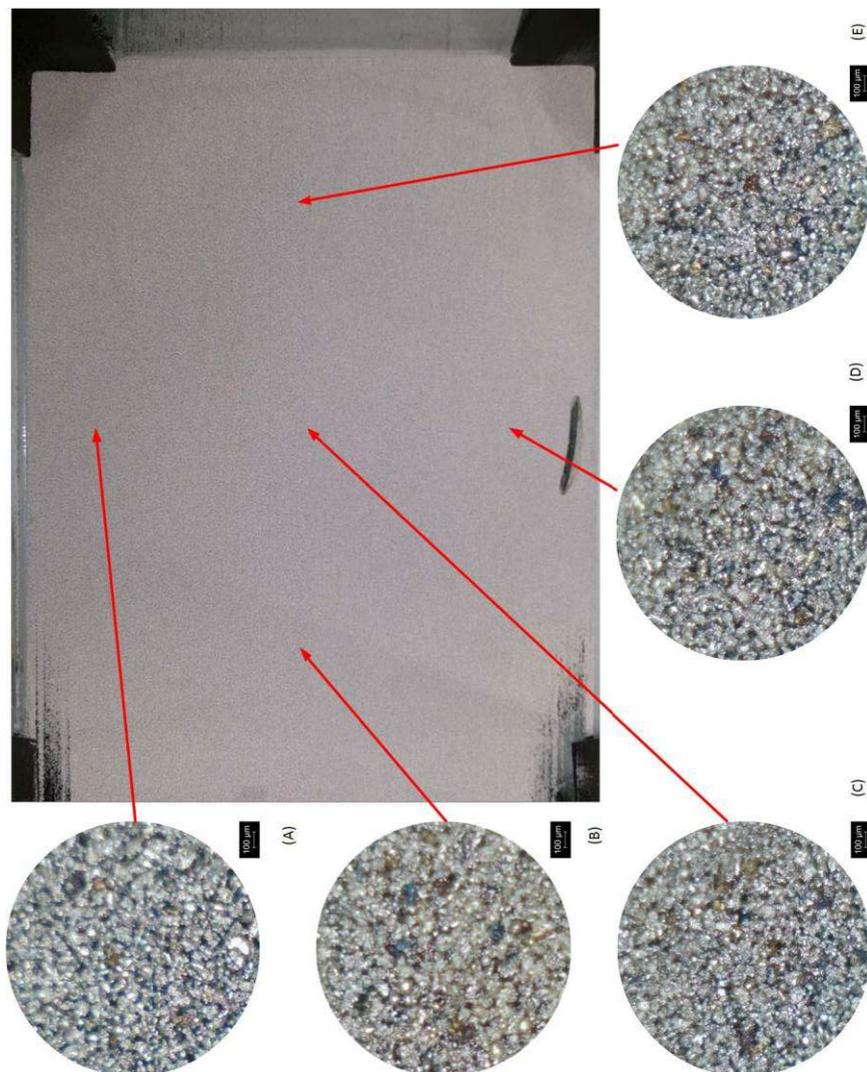


Figura D1- As imagens capturadas pelo microscópio

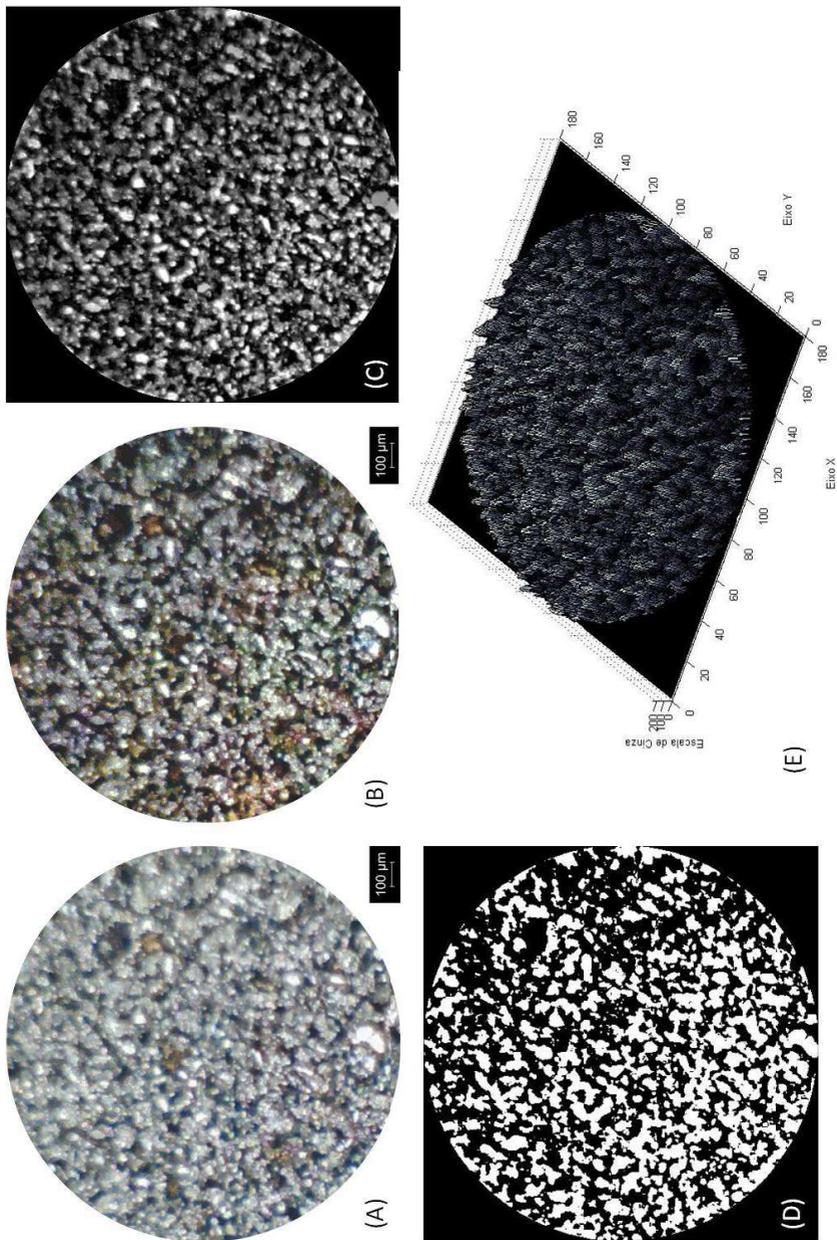


Figura D2- O análise de imagem A: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Grafico tridimensional

