



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Susana de Jesus Soares

**USINAGEM A LASER DE MODELOS 3D POR MEIO DA GRAVAÇÃO DE MÚLTIPLAS
CAMADAS EM MÁQUINAS GALVANOMÉTRICAS PÓS-OBJETIVAS**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2017



SUSANA DE JESUS SOARES

**USINAGEM A LASER DE MODELOS 3D POR MEIO DA GRAVAÇÃO DE MÚLTIPLAS
CAMADAS EM MÁQUINAS GALVANOMÉTRICAS PÓS-OBJETIVAS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva.

Porto Alegre

2017

SOARES, S. J. **Usinagem a laser de modelos 3D por meio da gravação de múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas.** 2017. 138f. Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Susana de Jesus Soares

**USINAGEM A LASER DE MODELOS 3D POR MEIO DA GRAVAÇÃO DE MÚLTIPLAS
CAMADAS EM MÁQUINAS GALVANOMÉTRICAS PÓS-OBJETIVAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 27 de março de 2017.

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG) – UFRGS

Prof.^a Dr.^a Lauren da Cunha Duarte

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) – UFRGS

Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG) – UFRGS

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) – UFRGS

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, paciência e determinação necessárias para superar os desafios desta etapa.

Aos meus pais, Paulo e Ruth e aos meus irmãos, Alexandre B. e Jefferson pelo carinho, conselhos e suporte ao longo de toda a minha jornada acadêmica.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Design (PGDESIGN) e ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) por todas as contribuições ao longo do mestrado.

Aos professores de todas as disciplinas cursadas no PGDESIGN, pelos conhecimentos compartilhados. Em especial, à prof.^a Dr.^a Lauren C. Duarte por todas as contribuições e por me apresentar o processo de gravação a laser.

Ao professor Dr. Fabio Pinto da Silva, pela sugestão do tema, pela orientação, pela leitura sempre cuidadosa, por todos os ensinamentos e auxílios que contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos professores presentes nas bancas de qualificação e defesa, Rodrigo Marques Braga, Luis H. Cândido, Heraldo J. de Amorim e Lauren C. Duarte pelos apontamentos e sugestões pertinentes para o avanço e finalização deste estudo.

A todos os colegas do LdSM/UFRGS, pelo convívio, pelas experiências compartilhadas e auxílio prestado, em especial a João Rogério Pereira, pelo apoio no uso de ferramentas e máquinas; Marcelo Moura, pela programação operacional do dispositivo; Thiago Rodrigues, pela ajuda no desenvolvimento do dispositivo, Ivan Penz, pela medição das peças digitalizadas em 3D, Gabriel Barbieri e professor Dr. Everton Silva, pelas fotografias de algumas amostras e equipamentos.

Ao professor Dr. Ricardo Bordalo Correia, pelo auxílio na medição da potência do laser da máquina utilizada.

Aos órgãos de fomento CAPES, pelo auxílio mediante a bolsa concedida e CNPq, pelo apoio na estrutura laboratorial.

Muito obrigada! :)

RESUMO

SOARES, S. J. **Usinagem a laser de modelos 3D por meio da gravação de múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas.** 2017. 138f. Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um método para a usinagem a laser de modelos 3D em máquinas galvanométricas pós-objetivas, por meio da gravação de múltiplas camadas bidimensionais. Foi realizado um estudo para estabelecer os parâmetros de processo por meio de ensaios e ajustes no equipamento utilizado. Com o desenvolvimento de um dispositivo para controle do deslocamento vertical da mesa de trabalho, foi possível determinar com exatidão o ponto focal, bem como o passo da máquina (altura da camada). O substrato utilizado no estudo foi o PMMA Poli(metacrilato de metila) com um laser de CO₂ de 43 W. Foram ensaiados os parâmetros de largura e profundidade dos rasgos formados pelo laser, bem como o ângulo de incidência. Foi possível determinar a profundidade da camada usinada em função dos parâmetros avaliados, bem como produzir modelos 3D com camadas de até 0,2 mm (com velocidade de 100 m/min e espaçamento entre linhas de 0,04 mm). Análises dimensionais foram realizadas por digitalização tridimensional, as quais mostraram erros médios na ordem de 0,1 mm nas peças produzidas. O resultado evidencia o potencial desta pesquisa ao propiciar a criação de uma nova funcionalidade para máquinas de gravação a laser, por exemplo, para *fab labs* e laboratórios de criação e design, para confecção de pequenos protótipos.

Palavras-chave: usinagem 3D; gravação a laser; máquina galvanométrica.

ABSTRACT

SOARES, S. J. **Laser machining of 3D models through the engraving of multiple two-dimensional layers in post-objective galvanometric equipments.** 2017. 138f. Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

This work consists of a method development for laser machining of 3D models in post-objective galvanometric equipments through the engraving of multiple two-dimensional layers. A study was carried out to establish process parameters by means of tests and adjustments in the equipment used. With the development of a device to control vertical displacement of the work table it was possible to determine accurately the focal point and the step of the machine table (layer height). The material used in the study was PMMA, Poly(methyl methacrylate), with a 43 W CO₂ laser. The parameters tested were width and depth of the slots formed by the laser as well as angle of incidence. It was possible to determine machined layer depth as a function of the evaluated parameters and to produce 3D models with layers up to 0.2 mm (with 100 m/min speed and 0.04 mm spacing between rows). Dimensional analyzes performed by 3D scanning showed average errors in the order of 0.1 mm. The result evidences the potential of this research by providing a new functionality for laser engraving machines, e.g. for making small prototypes in fab labs and design laboratories.

Keywords: 3D machining; laser engraving; galvanometric machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo da produção do feixe de laser.....	23
Figura 2 - Exemplos de aplicações da gravação a laser em materiais gemológicos.	25
Figura 3 - Princípio de focagem e os parâmetros envolvidos.	28
Figura 4 - Métodos de processamento a laser.	29
Figura 5 - Comparação da varreduras do laser por marcação defletida.	30
Figura 6 - Princípios de acionamentos de máquinas de corte e gravação laser.	32
Figura 7 - Movimentação do feixe em máquinas a laser.	32
Figura 8 - Trajetórias de varredura do laser no sistema focal galvanométrico.	33
Figura 9 - Gravação 3D a laser em escala de cinza.	36
Figura 10 - Gravação 3D a laser por máscara de marcação tonal.	36
Figura 11 - Variações dimensionais do campo focal em sistemas galvanométricos.	37
Figura 12 - Obtenção de modelo 3D por método de sobreposição de camadas.	38
Figura 13 - Relevo de estrela 3D em material cerâmico por usinagem 3D a laser.	40
Figura 14 - Imagens microscópicas de peça microusinada a laser.	41
Figura 15 - Ilustração do processamento a laser em substrado de PMMA.	43
Figura 16 - Perfil gaussiano de canal formado por laser CO ₂ em peça de PMMA.	44
Figura 17 - Resultados da largura do traçado do laser CO ₂ em peça de PMMA.	45
Figura 18 - Profundidade obtida pelo traçado do laser CO ₂ em peça de PMMA.	46
Figura 19 - Esquemas ilustrativos da difusão térmica de gravação a laser.	47
Figura 20 - Equipamento utilizado no desenvolvimento da metodologia.	50
Figura 21 - Nivelamento da plataforma móvel da máquina.	53
Figura 22 - Ajuste do posicionamento vertical da mesa de trabalho.	55
Figura 23 - Estudo da angulação da varredura do feixe de laser.	56
Figura 24 - Imagem ilustrativa do corte a laser e as medidas verificadas no ensaio.	58
Figura 25 - Imagem ilustrativa da angulação gerada na amostra pelo corte a laser.	58
Figura 26 - Trajetória do laser realizada no preenchimento vetorial.	60
Figura 27 - Ensaio para verificar a largura e profundidade do traçado de laser.	61

Figura 28 - Ensaio para obtenção da profundidade de usinagem a laser.	62
Figura 29 - Elementos dos ensaios preliminares.	64
Figura 30 - Camadas elaboradas para o ensaio preliminar.	64
Figura 31 - Resultado de digitalização 3D da face e fatiamento.	67
Figura 32 - Incidência do laser em peça com inclinação corrigida.	67
Figura 33 - Dispositivo de controle do deslocamento vertical da mesa de trabalho. ..	70
Figura 34 - Exemplos de operações visualizadas no <i>display</i> do dispositivo.	72
Figura 35 - Ângulo de incidência em função da largura da peça.	73
Figura 36 - Esquema ilustrativo para cálculo da altura máxima ($h_{máx}$).	74
Figura 37 - Gráfico da espessura de material removido em função da altura da mesa.	75
Figura 38 - Amostras analisadas para determinação do foco.	76
Figura 39 - Gráficos de medidas para determinação do melhor ajuste de foco.	77
Figura 40 - Vista lateral das amostras analisadas no ensaio.	79
Figura 41 - Gráfico da largura do traçado do laser em função da velocidade de gravação.	79
Figura 42 - Gráfico da profundidade do traçado do laser em função da velocidade de gravação.	80
Figura 43 - Superfícies das amostras usinadas com diferentes preenchimentos.	81
Figura 44 - Superfície de amostra usinada com velocidade de 10 m/min.	82
Figura 45 - Aspecto superficial das amostras usinadas com velocidade de 40 m/min.	83
Figura 46 - Gráfico das profundidades resultantes em função do espaçamento entre linhas.....	84
Figura 47 - Gráfico da velocidade aplicada em função da profundidade gerada para cada espaçamento entre linhas.	85
Figura 48 - Usinagem 3D a laser com amostra centralizada.	87
Figura 49 - Ensaio com preenchimento concêntrico.	88

Figura 50 - Esquema ilustrativo da disposição das peças em cada canto na área de trabalho.....	88
Figura 51 - Pirâmides usinadas em cada canto da área de trabalho.....	89
Figura 52 - Modelo virtual da pirâmide analisada.....	90
Figura 53 - Gráfico da velocidade em função da profundidade (preenchimento de 0,04 mm).....	91
Figura 54 - Gráfico de ajuste de altura das camadas para profundidade de 0,5mm.	92
Figura 55 - Pirâmide obtida para ensaio de validação.	92
Figura 56 - Gráfico da altura da camada em função do número da camada para profundidade de 0,2 mm.....	93
Figura 57 - Processamento a laser do rosto em substrato de 20 mm de espessura.	94
Figura 58 - Resultado do ensaio de validação do processo.	94
Figura 59 - Deformidades dos rostos usinados a laser.	95
Figura 60 - Resultados da usinagem em diferentes orientações e posicionamentos.	97
Figura 61 - Análise dimensional dos rostos usinados a laser.	98
Figura 62 - Rostos fabricado por impressão 3D.	99
Figura 63 - Resultado da análise dimensional das peças impressas em 3D.....	100
Figura 64 - Parâmetros determinados para a usinagem a laser por múltiplas camadas.	102
Figura 65 - Fluxograma do método desenvolvido.	104

SOBRE AS FIGURAS

A fonte de referência está indicada abaixo das mesmas. Na ausência dessa informação, deve-se considerar que a autoria das imagens é da pesquisadora.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Efeitos da gravação a laser sobre o material processado.	30
Quadro 2 - Propriedades de preenchimento que podem ser editadas.....	60
Quadro 3 - Funcionalidades dos botões do dispositivo desenvolvido.....	72
Quadro 4 - Relação entre os parâmetros para a usinagem a laser.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Profundidades (mm) obtidas no ensaio.....	85
Tabela 2 - Média e desvio-padrão (σ) dos erros dimensionais dos modelos 3D.....	100
Tabela 3 - Tempo de processamento das peças em cada processo analisado.....	101
Tabela 4 - Parâmetros determinados para usinagem a laser de PMMA.....	103