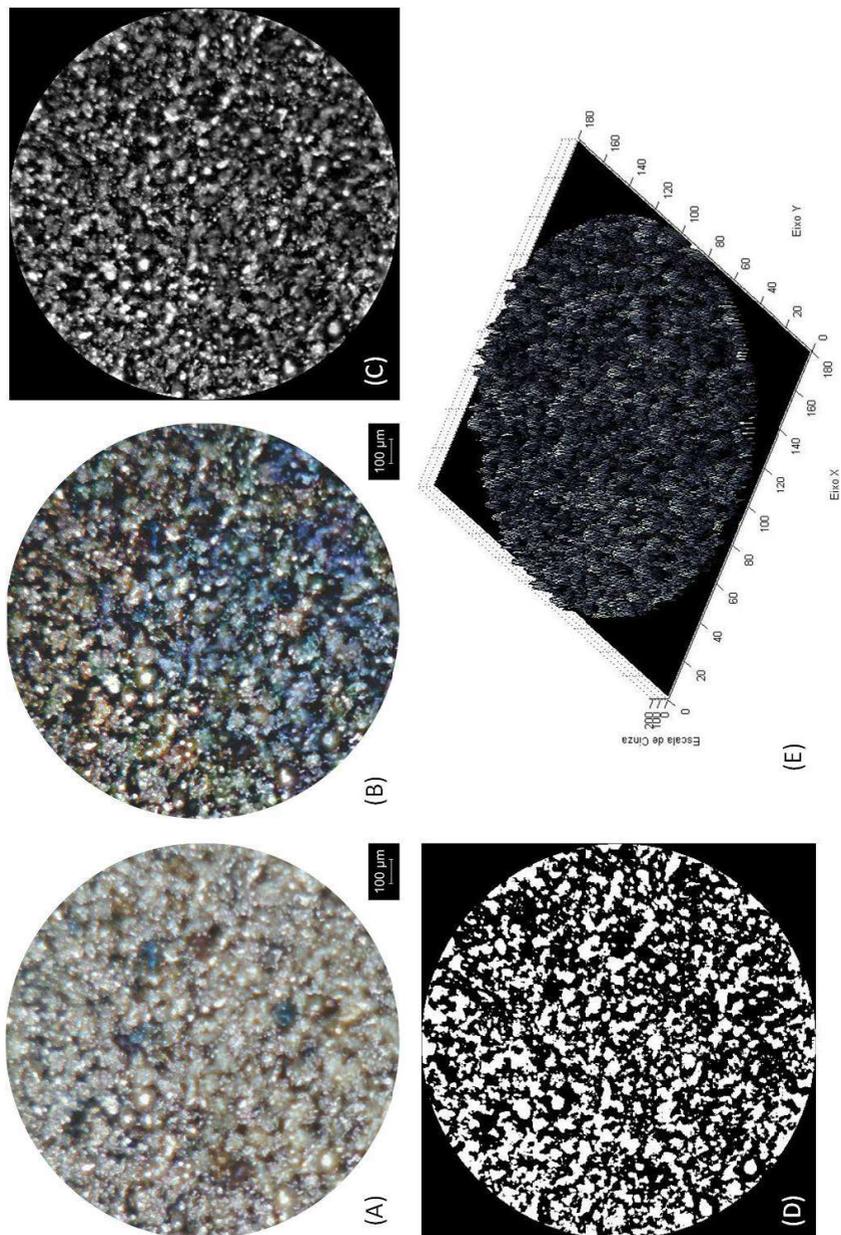


Figura D3- O análise de imagem B: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Gráfico tridimensional

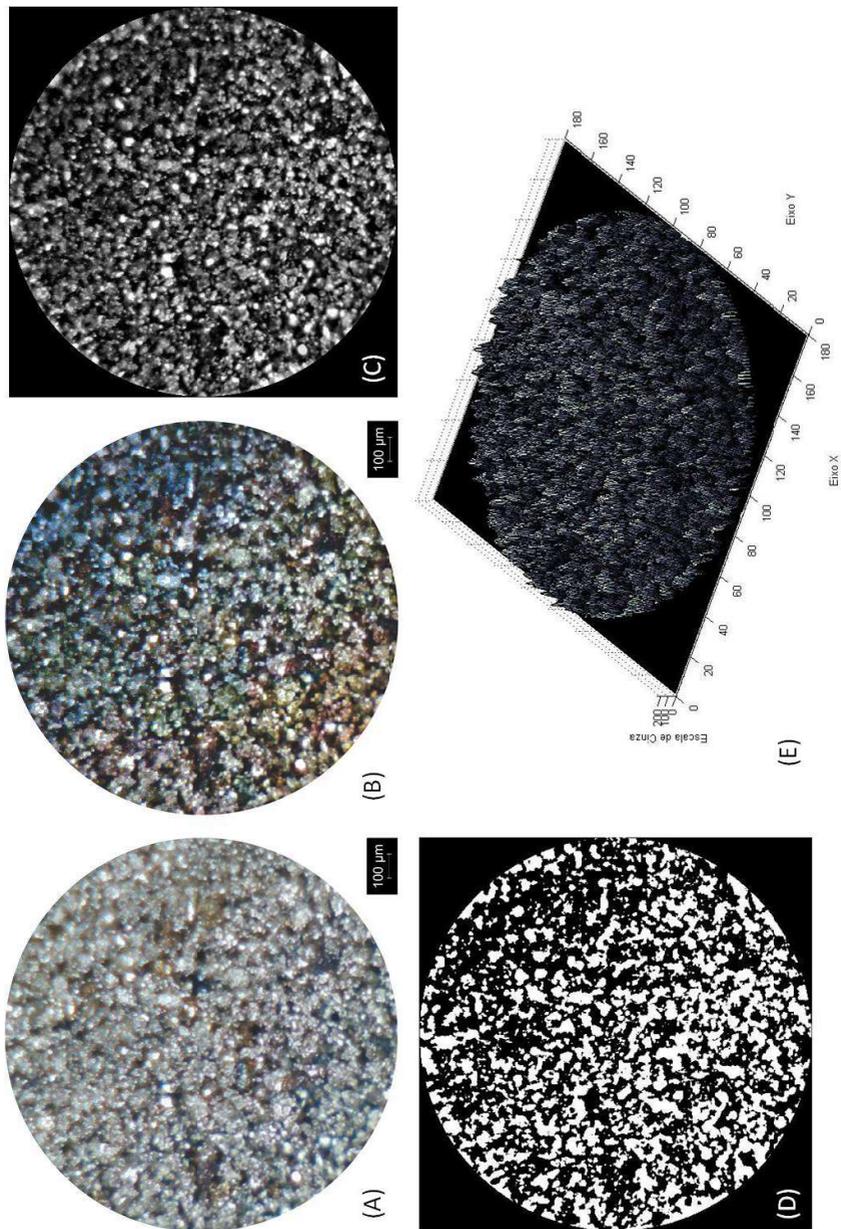


Figura D4- O análise de imagem C: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Gráfico tridimensional