SOBRE OS QUADROS E TABELAS

A fonte de referência está indicada abaixo das mesmas. Na ausência dessa informação, deve-se considerar que a autoria das imagens é da pesquisadora.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D	Bidimensional
2.5D	Duas dimensões e meia
3D	Tridimensional
bmp	Arquivo Bitmap do Windows
A	Ampère
ai	Arquivo Adobe Illustrator
apud	Expressão latina que significa citado por
°C	Grau Celsius
CAD	Projeto Auxiliado por Computador (do inglês <i>Computer Aided Design</i>)
CAM	Fabricação Auxiliada por Computador (do inglês <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
cm	Centímetros
CNC	Controle Numérico Computadorizado (do inglês <i>Computer Numeric Control</i>)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO₂	Dióxido de carbono
d	Diâmetro do foco
dxf	Arquivos de Formulário de troca de desenho (do inglês <i>Drawing Exchange Format</i>)
e	Espaçamento entre linhas (mm)
et al.	E outros (as) (aglutinação e abreviação do latim <i>et alli, et aliae e et alia</i>)
f	Distância focal
F	Foco ou ponto focal

fab lab	Laboratório de fabricação
FDM	Fabricação por deposição de material fundido (do inglês <i>Fused Deposition Modeling</i>)
FFF	Fabricação por filamento fundido (do inglês <i>Fused Filament Fabrication</i>)
Fθ	F-Theta
gif	Arquivo de formato para intercâmbio de gráficos (do inglês <i>Graphics Interchange Format</i>)
h	Altura
h_{máx}	Altura máxima
ICSP	Programação serial em circuito (do inglês <i>In-Circuit Serial Programming</i>)
jpeg	Arquivos de fotos do jpeg (do inglês <i>Joint Photographic Experts Group</i>)
He	Hélio
L	Largura da peça
Laser	Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação (do inglês <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LED	Diodo Emissor de Luz (do inglês <i>Light Emitting Diode</i>)
MHz	Mega-Hertz
min	Minuto
μm	Micrometro
mm	Milímetro
mm/min	Milímetros por minuto
mm/s	Milímetros por segundo
mm²	Milímetros quadrados
MPD	Deposição de Polímero Fundido (do inglês <i>Molten Polymer Deposition</i>)
N₂	Nitrogênio

Nd: YAG	Granada de Ítrio e Alumínio dopada com Neodímio (do inglês <i>Neodymium-doped yttrium aluminium garnet</i>)
P	Potência
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PGDESIGN	Programa de Pós-Graduação em Design
pixel	Elemento de imagem (aglutinação e abreviação do inglês, <i>picture</i> e <i>element</i>)
PLA	Poli(ácido láctico)
plt	Arquivos de Plotagem em HPGL
PMMA	Poli(metacrilato de metila)
PS	Poliestireno
®	Marca registrada comercial
R²	Coefficiente de determinação de ajustamento
R\$	Real (moeda corrente oficial do Brasil)
s	Segundos
tan	Tangente
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	Porta Universal (do inglês <i>Universal Serial Bus</i>)
v	Velocidade de varredura do laser (m/min)
W	Watt
α	Ângulo de incidência do laser em relação ao eixo vertical (z)
β	Ângulo máximo da peça a ser usinada ($\beta < \alpha$)
γ	Ângulo de incidência do laser em relação ao plano xy ($\alpha + \gamma = 90$)
θ	Angulação do espaçamento entre linhas
σ	Desvio-padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	19
1.2	Estrutura do trabalho	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Laser	21
2.2	Gravação a laser	24
2.3	Máquinas de gravação a laser	31
2.3.1	Máquinas a laser galvanométricas	33
2.4	Gravação 3D a laser	34
2.5	Gravação a laser com fonte de CO ₂ em PMMA	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	Equipamento de gravação a laser	49
3.2	Material e corpos de prova	51
3.3	Nivelamento da plataforma móvel	53
3.4	Dispositivo de controle para deslocamento vertical da plataforma móvel	54
3.5	Determinação dos ângulos de varredura do feixe de laser	56
3.6	Determinação do ponto focal de acordo com espessura do substrato	57
3.7	Determinação de parâmetros para usinagem 3D laser	59
3.7.1	Ensaio de verificação da largura e profundidade	61
3.7.2	Ensaio de determinação da profundidade e qualidade superficial	61
3.8	Ensaio de validação inicial	63
3.9	Modelo 3D final para validação do processo	66
3.10	Análise Dimensional	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Dispositivo de controle para deslocamento vertical da mesa de trabalho	70

4.2	Determinação dos ângulos de varredura do feixe de laser	73
4.3	Determinação do ponto focal	75
4.4	Determinação de parâmetros para usinagem 3D laser	78
4.4.1	Ensaio de verificação da largura e profundidade do traçado.....	78
4.4.2	Ensaio de determinação da profundidade e da qualidade superficial	80
4.5	Ensaio de validação inicial.....	86
4.6	Obtenção de modelos 3D para validação do processo	93
4.7	Análise Dimensional	97
4.8	Síntese dos parâmetros e do processo de usinagem a laser	102
5	CONCLUSÕES.....	105
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
	APÊNDICE A.....	116

1 INTRODUÇÃO

O laser é uma ferramenta versátil que garante grande produtividade na criação de artefatos de forma rápida, precisa e com qualidade. No setor industrial atual, a gravação e o corte a laser são processos digitais bastante populares, em que é possível desenvolver peças tanto bidimensionais (2D), quanto tridimensionais (3D), de acordo com a tecnologia laser disponível no equipamento.

A usinagem 3D a laser é um processo recente que faz parte de uma vertente industrial que propõe a fabricação tridimensional em vista de maior rapidez produtiva, redução de custos e peças de uma única fonte. A aquisição de novas máquinas com tecnologia aprimorada torna-se necessária às indústrias para manterem-se competitivas, mas isto pode ter um alto custo de investimento.

As máquinas de corte e gravação a laser para processamento 2D são comercialmente mais populares que o maquinário 3D a laser, devido principalmente à facilidade de acionamento e ao baixo custo de aquisição e manutenção. Uma máquina de gravação a laser galvanométrica pós-objetiva, em que se podem desenvolver projetos bidimensionais e tridimensionais (por encaixe) custa em média entre R\$ 40.000 a R\$ 100.000 (AUTOMATISA, 2016). Já uma máquina de usinagem 3D a laser, indicada também para trabalhos 2D, pode custar entre R\$ 200.000 a R\$ 1.000,000 (KERN, 2016; MYCLASER, 2016)¹.

Desse modo, tornou-se interessante utilizar mecanismos convencionais e de baixo custo para aprimorar as características funcionais de máquinas a laser (2D) disponíveis no mercado visando a usinagem tridimensional. Neste contexto, esta pesquisa se justifica, uma vez que buscou o aprimoramento de uma máquina de corte e gravação a laser (2D) do tipo galvanométrica pós-objetiva visando o desenvolvimento de um método para processamento 3D. Resumidamente, trata-se

¹ Orçamentos realizados pela presente autora em maio de 2016.

de um equipamento, no qual o laser emitido é direcionado em dois eixos (x e y) pela rotação de espelhos e focalizado somente após esse direcionamento. O ajuste focal é determinado pelo deslocamento vertical da mesa de trabalho, aproximando-a ou afastando-a da lente focalizadora. Justamente, com o auxílio do deslocamento no eixo z da mesa percebeu-se a possibilidade de efetuar a usinagem de modelos 3D. Com base na fabricação por prototipagem rápida subtrativa, buscou-se pelo acionamento da mesa (eixo z) determinar um desbaste controlado da peça, camada por camada, promovendo a criação de um artefato tridimensional.

A escolha pelo modelo galvanométrico se deve a alta velocidade de processamento, sendo esta sua principal vantagem em comparação aos equipamentos do tipo óptica móvel e mesa x-y. O posicionamento do laser é realizado pela angulação de dois espelhos galvos de massa reduzida não havendo necessidade de movimentação do canhão do laser, da lente focal e/ou uso de esteiras (BOSMAN, 2007; CIDADE et al., 2016).

A máquina utilizada nesta pesquisa (Mira 3007 da Automatisa Sistemas[®]) encontra-se disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS), desde 2010, ano de sua aquisição. Este equipamento proporcionou o desenvolvimento de diversos trabalhos científicos, tais como, a padronização do processo de gravação a laser em materiais naturais, como, por exemplo, o couro (SANTOS, 2012), a ágata (CIDADE, 2012), a madeira (RASEIRA, 2013), o serpentinito (PILCHER, 2015) e a madrepérola (SOARES, et al., 2016), mas todos destinados a criação bidimensional. Neste sentido, a questão que norteou esta pesquisa refere-se às etapas necessárias para desenvolver o processamento 3D em máquinas a laser galvanométricas pós-objetivas. O estudo trabalhou com a hipótese de que ao estabelecer parâmetros adequados como, por exemplo, velocidade de processamento, ajuste focal (altura da mesa), preenchimento vetorial das camadas, entre outros, tornaria o processo possível.

Um estudo aprofundado foi realizado e desenvolveu-se um método com etapas que identificaram os parâmetros adequados à usinagem a laser. A aplicação do método pode ser definida como um processo de fabricação por meio da remoção de material em forma de camadas planas. Essas camadas foram processadas sequencialmente gerando uma peça física por meio do seu empilhamento do topo à base do modelo.

Em síntese, o laser emitido descreve sobre a superfície do material uma trajetória de varredura equivalente à camada do desenho selecionada pelo operador via *software* gráfico. A interação do laser resulta na remoção de material no formato da fatia e na profundidade desejada. A operação repete-se até que toda a varredura (em camadas) do desenho seja executada e, desta forma, a sobreposição das camadas resulta em uma peça 3D. Este processo permitiu criar pequenos objetos e é potencialmente interessante a *fab labs*² e laboratórios de design e criação.

1.1 Objetivos

Desenvolver um método para a gravação 3D laser, por meio de múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas.

Para tanto, objetivos específicos foram traçados:

- I. Estudar os mecanismos de geração do laser e os sistemas de gravação 2D e 3D em máquinas de corte e gravação a laser;
- II. Definir o material e os parâmetros para a gravação a laser de uma camada, tais como: altura focal, velocidade de varredura e profundidade de usinagem;

² *Fab lab* é a abreviatura de *Fabrication Laboratory* (Laboratório de Fabricação). Consiste em conjunto de máquinas de prototipagem rápida de baixo custo (máquina de corte a laser, de corte de vinil e impressoras 3D) e bancada de eletrônica (computadores e ferramentas de programação informática). (EYCHENNE & NEVES, 2013).

- III.** Identificar os melhores parâmetros para o preenchimento vetorial no *software* Laser Draw[®] nas imagens a serem gravadas;
- IV.** Desenvolver um sistema para o deslocamento vertical da mesa da máquina e definir parâmetros para controle da espessura das camadas;
- V.** Ensaiar a espessura das camadas usinadas por meio do sistema de calibração definido, bem como, os ângulos de incidência do laser no material;
- VI.** Avaliar os resultados obtidos e propor um método para sobrepor as camadas gravadas;
- VI.** Validar o método proposto por meio de um estudo de caso.

1.2 Estrutura do trabalho

O desenvolvimento do trabalho está dividido em capítulos para melhor organização e compreensão de suas etapas:

- ▶ **Introdução:** Apresentação do contexto no qual esta pesquisa se insere, bem como a problematização, a justificativa, os objetivos e a estrutura da dissertação.
- ▶ **Revisão Bibliográfica:** Apresenta-se uma síntese teórica sobre o material encontrado acerca dos temas selecionados como essenciais para o embasamento do estudo.
- ▶ **Materiais e Métodos:** Delineia-se a metodologia que será desenvolvida para realização da pesquisa, enfatizando as etapas para aquisição de parâmetros e as análises estabelecidas.
- ▶ **Resultados e Discussão:** Detalha-se os resultados dos ensaios e processos propostos na etapa anterior.
- ▶ **Conclusão:** Mostram-se e as conclusões obtidas a partir dos resultados, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo envolve temáticas complementares e visa o aprofundamento do estudo em temas relevantes ao entendimento do contexto da dissertação, estando segmentado nos seguintes itens: 2.1 Laser; 2.2 Gravação a laser; 2.3 Máquinas de gravação a laser, 2.3.1 Máquinas a laser galvanométricas, 2.4 Gravação 3D a laser e 2.5 Gravação a laser com fonte de CO₂ em PMMA.

2.1 Laser

Laser é um acrônimo do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, isto é, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação. O nome laser é atribuído ao físico G. Gould, que em 1957 fez o primeiro registro da sigla em cartório e descreveu os elementos essenciais para a construção de um dispositivo a laser, mas não conseguiu desenvolvê-lo antes que T. Maiman (BERRETTA, 1995; SANTOS, 2007).

O laser é resultante da geração de radiação eletromagnética oriunda de uma emissão estimulada. De acordo com os princípios da mecânica quântica, os átomos encontram-se no estado fundamental, isto é, no estado de menor energia e por isso o mais estável. Quando o átomo recebe energia, seus elétrons passam para o estado excitado. Os elétrons tendem a liberar essa energia na forma de um fóton (partícula de luz) para regressar novamente ao seu estado fundamental. A emissão estimulada baseia-se neste fato, pois o regresso ao estado fundamental é naturalmente lento, desse modo, uma fonte externa de energia é utilizada para auxiliar a estimulação dos elétrons visando agilizar o processo de radiação (CATORZE, 2009; BAGNATO, 2008).

De acordo com Bagnato (2008) e Santos (2007), a produção do feixe de laser ocorre por meio de três elementos essenciais, que encontram-se dispostos em uma câmara óptica. São estes:

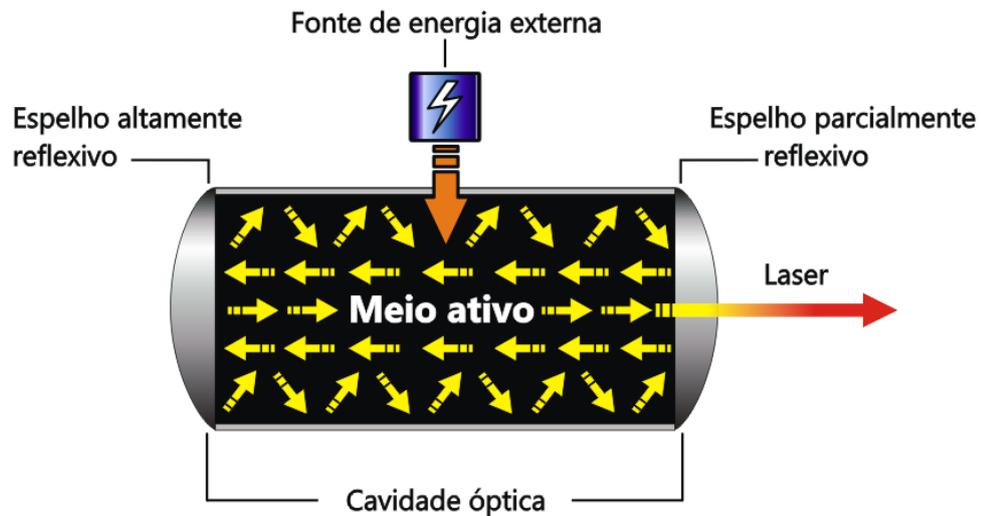
- ▶ **Meio ativo:** é o conjunto de os átomos, moléculas ou íons que devem ter seus elétrons excitados (energizados) para que ocorra a emissão estimulada. Ele pode estar no estado sólido como por exemplo, as fibras ópticas, o rubi e cristal Nd:YAG ou no estado gasoso, como o dióxido de carbono (CO₂), ou no estado líquido, na qual utilizam-se corantes orgânicos. De modo geral, um bom meio ativo caracteriza-se por ser um material em que seus elétrons conseguem permanecer um tempo relativamente longo no estado excitado (normalmente um elétron permanece 10⁻¹⁰s no estado excitado);

- ▶ **Fonte de energia ou bombeamento:** é uma fonte externa de radiação que fornece energia adequada para ser absorvida pelo meio ativo. Ela conduz os elétrons para níveis mais energéticos e conseqüentemente, a seus estados excitados. Essa energia pode ser adquirida de uma fonte elétrica, térmica, química ou por outro laser menos potente. Quando a maioria dos átomos apresentam elétrons no estado excitado ocorre a inversão de população, um estágio fundamental para a produção do laser;

- ▶ **Cavidade óptica ou ressonador:** é constituída por dois espelhos refletores montados frente a frente a uma dada distância, entre os quais se situa o meio ativo. Esses espelhos refletem os fótons emitidos pelos elétrons excitados gerando múltiplas passagens de ida e volta no meio ativo amplificando, assim, o campo eletromagnético na cavidade. Um espelho é semitransparente e outro é totalmente transparente.

A produção do feixe (Figura 1) ocorre quando a fonte externa de energia excita o meio ativo e faz com que os elétrons deste saltem de uma órbita para outra e a cada vez que retornam ao nível anterior emitem um fóton. Os fótons produzidos incidem em um espelho reflexivo para outro espelho parcialmente reflexivo que deixa passar uma porção da luz. Essa pequena quantidade de luz forma um potente feixe concentrado (BAGNATO, 2008).

Figura 1 - Esquema ilustrativo da produção do feixe de laser.



Fonte: adaptado de BAGNATO (2008).

Quanto ao modo de emissão temporal da luz, os lasers podem funcionar por transferência de energia contínua ou pulsada. Os lasers contínuos fornecem fluxo constante de energia (radiação) com mais de um segundo de duração. Já no modo pulsado a radiação é emitida em pulsos regulares e breves, geralmente, de alguns nanossegundos até no máximo alguns milissegundos, e a energia concentra-se de forma temporal (BERRETTA, 1995; ÜLKER, 2011).

O equipamento utilizado neste trabalho funciona em modo pulsado que caracteriza-se por variar em função do tempo, dessa forma, possibilita a geração (ligamento) e desligamento do laser em um determinado momento. Neste tipo de funcionamento, geralmente, utiliza-se um dispositivo denominado *Q-Switch*, que atua como um atenuador elétrico que impede a formação do feixe (VIANA, 2014).

No início da década de 1960, o laser era considerado "uma solução em busca de um problema", acreditava-se que ele não serviria para nada. Em seguida, os lasers foram amplamente utilizados em operações de corte e soldagem. Posteriormente, graças a fontes com duração de pulso variando de nanossegundo a femtossegundo, outras aplicações foram possíveis, tais como, marcação, ablações seletivas e gravação em materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos. As vantagens destes lasers são o

seu trabalho sem contato, alta repetibilidade, alta velocidade de varredura, possibilidade de área trabalhada comparável à dimensão do ponto do laser, alta flexibilidade e elevada possibilidade de automação (LEONE et al., 2008).

A aplicação do laser no processamento de materiais começou a partir da segunda metade do século XX e, desde então, tornou-se objeto de inúmeras pesquisas científicas em áreas diversas, tais como, medicina, odontologia, indústria, entre outras (VIANA, 2014).

2.2 Gravação a laser

A gravação ou marcação a laser faz parte de um amplo conjunto de técnicas de usinagem a laser. A usinagem a laser é uma abordagem de usinagem não-tradicional que utiliza o feixe de laser como ferramenta direta para remoção de material por meio de fusão e/ou vaporização localizada. O equipamento pode ser configurado de várias maneiras para facilitar a modelagem ou usinagem tridimensional de materiais diversos (DAHOTRE & HARIMKAR, 2008). Este processo permite fazer inscrições sobre uma vasta gama de materiais. Kuo e Lin (2008) realizaram experimentos de marcação em vidro; Leone et al. (2009) desenvolveram parâmetros para obter gravuras em madeira; Cheng-Jung et al. (2008) investigaram os efeitos da relação entre potência e velocidade de gravação sobre a lâmina de bambu identificando profundidades e colorações; e Qi et al. (2003) estudaram a influência da frequência de pulsos de laser sobre a profundidade, a largura e coloração da gravação em aço inoxidável.

O processo de gravação a laser pode ocorrer de duas formas distintas, com utilização de um único feixe de laser ou por meio de dois feixes de laser que se intersectam (DAHOTRE & HARIMKAR, 2008).

No presente trabalho a usinagem foi produzida por meio de um único feixe de laser. Esta abordagem baseia-se na geração de sobreposição de múltiplos pulsos de

alta potência que produzem sulcos rasos por varrimento de um único feixe, assim removendo sistematicamente a camada superficial do material processado. A vaporização do material durante o varrimento laser é o principal mecanismo para a formação de cada sulco. A sobreposição dos sulcos é realizada por meio da aplicação de um movimento de avanço contínuo sobre a peça de trabalho, perpendicular ao sentido de varredura do laser (DAHOTRE & HARIMKAR, 2008 apud WALLACE & COPLEY, 1989).

A Figura 2 mostra exemplos de resultados obtidos a partir de gravação por um único feixe de laser. Os estudos foram realizados no LdSM/UFRGS e buscaram verificar e estabelecer os melhores parâmetros para o processamento a laser em materiais gemológicos.

Figura 2 - Exemplos de aplicações da gravação a laser em materiais gemológicos.



A - Gravação em ágata (bracelete); B - gravação em serpentinito (pingente) e C - gravação em madrepérola (anel). Fonte: A - CIDADE (2012), B - PILCHER (2015) e C - SOARES et al. (2016).

A gravação por laser assemelha-se a um fresamento de face até certo ponto, com o diâmetro da "ferramenta" do feixe muito menor do que o dos cortadores mecânicos. No entanto, uma vez que as camadas superficiais situadas abaixo das que são queimadas irão permanecer na peça, deve-se tomar cuidado para evitar danificá-las. A taxa de remoção de material confina o processo a profundidades superficiais mais ou menos uniformes com lasers de baixa potência. É, portanto, importante escolher parâmetros de processo otimizados como comprimento de

onda, frequência de repetição de pulso, velocidade de varredura e potência do feixe de acordo com a absorção do material e a qualidade de superfície requerida (CASTILLEJO et al., 2003).

Deve-se compreender que existe um tipo de laser para cada aplicação e o material a ser processado deve estar de acordo com ele para que a radiação seja adequadamente absorvida. Dependendo do meio ativo utilizado na produção do laser e de seu regime de operação (contínuo ou pulsado), pode-se identificar o tipo de aplicação. O comprimento de onda do meio ativo designa a capacidade do sistema laser operar, portanto, diferentes eficiências são obtidas (BAGNATO, 2008).

O equipamento utilizado nesta pesquisa opera com meio ativo gasoso de CO₂ que, de acordo com Bagnato (2008), é um dos lasers de maior potência que se consegue obter. Outras características do laser de CO₂ são exploradas na descrição realizada no item 2.5.

Deve-se considerar também, o tipo de pulso utilizado na gravação. Denomina-se pulso longo aquele em que sua duração é superior ao tempo da difusão do calor no material processado. Esta variável é indicada para processos como a soldagem a laser, mas para trabalhos de microusinagem, por exemplo, a difusão do calor no material circunvizinho é indesejável e aumenta a imprecisão do processo. A difusão do calor reduz a temperatura no ponto focal e gera a fusão de uma área maior que este ponto no material. A energia é depositada muitas vezes no material fundido, que entra em ebulição provocando a ejeção de material derretido para longe da zona de trabalho, assim prejudicando o acabamento da peça usinada. Devido às limitações da usinagem por pulsos longos foram desenvolvidos os laser de pulsos ultracurtos. Neste caso, apenas uma pequena parte do pulso é transferida ao meio na forma de calor. Esses podem ser utilizados em qualquer material com extrema precisão de usinagem (VIDAL, 2010).

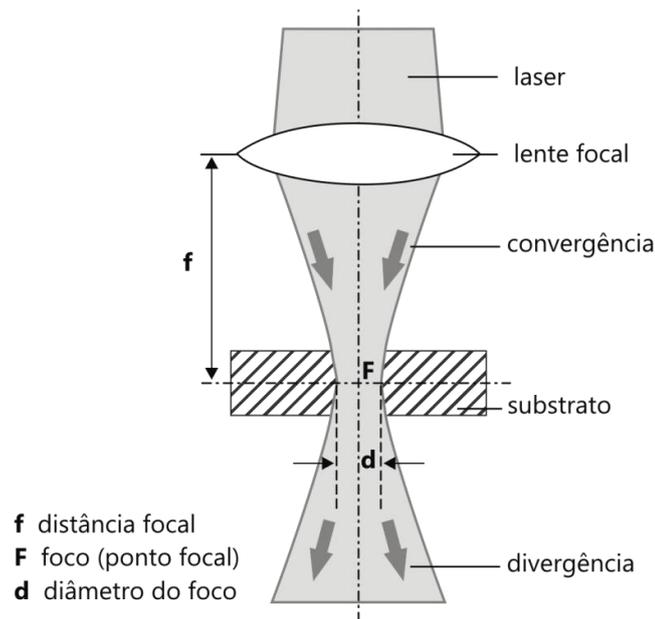
Outro fator importante na gravação a laser é o ajuste do ponto focal da lente. No momento em que o feixe de laser focado atinge um ponto preciso na peça de trabalho, ele tem todas as propriedades necessárias para executar uma tarefa específica.

Em seu caminho, a partir da fonte do meio ativo para a peça de trabalho, o laser é moldado, guiado e finalmente focado. Ele passa por uma série de componentes diferentes, dependendo do tipo de laser e da tarefa de processamento envolvida. As fórmulas da óptica gaussiana são aplicadas no cálculo de componentes utilizados na óptica de entrega e processamento do feixe. A óptica gaussiana descreve o laser como um feixe gaussiano. Esse feixe converge, tornando-se progressivamente mais estreito até atingir seu menor diâmetro, chamado de cintura de feixe, onde as ondas de luz são paralelas. Mais adiante, o laser começa a se espalhar novamente. Ele diverge até atingir um ângulo de divergência constante no campo focal. O ângulo de divergência depende da qualidade do feixe e do diâmetro da cintura do feixe. A divergência diminui à medida que a qualidade do laser e a cintura do feixe aumentam (BUCHFINK, 2007).