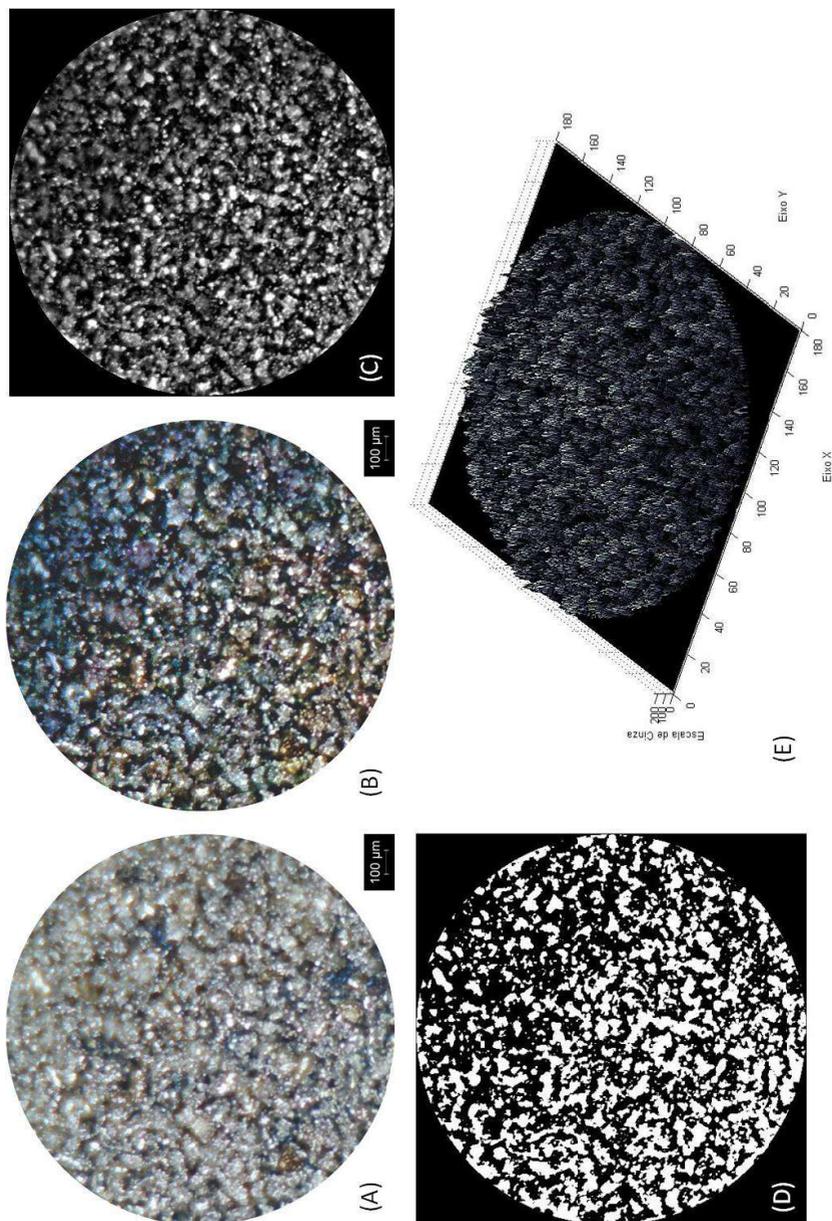


Figura D5- O análise de imagem D: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Gráfico tridimensional