O foco ou ponto focal envolve a concentração do laser, compreendendo a região de menor diâmetro do feixe. No final do fornecimento do feixe, o laser entra na óptica de processamento. Ele é transformado em uma ferramenta para uso em diferentes processos, adaptando suas propriedades. O diâmetro do foco, profundidade de campo, distância da imagem e densidade de potência são precisamente adaptadas a cada processo. Por esta razão, o processamento de materiais envolve o uso de diferentes ópticas de processamento. Para focar o feixe de laser, suas características individuais dependem do processo e da máquina para a qual eles serão utilizados. Quando focalizado, o laser é concentrado em um ponto focal minúsculo. No foco, a densidade de potência possui magnitude superior à do feixe bruto. Assim, o feixe torna-se capaz de processar o material por meio de desvios e concentrações por reflexão ou refração de espelhos e lentes focais

(BUCHFINK, 2007). Os principais parâmetros envolvidos (foco, distância focal e diâmetro do foco) do princípio de focagem estão representados, conforme Figura 3.

Figura 3 - Princípio de focagem e os parâmetros envolvidos.



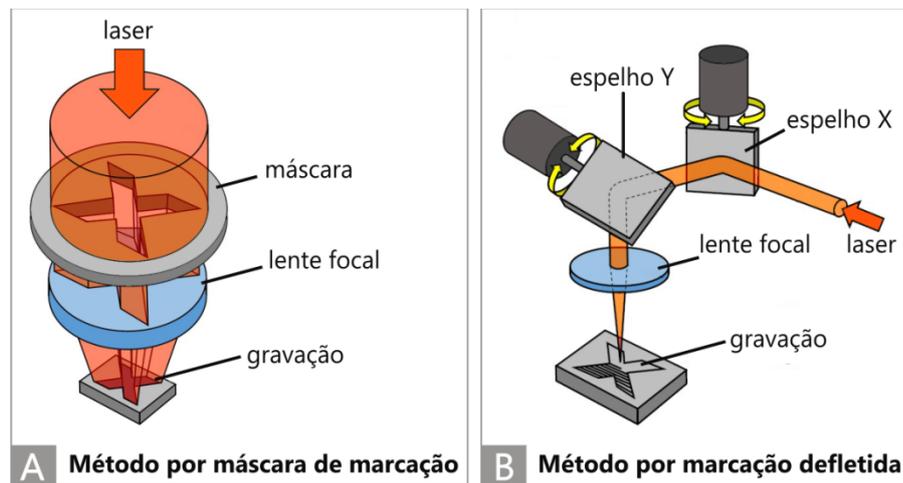
Fonte: adaptado de DUBEY & YADAVA (2008).

O processamento a laser pode ser realizado por dois métodos: método por máscara de marcação e método de marcação defletida. Os métodos são baseados em técnicas ópticas que visam o aumento da qualidade e densidade de potência do laser.

No método por máscara de marcação (Figura 4A), uma matriz translúcida do perfil a ser gravado é projetada pelo feixe sobre a peça. Esta máscara pode ser fixa ou trocada entre os pulsos de laser. Desta forma, textos podem ser gravados em um produto em movimento (HAN & GUBENCU, 2008). Este método é geralmente utilizado na marcação de etiquetas e de cabos de componentes eletrônicos (BOSMAN, 2007), bem como no processo de microusinagem para construção de microestruturas (HOLMES, 2004). A vantagem do método está na alta velocidade do processamento, porém exige-se a confecção de máscaras, nas quais a produção é demorada. Outra desvantagem é a área de gravação reduzida devido ao tamanho limitado do feixe (HAN & GUBENCU, 2008).

No método por marcação defletida (Figura 4B), o feixe é dirigido até a lente focalizadora por dois espelhos móveis (movimentos nos eixos x e y). O feixe projetado desenha o grafismo sobre a peça orientado via computador. O método oferece grande flexibilidade na criação dos grafismos, mas o custo do equipamento é mais elevado em relação ao método por máscara (HAN & GUBENCU, 2008). A marcação defletida também é denominada como "escrita direta" (*direct writing*) e geralmente é utilizada em máquinas a laser do tipo mesa x-y, *flying optics* ou galvanométricas (ZHANG & LAWRENCE, 2004). Os modelos de máquinas mencionados são descritos no item 2.3.

Figura 4 - Métodos de processamento a laser.

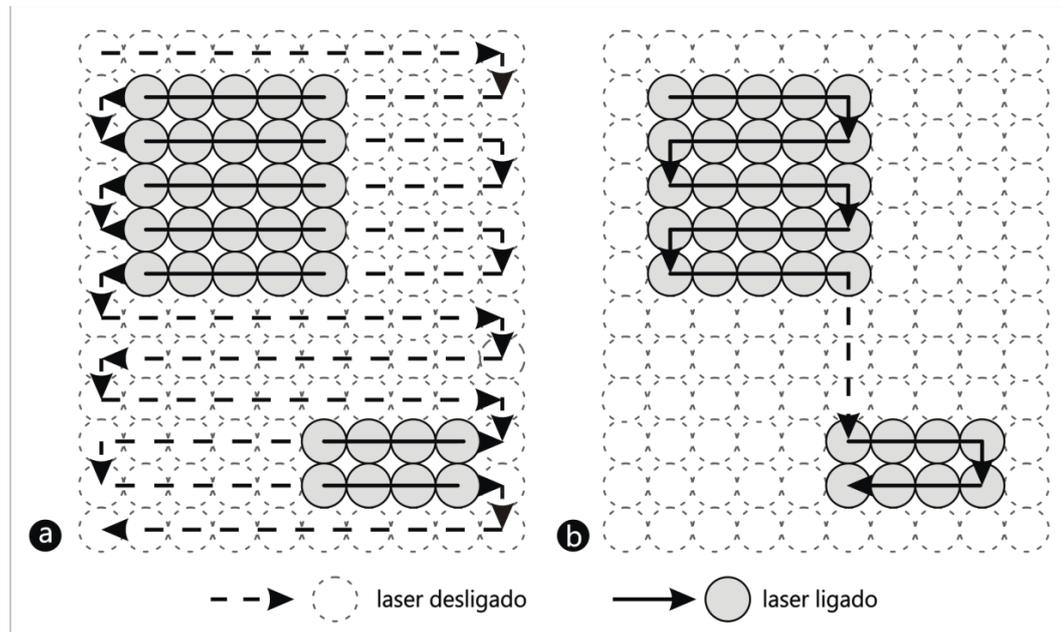


Fonte: adaptado de ÜLKER (2011).

No equipamento utilizado neste trabalho, o método aplicado é por marcação defletida. Neste método, pode-se trabalhar com arquivos gráficos do tipo *raster* ou vetorial. No tipo *raster*, a imagem é composta de pontos individuais (*pixels*), já no tipo vetorial, a imagem é composta por curvas e linhas (GANNEV, 2014).

Segundo WU et al. (2010), na varredura por vetor, o laser é guiado somente sobre as entidades a serem gravadas, já na varredura por *raster*, o feixe varre enquanto liga-se ou desliga-se, de acordo com a presença ou ausência de um padrão gráfico com velocidade constante. A Figura 5 mostra um esquema ilustrativo dos métodos de varredura por *raster* e método por vetor.

Figura 5 - Comparação da varreduras do laser por marcação defletida.



(a) Varredura por *raster* e (b) varredura por vetor. Fonte: adaptado de WU et al. (2010).

De acordo com HAN & GUBENCU (2008), as marcas produzidas no material gravado podem ser realizadas por um ou pela combinação dos seguintes processos: carbonização ou coloração, fusão, remoção superficial e vaporização. Cada efeito é utilizado de forma específica de acordo com o material processado (Quadro 1).

Quadro 1 - Efeitos da gravação a laser sobre o material processado.

Processos	Carbonização ou Colorização	Fusão	Remoção superficial	Vaporização
Reações	Mudança de cor. Reação fototérmica ou fotoquímica.	Destruição do material por decomposição térmica. Superfície irregular.	Remoção de finas camadas por meio de vaporização controlada.	Remoção do material por vaporização provocando marcas profundas.
Ocorrência	Plásticos e metais.	Metais, plásticos, cerâmicos e vidros.	Plásticos, cerâmicos, emborrachados, etc.	Cerâmicos, plásticos e vidros.

Fonte: adaptado de HAN & GUBENCU (2008).

2.3 Máquinas de gravação a laser

As máquinas de corte e gravação a laser têm seu funcionamento básico a partir de três partes fundamentais: o laser, o controlador e a superfície. O laser é o feixe emitido que traça os padrões gráficos sobre a superfície sendo orientado pelo controlador. O controlador (via computador) é responsável pelo sistema operacional da máquina e controla a direção, a intensidade, a velocidade do movimento do feixe e etc. Já a superfície é a peça de determinado material escolhida para ser processada pelo laser (GANNEV, 2014).

As máquinas de gravação a laser podem ser divididas nas seguintes categorias: mesa x-y, cilíndrica e galvanométrica. Em síntese, a categoria mesa x-y é a mais popular comercialmente. Nesta aplicação, a superfície se move no plano x-y e o laser é estacionário ou a superfície (que será gravada) permanece imóvel e o canhão de laser é movido nos eixos x e y (plano cartesiano) instruído pelo controlador, este modelo é também chamado de máquina de óptica móvel (*flying optics*). A máquina cilíndrica é para peças cilíndricas ou planas montadas em torno de um cilindro. Nesta aplicação, o laser atravessa como uma fina hélice e grava a superfície curva. Já nas máquinas galvanométricas, tanto a superfície como o laser são estacionários. O feixe é guiado por espelhos móveis (controlados via computador) para a lente focal (WIGGERS, 2006; GANNEV, 2014).

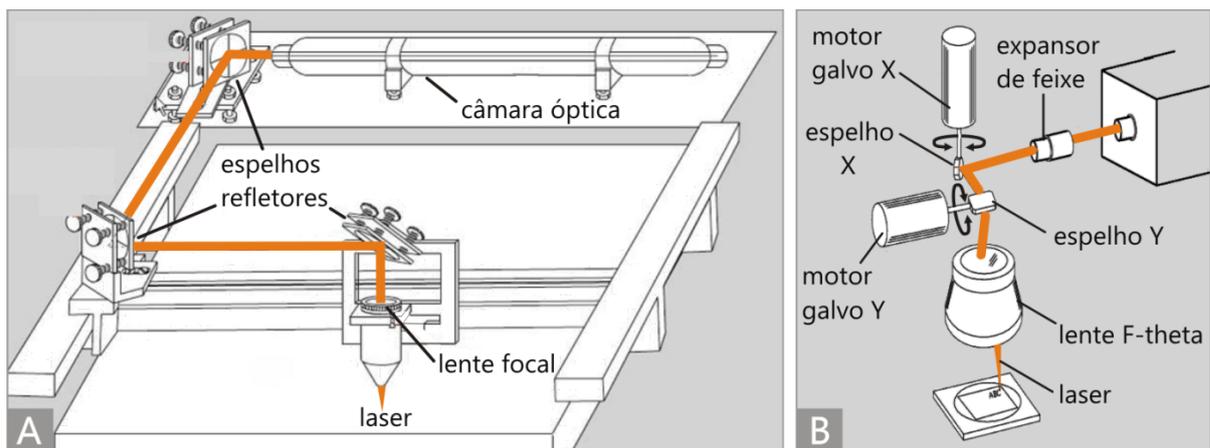
De acordo com Wiggers (2006), as máquinas galvanométricas e as de óptica móvel se diferem na movimentação do feixe, na arquitetura do equipamento e no tipo de aplicação do processamento. As máquinas de óptica móvel possuem uma movimentação fixa dos espelhos posicionadores produzindo um feixe ortogonal ao plano de trabalho, conforme a Figura 6A. Esta ortogonalidade faz com que sua principal aplicação seja no mercado de corte. Este modelo de máquina tem a vantagem de conseguir um ponto focal constante em toda área de trabalho e a

possibilidade de injetar algum tipo de gás auxiliar na região de processamento para facilitar ou para melhorar a qualidade do corte ou gravação.

Já as máquinas de modelo galvanométrico possuem uma movimentação angular dos espelhos posicionadores (nos eixos x e y) determinando assim, um feixe inclinado sobre a área de trabalho, conforme a Figura 6B. Este modelo de máquina tem sua aplicação principal no mercado de gravação e marcação de artefatos diversos (WIGGERS, 2006).