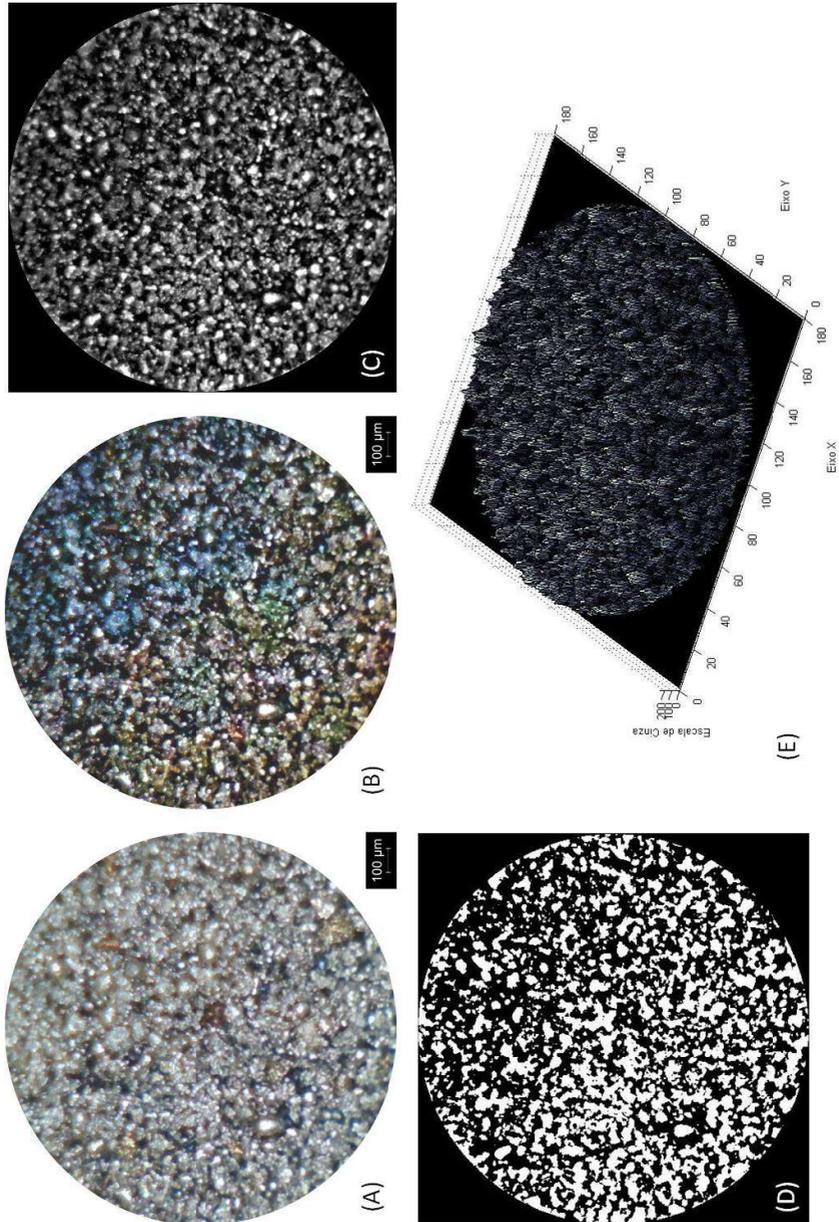


Figura D6- O análise de imagem E: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Gráfico tridimensional

APÊNDICE E– O PROCESSO DE ANÁLISE DAS IMAGENS NO LOCAL DE IMPERFEIÇÕES DA CAMADA

A Figura E1 mostra as imagens capturadas pelo microscópio no local de imperfeições da camada.

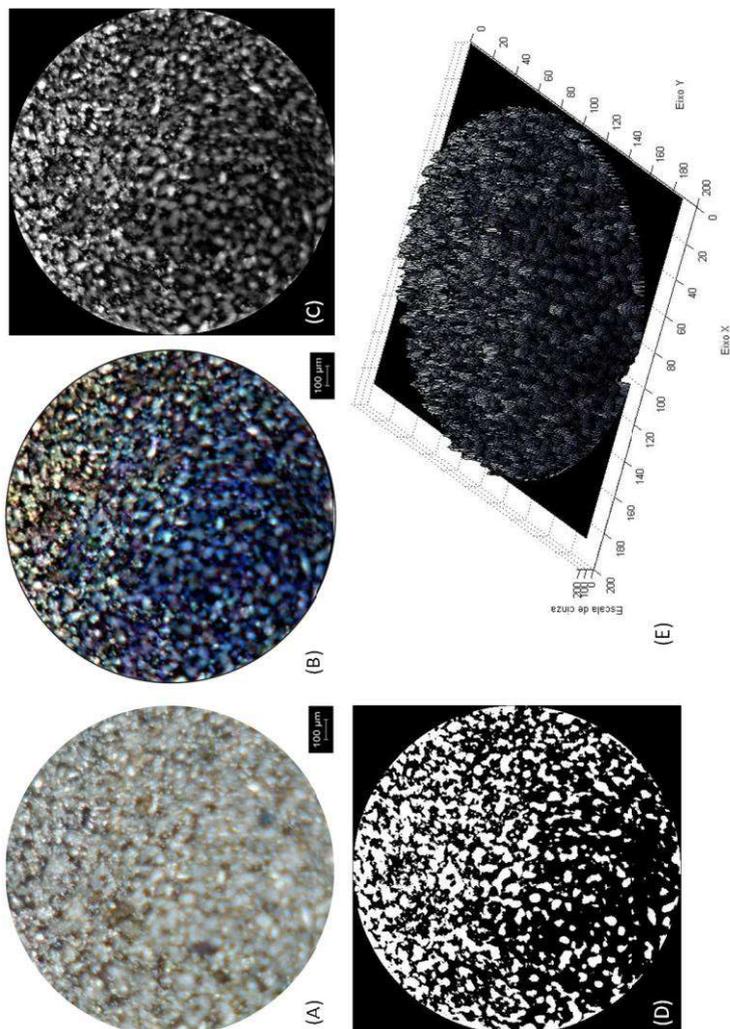


Figura E1- O análise de imagem Risk1: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Gráfico tri-dimensional