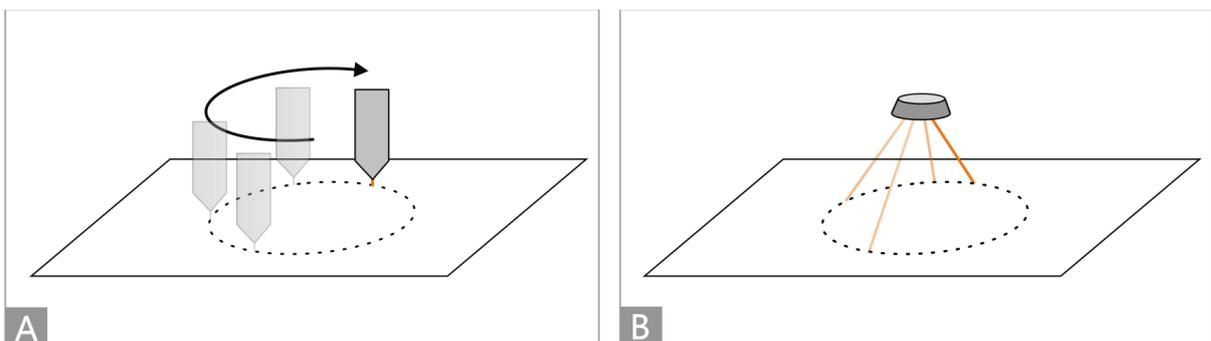
As trajetórias descritas pelo laser em máquinas de óptica móvel e máquinas galvanométricas são representadas no esquema de movimentação do feixe, de acordo com Figura 7.

Figura 6 - Princípios de acionamentos de máquinas de corte e gravação laser.



A - Máquina de óptica móvel e B - máquina galvanométrica. Fonte: adaptado de WIGGERS (2006).

Figura 7 - Movimentação do feixe em máquinas a laser.



A - Trajetória do canhão do laser realizado em máquina de óptica móvel e B - trajetória do feixe em máquina galvanométrica. Fonte: adaptado de CIDADE et al. (2016).

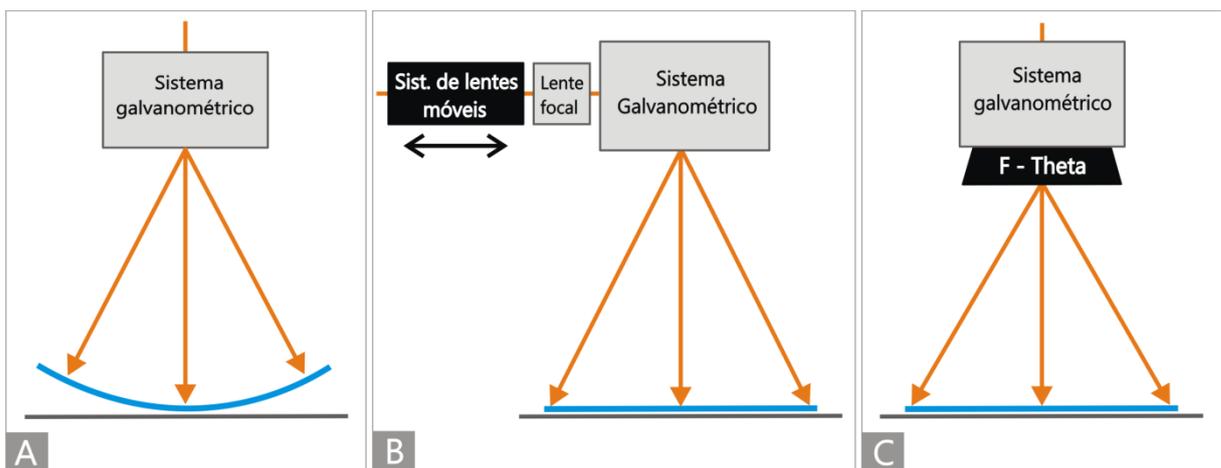
Para o desenvolvimento do presente trabalho, o foco do estudo foi restringido ao equipamento do tipo galvanométrico. Assim, tornou-se relevante seu estudo aprofundado visando obter e compreender as informações adquiridas.

2.3.1 Máquinas a laser galvanométricas

Uma máquina galvanométrica caracteriza-se por possuir uma estrutura com dois espelhos acoplados a galvanômetros. A movimentação angular destes espelhos determina o posicionamento do feixe sobre a área de trabalho (WIGGERS, 2006). Uma das desvantagens associada a este tipo de sistema é a focagem do laser sobre o plano da imagem. Como indicado na Figura 8A, quando o feixe é defletido pelo espelho sobre uma superfície, seu percurso óptico produz um ponto focal sobre uma superfície curva (calota esférica) e não sobre um plano (FERNANDES, 2008).

Para ajustar o nivelamento do campo focal, pode-se empregar um sistema móvel de lentes (Figura 8B) que alterará a distância focal, de acordo com o posicionamento desejado ou utilizar lentes específicas para este propósito, denominadas lentes $F\theta$ ou F-Theta (Figura 8C) (WIGGERS, 2006).

Figura 8 - Trajetórias de varredura do laser no sistema focal galvanométrico.



Linha azul indica a trajetória: A - campo focal em arco devido ao sistema de varredura não corrigido gerado por lente comum, B - nivelamento do campo focal obtido pelo ajuste dinâmico da distância focal para cada ponto do campo pelo sistema de lentes móveis e C - nivelamento do campo focal obtido pela trajetória corrigida por lente F-Theta. Fonte: adaptado de KOSGUN (2016).

Quanto à lente que focaliza o feixe sobre a área de trabalho, o equipamento pode ter duas arquiteturas: pré-objetiva ou pós-objetiva. A arquitetura determina se serão utilizadas lentes móveis ou lentes $F\theta$. Quando pré-objetiva, a lente focalizadora encontra-se antes dos espelhos posicionadores e utiliza-se o sistema de lentes móveis (Figura 8B). Na arquitetura pós-objetiva, a lente focalizadora está após os espelhos posicionadores e, neste caso, o ajuste focal ocorrerá por meio de lente $F\theta$ (Figura 8C). As máquinas com princípio pós-objetivo são mais comuns, posto que têm menor custo. As máquinas pré-objetivas apresentam maior custo e maior complexidade construtiva, mas compensam com um melhor ponto focal e a possibilidade de variação do campo de trabalho (WIGGERS, 2006).

A máquina utilizada neste estudo possui arquitetura pós-objetiva e faz uso de lentes $F\theta$. A principal característica desse tipo de lente é que a altura do foco da imagem (F) é diretamente proporcional ao ângulo da varredura (θ), de acordo com Shigeru et al. (1993).

As lentes $F\theta$ podem assumir variadas formas dependendo da aplicação em causa, podendo ser uma lente unidimensional, bastante utilizada em impressoras a laser ou uma lente para sistemas bidimensionais como, por exemplo, para corte ou gravação a laser (FERNANDES, 2008).

As máquinas de gravação por laser podem processar peças bidimensionais ou tridimensionais, de acordo com o número de eixos utilizados. No processamento bidimensional são realizadas as operações de corte, marcação e gravação em máquinas a partir de dois eixos (FARO, 2006).

2.4 Gravação 3D a laser

Na literatura pesquisada percebeu-se que o processamento 3D a laser pode ser realizado por meio de *software* gráfico específico para a tarefa ou utilizar de sistema de posicionamento dimensional nos planos x , y e z controlados via

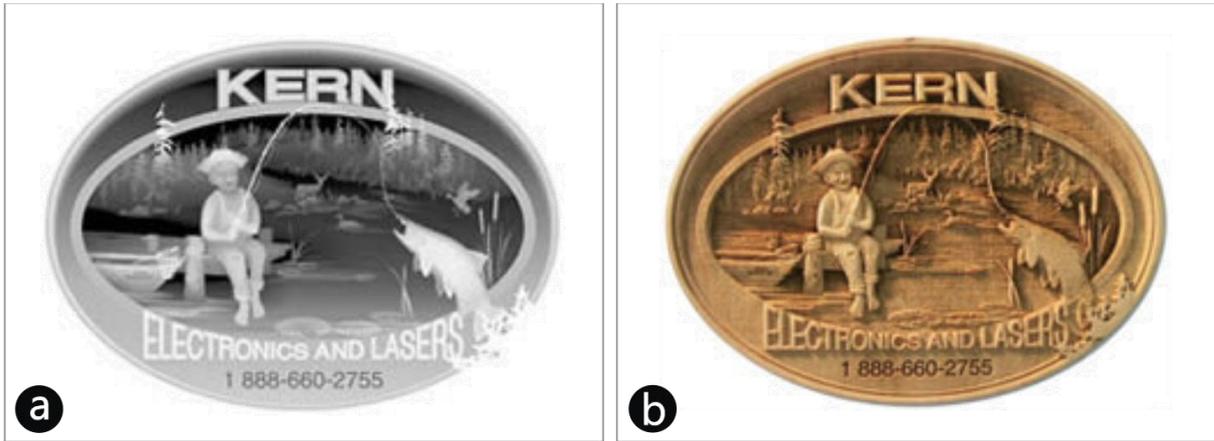
computador. Existe também a possibilidade de utilizar máscaras de marcação para a construção de microestruturas camada por camada, sendo esta uma técnica bastante aplicada na microusinagem 3D a laser.

Cabe ressaltar algumas definições referentes ao número de dimensões produzidas no processo. Os métodos de produção não mecânicos controlados por computador (*CNC, Computer Numeric Control*), possuem tipicamente duas dimensões (2D), duas dimensões e meia (2.5D) e três dimensões (3D). Nos sistemas 2D, a máquina opera nos planos x e y e os artefatos são produzidos pelo processo de corte. Quando a máquina opera nos planos x e y e com movimento limitado no eixo z, geralmente denomina-se como um processo 2.5D. Esse tipo de processo contempla a criação de relevos, os quais não configuram um modelo tridimensional complexo. São considerados efetivamente tridimensionais, os artefatos produzidos por equipamento que opera a partir de três, quatro ou cinco eixos (CELANI & PUPO, 2008; PUPO, 2008).

Popularmente, designa-se como processo 2.5D aquele em que dois eixos (x e y) movem-se simultaneamente, enquanto que o terceiro (eixo z) move-se quando os outros dois estão parados. Na literatura pesquisada percebeu-se que esta distinção é pouco utilizada, pois o resultado do processo (seja 2.5D ou 3D) é uma peça 3D. Isso se aplica às impressoras 3D, que seriam 2.5D por essa definição.

A usinagem 3D a laser em máquina vinculada a *software* gráfico opera por meio de uma escala tonal. O *software* projeta a figura em tons de cinza (*Grayscale*) para gerar a profundidade desejada. Cada tom de cinza correlaciona-se com uma determinada potência do laser. Assim, o laser faz a varredura (por *raster*) da imagem cinzenta removendo maior quantidade de material nos pontos mais escuros (KERN, 2016). Este processo proporciona uma gravação detalhada na peça, conforme a Figura 9, que apresenta um exemplo de aplicação realizado em um equipamento de óptica móvel.

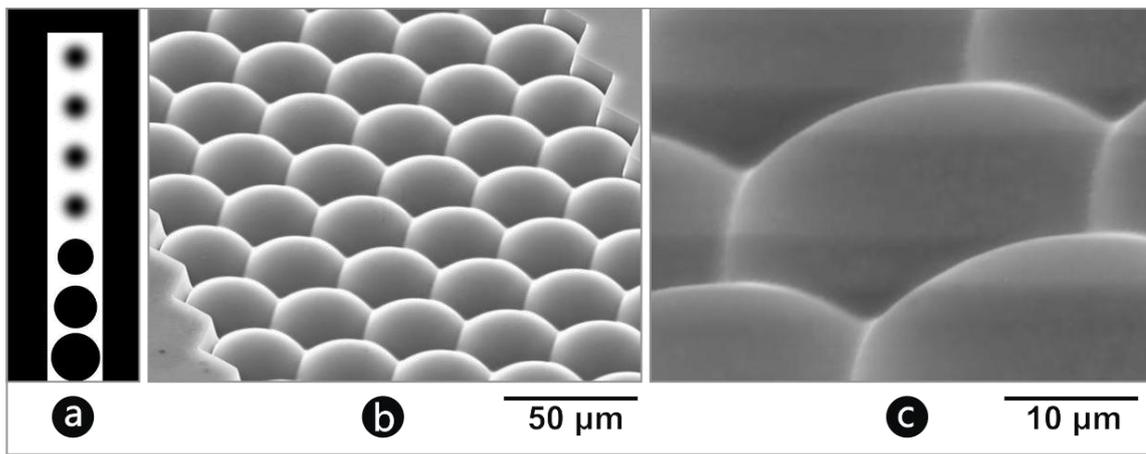
Figura 9 - Gravação 3D a laser em escala de cinza.



(a) Imagem *raster* em tons de cinza e (b) resultado da gravação em artefato amadeirado. Fonte: KERN (2016).