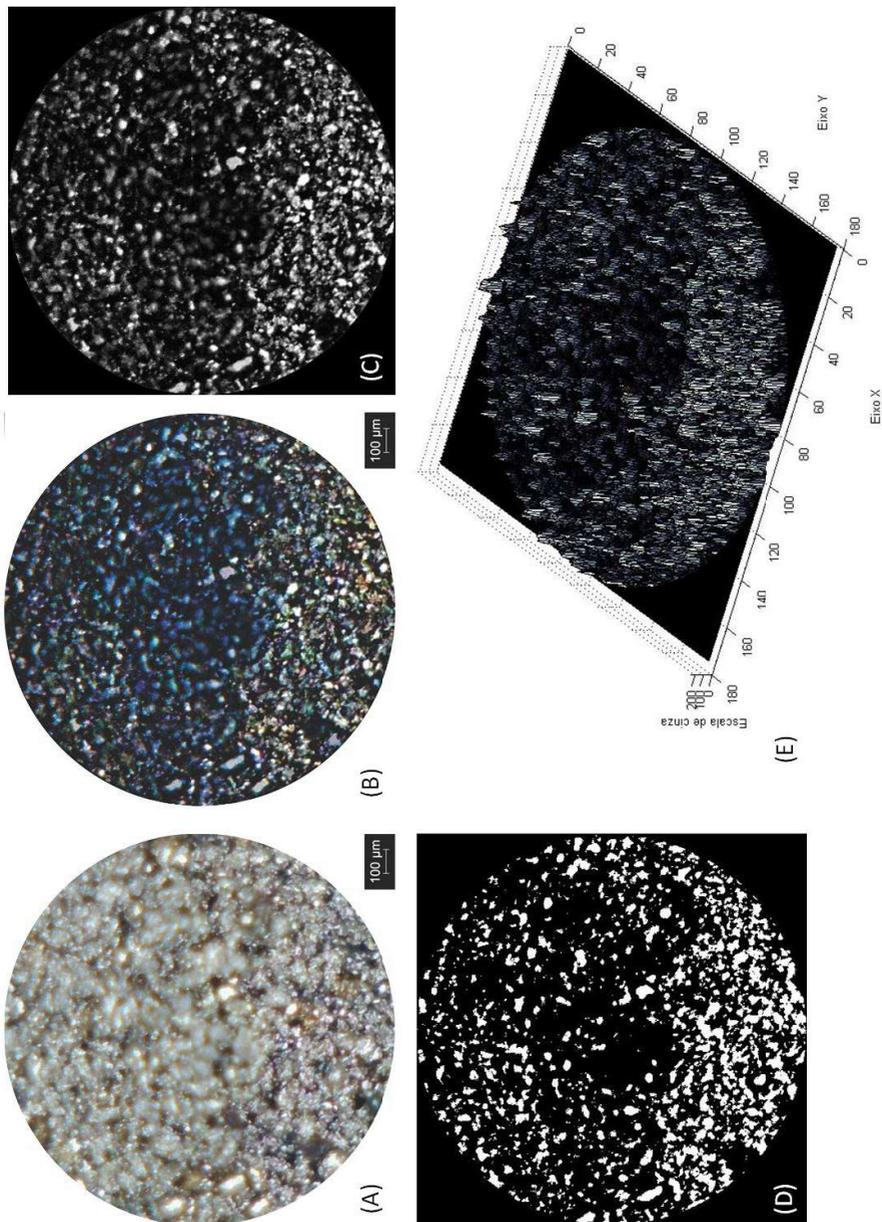


Figura E2- O análise de imagem Riscol1: (A) Imagem Original, (B) Imagem Filtrada, (C) Imagem na escala cinza, (D) Imagem preto e branco e (E) Gráfico tri-dimensional