A técnica da escala tonal (meio-tom) de cinza pode ser utilizada na gravação tridimensional a laser por máscara de marcação visando a criação de microestruturas. Pedder et al. (2007) desenvolveram um estudo de microusinagem a laser em policarbonato (PC) para construção de estruturas camada por camada com padrões de design simples utilizando foto-máscaras de meio tom (Figura 10).

Figura 10 - Gravação 3D a laser por máscara de marcação tonal.



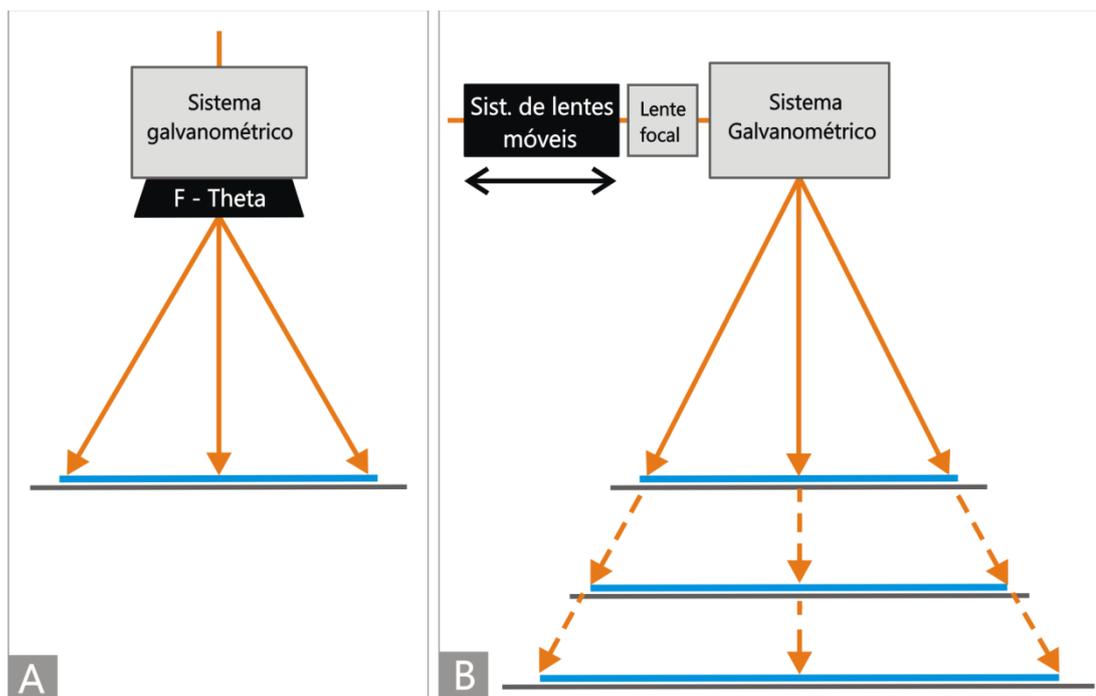
(a) Imagem da máscara aplicada no ensaio, em que cada circunferência representa uma camada da estrutura usinada, (b) resultado da gravação no substrato via análise microscópica e (c) detalhe ampliado da superfície usinada. Fonte: adaptado de PEPPER et al. (2007).

Os equipamentos com mecanismo de fabricação 3D a laser são caracterizados por possuírem três eixos, sendo estes dois controles de posicionamento dimensional,

orientados nos eixos x e y, e um controle de altura orientado pelo eixo z. O princípio óptico utilizado é pré-objetivo, de modo que, um sistema de lentes móveis ajustará dinamicamente a distância focal até a lente focalizadora (objetiva), formando assim, o eixo z. O controle do terceiro eixo é realizado por meio de um *software* que corrige o valor do foco, desse modo cada coordenada xy no plano de trabalho terá seu valor no eixo z ajustado e sincronizado (BUNCHFINK, 2007; KOSCUN, 2016).

Máquinas galvanométricas destinadas à usinagem 3D possuem sistema de focalização pré-objetivo. Neste sistema, o dimensionamento dos elementos ópticos é independente do dimensionamento do campo focal, isto é, a localização do sistema de lentes em relação à lente focalizadora é que determina a distância focal do campo de trabalho. Esta variação da localização não ocorre no sistema com ajuste pela lente F-theta, pois esta fornece um único dimensionamento do campo focal (Figura 11A). Já no sistema de lentes móveis (Figura 11B) vários dimensionamentos do campo focal podem ser alcançados permitindo, realizar tarefas de processamento com volumes e relevos diversos (KOSCUN, 2016).

Figura 11 - Variações dimensionais do campo focal em sistemas galvanométricos.



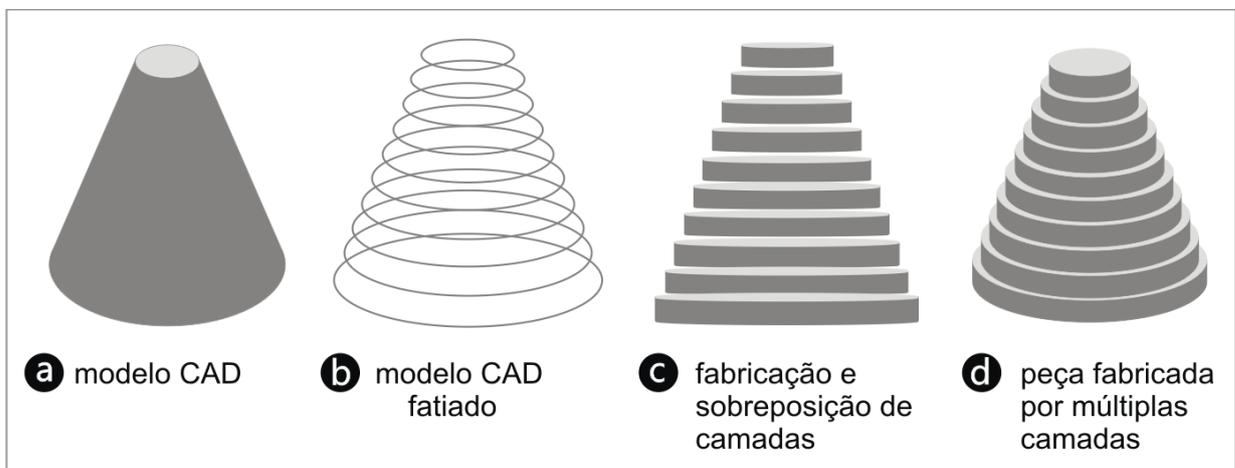
A - Sistema pós-objetivo (2D) que permite apenas um dimensionamento do campo focal e B - sistema pré-objetivo (3D) que permite a variação nas dimensões do campo focal. Fonte: KOSCUN (2016).

Um sistema de escultura em camadas é o método aplicado para construção de modelos tridimensionais em equipamentos a laser com três eixos. De acordo com Diaci et al. (2011), as abordagens relativas a usinagem 3D a laser são baseadas na necessidade de reconhecimento prévio da peça de trabalho e modelo tridimensional modelado via CAD. Várias técnicas têm sido desenvolvidas para criar texturas funcionais ou decorativas a partir de componente 3D baseadas na usinagem 2.5D a laser.

Para os autores o processo de usinagem 2.5D a laser, consiste basicamente em um modelo 3D (CAD) fatiado em determinada direção e espessura, de modo a obter informações do perfil da camada. O laser é guiado para gravar de acordo com as informações desse perfil. O eixo z da mesa de trabalho é alterado automaticamente conforme as informações do perfil de cada camada. O processo repete-se com diferentes dados 2D até resultar em uma estrutura tridimensional.

O funcionamento desta técnica pode ser resumido pelo princípio básico da prototipagem rápida como apresentado no esquema ilustrativo da Figura 12. Porém, na prototipagem rápida aditiva (ou manufaturada aditiva) o material é depositado em camadas, enquanto que na prototipagem rápida subtrativa (usinagem) o material pode ser removido para formar essas "camadas".

Figura 12 - Obtenção de modelo 3D por método de sobreposição de camadas.



Wang e Zeng (2007) usaram um sistema semelhante para processamento cerâmico 3D com laser Nd: YAG. Um modelo 3D foi previamente fatiado e a partir de seus dados foram gerados padrões bidimensionais do perfil da camada. Cada perfil usinado pelo laser correspondeu a uma camada. Após a primeira camada usinada, a mesa de trabalho elevou-se automaticamente com altura pré-definida para mudar o plano focal da superfície da peça. Esse processo repetiu-se de forma sucessiva e acumulativa até completar o modelo projetado.

Para os autores, na usinagem 3D a laser os parâmetros de processamento adequados são difíceis de calcular a partir de modelos teóricos. Portanto, o valor real de cada parâmetro foi determinado por meio de ensaio que possibilitou estabelecer um banco de dados para o processamento 3D a laser. Para os testes foi utilizada uma amostra cerâmica de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ e definiu-se a altura de 0,1 mm entre camadas. A velocidade aplicada foi variada de 5 em 5 mm/s na faixa de 5 a 40 mm/s. A potência máxima do laser era de 90 W, mas os autores ajustaram-na por meio da corrente elétrica, a qual variou entre 11 e 18A. No ensaio foram verificadas as relações entre profundidade de usinagem de uma única camada com a potência aplicada, bem como a velocidade de varredura. Para evitar erros de medição, o artefato 3D foi gerado com apenas 10 camadas. Pelo ensaio, Wang e Zeng (2007) obtiveram-se os seguintes resultados e conclusões:

- a) A profundidade de usinagem aumentou com o aumento da potência do laser. Quando a corrente aumentou até o valor de 17 A, a profundidade começou a reduzir. A razão desse efeito foi devido à alta energia utilizada para irradiar a cerâmica, pois o aumento de energia consumida na fusão do material implicou na redução de energia consumida na usinagem a laser. Outro efeito foi o depósito de alguns detritos de cerâmica sobre a superfície talhada, nas quais a remoção foi difícil diminuindo ainda mais a profundidade real de usinagem;
- b) Quando a velocidade de usinagem apresentou valor superior a 15 mm/s, a profundidade de usinagem foi reduzida. E quando a velocidade foi inferior a

15 mm/s, a profundidade também foi reduzida. A principal razão desse efeito foi a taxa de sobreposição de pulsos de laser que mudam conforme a alteração da velocidade de varredura. Quando a velocidade de varrimento ultrapassou o limite de um determinado intervalo, a área de sobreposição passou a reduzir juntamente com a energia total, resultando na diminuição da profundidade de usinagem;

c) Quando a velocidade foi muito lenta, a energia de entrada total aumentou significativamente resultando também na diminuição da profundidade de entalhe, pela mesma razão de quando a corrente do laser excedeu certo valor.

Com os dados obtidos, Wang e Zeng (2007) realizaram um novo ensaio para construção de modelo figurativo na peça cerâmica, como visto na Figura 13.

Figura 13 - Relevô de estrela 3D em material cerâmico por usinagem 3D a laser.



Peça confeccionada com corrente de 12,2 A, velocidade de 25 mm/s e camadas de 0,1 mm de espessura em 50 minutos de processamento. Dimensões de 15 x 14, 27 x 2,5 mm. Fonte: WANG & ZENG (2007).

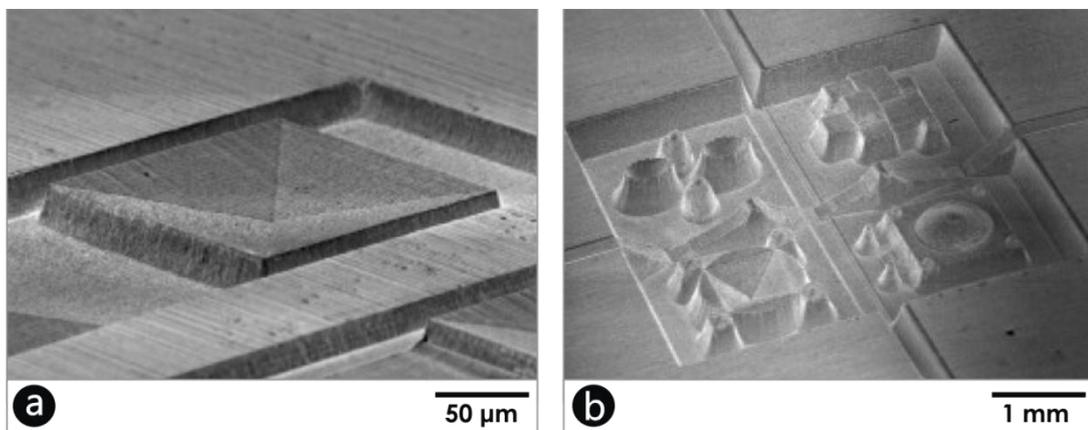
Na literatura são encontrados estudos diversos, nas quais a usinagem 3D a laser relaciona-se com a microusinagem para a fabricação de microestruturas, micro ferramentas e micro sistemas. Estes estudos referem-se a uma crescente tendência à miniaturização, especialmente na área de produção de eletrônicos (HEYL et al., 2001).

HEYL et al. (2001), apresentaram um sistema de microusinagem 3D a laser por sobreposição de camadas a partir de uma máquina modelo mesa x-y equipada com laser Nd: YAG. Neste estudo, a amostra processada foi fixada em uma mesa de

trabalho que deslocou-se nos eixos x e y sob um ponto de laser fixo enquanto um motor de passo deslocou o foco do laser no eixo z. Devido ao movimento da mesa foram gerados desvios na trajetória do laser, para corrigir este efeito foram utilizados espelhos de correção. Os autores desenvolveram uma interface de dados específica para produção de microestruturas 3D. O programa visou facilitar a transformação de modelos 3D desenvolvidos, por exemplo, no AutoCAD em microestruturas 3D. De acordo com a profundidade da usinagem, o modelo 3D é dividido em dados de estrutura para gerar os perfis das camadas 2D.

Posteriormente, esses dados são convertidos em dados legíveis para máquina bidimensional. No processo de usinagem a laser, o arquivo gráfico utilizado foi do tipo *raster (bitmap)*, assim, cada pulso de laser equivale a um *pixel*. Dessa forma, a área da peça de trabalho foi dividida em linhas de *pixels* paralelas e cada linha foi varrida sucessivamente. Após a finalização da varredura do feixe em uma camada a lente pré-objetiva move-se para baixo, no eixo z, a fim de trabalhar na camada seguinte. O posicionamento do eixo z permanece constante durante toda a usinagem de uma camada. Este processo foi aplicado em materiais diversos como metais, polímeros e cerâmicos. Na Figura 14 são apresentados exemplos de formatos geométricos resultantes do sistema de microusinagem 3D a laser desenvolvido em peça de cobalto.

Figura 14 - Imagens microscópicas de peça microusinada a laser.



Geometrias obtidas pela microusinagem em cobalto: (a) formato quadrangular e (b) formatos diversos. Fonte: adaptado de HEYL et al. (2001).

Com base nas informações adquiridas, visa-se utilizar o deslocamento vertical da mesa de trabalho da máquina Mira 3007 para o desenvolvimento da gravação 3D a laser. Porém, visto que os parâmetros de processo são sensíveis ao material utilizado, optou-se pela utilização de PMMA (Poli(metacrilato de metila) neste estudo. Assim, foi também realizada uma revisão apenas a respeito da gravação nesse material, utilizando fonte de CO₂.

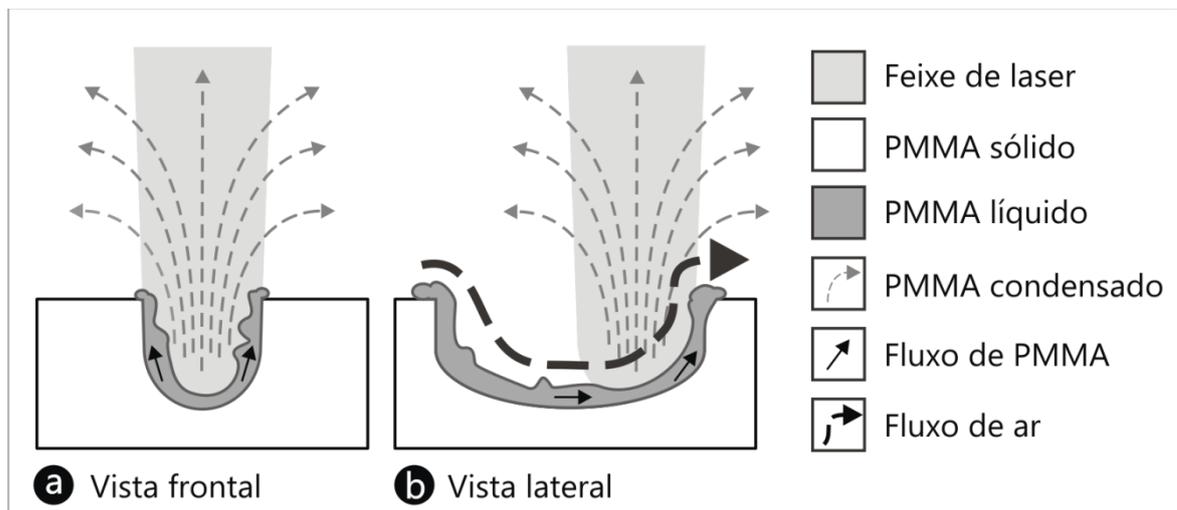
2.5 Gravação a laser com fonte de CO₂ em PMMA

Existem diversos tipos de fonte de laser e o campo de aplicação é vasto, mas no processamento de materiais, as fontes aplicáveis são restritas aos lasers de alta potência. Neste trabalho aplicou-se uma das fontes mais utilizadas industrialmente, a fonte de dióxido de carbono (CO₂). O laser de CO₂ emite radiação eletromagnética na região do infravermelho (IR) de aproximadamente 10,6 μm (comprimento de onda) propiciando interação com diversos compostos orgânicos (COSTA, 2009). Esta fonte possui elevada potência e feixe com alta qualidade sendo composta também, pelo gás nitrogênio (N₂), que auxilia na excitação das moléculas de CO₂ juntamente com o gás hélio (He), responsável pelo arrefecimento e manutenção do estado excitado do meio ativo. A fonte de CO₂ é indicada para processar materiais não-metálicos, já que não possui concentração de energia suficiente para usinar e no processo grande parte da energia do laser é refletida, tornando-se altamente perigosa em metais. Desse modo, deve ser aplicada em materiais poliméricos, orgânicos e cerâmicos (FARO, 2006; CIDADE, 2012; PARE et al., 2014).

O processamento do PMMA por radiação laser é puramente térmico, ou seja, o feixe aquece localmente, de forma intensa e rápida a superfície do polímero. A energia transferida pode provocar a fusão, ebulição e/ou vaporização do material. À medida que o feixe transfere parte de sua energia, o PMMA passa por várias etapas de transição, como a vítrea, seguido de liquefação e posteriormente degradação térmica (DAKKA, 2004; SUN et al., 2006).

De acordo com Costa (2009), inicialmente, quando o laser ainda imóvel atinge a peça de PMMA, o material removido é gasoso e ejetado para fora do canal (traçado do laser). Este material é resfriado pelo ar atmosférico e/ou pelo gás de resfriamento, sendo condensado em diferentes regiões da peça. Entre o material gasoso e o sólido existe o PMMA na forma líquida, que é empurrado para cima devido à pressão dos gases aquecidos e provavelmente por convecção e capilaridade. Este fato gera a formação de uma "coroa" em volta do canal, que é desfeita logo que o laser passa a mover-se. A Figura 15 mostra esquema ilustrativo da interação entre o laser e o substrato de PMMA.

Figura 15 - Ilustração do processamento a laser em substrato de PMMA.

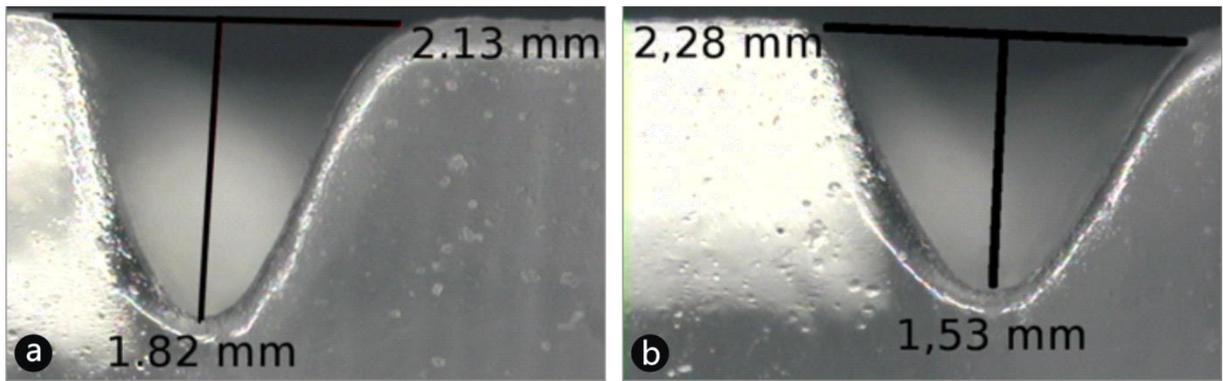


Fonte: adaptado de COSTA (2009).

O laser de CO₂ possui um formato gaussiano. Isto significa que na distância focal do laser o diâmetro é mínimo e a concentração de energia é máxima. Neste formato, o canal formado pelo laser apresenta-se mais largo e raso à medida que aumenta a distância focal. A usinagem com feixe gaussiano produz um canal com perfil também gaussiano (ALDA, 2003; COSTA, 2009).

A Figura 16 mostra a vista da secção transversal de corte dos canais gravados no substrato de PMMA em diferentes distâncias focais decorrentes de um estudo sobre o processo de fabricação de mini e microdispositivos fluídicos por meio da ablação a laser de dióxido de carbono.

Figura 16 - Perfil gaussiano de canal formado por laser CO₂ em peça de PMMA.



Vista da seção transversal do traçado: (a) distância focal de 57,8 mm e (b) 59,8 mm. Fonte: adaptado de COSTA (2009).

De acordo Jensen et al. (2003), nem todos os polímeros são adequados para o processamento com laser de CO₂. Na verdade, a maioria dos polímeros, assim como o PMMA, irá queimar e produzir grandes quantidades de fuligem, o que pode ser difícil de remover da peça processada. O PMMA possui grande variedade de classes e no estudo realizado os autores verificaram que existe diferença de qualidade superficial entre amostras de PMMA processadas a laser com mesmos parâmetros, mas de fabricantes diferentes. A razão para a diferença está nos aditivos químicos das diferentes classes de PMMA, que podem influenciar na usabilidade do material. Desse modo, concluíram que os efeitos do laser no polímero variam conforme sua composição.

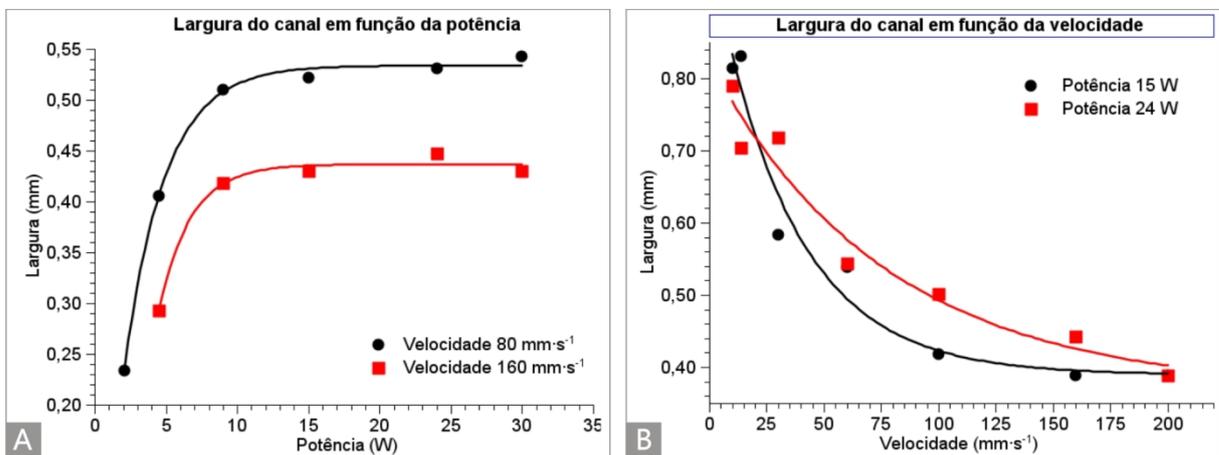
Na gravação a laser, a adequação dos parâmetros de processo contribui para um melhor controle do mesmo, bem como para a redução de tempo e custo. A definição dos parâmetros, como largura e profundidade dos canais formados pelo laser é essencial, pois estes estão fortemente ligados ao tempo de exposição e potência do laser por unidade de área (COSTA, 2009).

A literatura oferece uma variedade de estudos que descrevem a relação entre largura e profundidade dos canais com parâmetros ajustáveis no laser, como velocidade, potência, número de passes, etc. Tem-se como exemplo os estudos referentes à fabricação de microestruturas pelo laser de CO₂ (KLANK et al., 2004) e

(JENSEN et al., 2003), a qualidade do corte a laser de CO₂ em materiais poliméricos, (DAVIM et al., 2008), a microusinagem em PMMA (NAYAK, et al., 2008) e microusinagem por laser CO₂ (YUAN & DAS, 2007).

Costa (2009) avaliou a largura e a profundidade em função da velocidade e da potência geradas na construção de microcanais por meio do laser de CO₂ em PMMA de um único fabricante. Para o ensaio foram gravados traços paralelos que extrapolaram a área da amostra para, assim, analisar a profundidade da gravação pela vista lateral da peça. Inicialmente, foram realizados dois ensaios com velocidades distintas, 80 mm/s e 160 mm/s, em que foi avaliada a relação da largura do canal em função da potência. Os resultados obtidos foram expressos graficamente conforme a Figura 17A. No segundo ensaio foram aplicadas duas potências distintas, 15 W e 24 W, para analisar a relação da largura do canal em função da velocidade, de acordo com a Figura 17B.

Figura 17 - Resultados da largura do traçado do laser CO₂ em peça de PMMA.

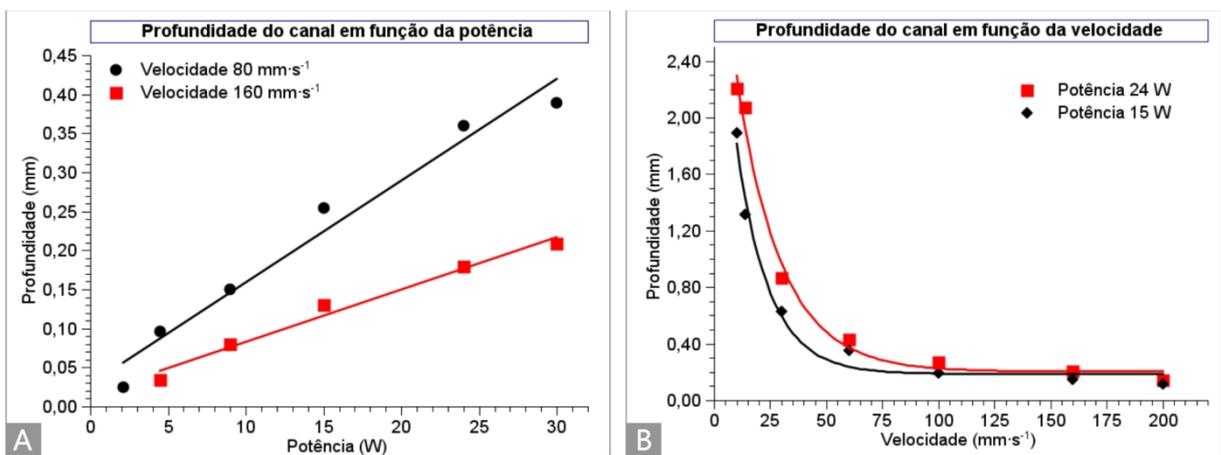


Fonte: adaptado de COSTA (2009).

O estudo concluiu que as larguras dos canais variam acentuadamente em baixa potência, e se mantêm constantes a partir da potência de 14 W (Figura 17A). Desse modo, para gerar maior alargamento do canal deve-se aumentar a potência até aproximadamente 14 W. Na Figura 17B, as curvas resultantes demonstraram que maiores larguras de canais são obtidas em baixas velocidades e vice-versa. O autor

observou que para larguras maiores deve-se reduzir a velocidade, pois a largura do canal é definida por dois processos: um direto e outro indireto. No processo direto, o feixe de laser produz a gravação pela interação direta com o substrato. Logo, os canais nunca apresentarão largura menor que o diâmetro do feixe de laser. No processo indireto, o laser faz a gravação pelo aquecimento das vizinhanças do substrato. Assim, a largura máxima do canal será limitada pela dissipação térmica do material. Para analisar a profundidade dos canais, utilizou os mesmos valores para as velocidades e potências aplicadas no ensaio anterior. Os resultados obtidos na relação da profundidade e potência podem ser vistos na Figura 18A. A relação da profundidade com a velocidade aplicada pode ser vista na Figura 18B.

Figura 18 - Profundidade obtida pelo traçado do laser CO₂ em peça de PMMA.



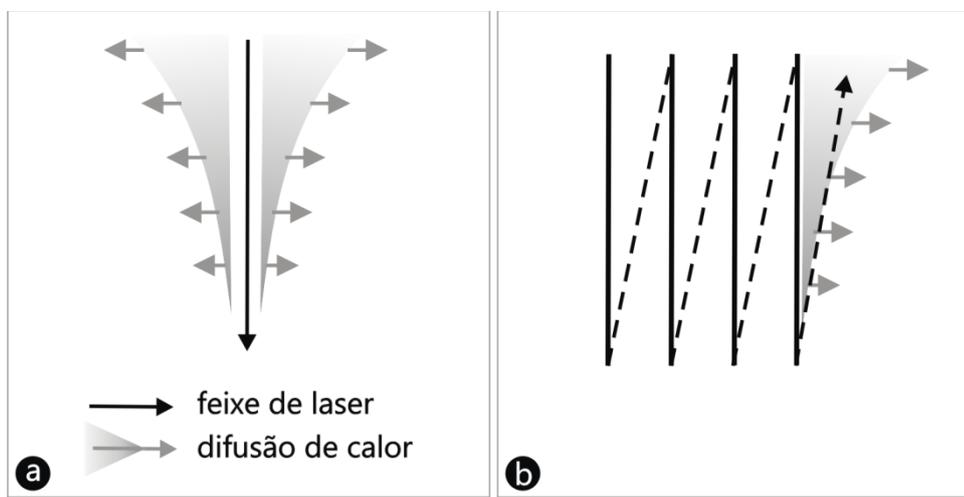
Fonte: adaptado de COSTA (2009).

A Figura 18A apresenta relações lineares entre os parâmetros estudados indicando que a profundidade é diretamente proporcional a potência aplicada. Em relação à velocidade, observa-se um inversamente proporcional para a profundidade dos canais (Figura 18B). Esta variação foi semelhante ao comportamento analisado da gravação com laser de CO₂ em PMMA de Pare et al. (2014).

Jensen et al. (2003) analisaram o modo de varredura *raster* com laser CO₂ em substrato de PMMA. No ensaio, linhas paralelas estreitamente espaçadas foram sequencialmente processadas. Verificou-se que quando um canal é cauterizado a energia térmica no material aquecido começa a difundir-se para o meio envolvente,

como ilustrado na Figura 19a. Desse modo, a área seguinte a ser cauterizada vai estar pré-aquecida pelo calor difundido a partir do primeiro feixe Figura 19b. Isto corresponde a um valor mais baixo de energia necessária para ultrapassar o limiar de energia do polímero pré-aquecido. Mas se conversão de energia é suficientemente elevada, então o feixe irá sobrepor-se entre as linhas adjacentes resultando em uma potência incidente mais elevada do que a irradiação a partir de uma única passagem do feixe.

Figura 19 - Esquemas ilustrativos da difusão térmica de gravação a laser.



(a) campo de difusão térmica de gravação de um único passo de feixe visto a partir da superfície e (b) campo de difusão térmica de uma varredura do laser. Fonte: adaptado de JENSEN et al. (2003).

Quanto à aplicação, na literatura existem diversos estudos sobre aplicação do laser de CO₂ no PMMA. A utilização do laser de CO₂ para a fabricação de microestruturas de polímeros por maquinário a laser é apresentada como uma alternativa rápida e barata em relação às tecnologias existentes, como relatado no estudo de Klank et al. (2004), nas quais recomendam a aplicação do laser de CO₂ para a usinagem de microcomponentes em PMMA no setor industrial. Assim, este estudo propõe um método para a usinagem a laser de modelos 3D em PMMA.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme já exposto, este estudo propõe o desenvolvimento de um método para usinagem a laser de um modelo 3D por múltiplas camadas, a partir de equipamento galvanométrico pós-objetivo. Assim, elencou-se etapas focadas na identificação e caracterização das variáveis do processo, a fim de definir os parâmetros adequados para alcançar o objetivo proposto.

Este capítulo foi dividido em nove etapas: 3.1 Equipamento de gravação a laser; 3.2 Material e corpos de prova; 3.3 Calibração da mesa de trabalho; 3.4 Dispositivo para controle do deslocamento vertical da mesa de trabalho; 3.5 Determinação dos ângulos de varredura do feixe de laser; 3.6 Determinação do ponto focal de acordo com espessura do substrato; 3.7 Determinação de parâmetros para usinagem 3D laser; 3.8 Ensaio de validação inicial; 3.9 Modelo 3D final para validação do processo.

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios pertencem ao LdSM, e incluem lupa estereoscópica, paquímetro digital e *scanner* tridimensional a laser. As análises e avaliações das superfícies usinadas das amostras foram realizadas por meio de imagens obtidas via lupa estereoscópica, modelo SZX16 da marca Olympus[®], interligada ao *software* AnalySIS Starter[®]. Este equipamento é utilizado no estudo de microestruturas, sistemas ópticos e de iluminação de materiais (PICHLER, 2014). As medidas de espessura nas amostras ensaiadas foram obtidas com auxílio de paquímetro digital (modelo 727) da fabricante Starret Tools[®]. Este paquímetro mede espessuras na faixa de 0 a 150 mm com resolução de 0,005 mm e uma incerteza de $\pm 0,01$ mm (STARRETT, 2016).

A aquisição de dados topográficos das superfícies dos corpos de prova para a verificação da exatidão das medidas após usinagem foram obtidas por meio do digitalizador tridimensional a laser modelo Digimill 3D[®] da empresa Tecnodrill. Este equipamento caracteriza-se como um equipamento CNC multifuncional, pois

funciona como fresadora e digitalizador 3D (SILVA, 2006). Utilizou-se também um *scanner* 3D portátil, Artec Eva[®] da empresa Artec Group para obter um modelo para o ensaio de validação do método proposto.

A seguir, apresenta-se a descrição detalhada de cada etapa, bem como os equipamentos que foram utilizados.

3.1 Equipamento de gravação a laser

No presente estudo foi utilizada a máquina galvanométrica modelo **Mira 3007** (Figura 20A) da marca Automatisa Sistemas[®] destinada para cortes, marcações e gravações de projetos bidimensionais e tridimensionais (por encaixe). A velocidade de varredura do laser pode atingir até 500 m/min. O equipamento pertence do LdSM e foi empregado no estudo de técnicas para caracterização e padronização do processamento a laser em materiais diversos, tais como, couro (SANTOS, 2012), ágata (CIDADE, 2012), madeira (RASEIRA, 2013), arenito (BARBIAN, 2015), serpentinito (PICHLER, 2015) e madrepérola (SOARES et al., 2016).

Em seu funcionamento, este equipamento utiliza o deslocamento vertical da plataforma móvel, juntamente com a mesa de trabalho, (Figura 20B) para realizar o ajuste focal. Esta mesa desloca-se apenas no eixo z e possui área de trabalho definida de acordo com o foco da lente F-theta selecionada. No LdSM há duas lentes, de 100 e 300 mm. Para este trabalho foi utilizada a **lente F-theta de 100 mm** com área de trabalho de 100 x 100 mm, sendo esta a lente de maior exatidão focal disponível para o equipamento.

A máquina Mira 3007 possui um sistema de identificação prévia da área de processamento por laser visível, denominada *red pointer* (Figura 20C), que simula a trajetória do laser indicando, as dimensões máximas a serem trabalhadas. Este mecanismo auxiliou no posicionamento da peça sobre a mesa de trabalho nos

ensaios. Para remover o vapor e resíduos oriundos do material usinado existe um sistema de exaustão (Figura 20C) acoplado na plataforma móvel.

Figura 20 - Equipamento utilizado no desenvolvimento da metodologia.



A - Máquina Mira 3007, vista frontal, B - parte interna da máquina, onde (a) indica a mesa de trabalho e (b) indica a plataforma móvel e C - (a) demarcação prévia da área a ser processada e (b) sistema de exaustão da máquina.

O processamento a laser é controlado e programado via computador a partir do *software* operacional Laser Draw[®]. As principais funções deste computador são as seguintes: criar interface entre operador e a máquina, armazenar e administrar os dados de entrada, calcular as posições dos espelhos galvanométricos (trajetória x-y), calcular os valores de correção de dados computados pelo usuário e monitorar e controlar o fornecimento de arrefecimento e de energia.

Pelo Laser Draw[®] é possível criar os trabalhos gráficos e ajustar os parâmetros de usinagem. O programa trabalha com objetos gráficos vetoriais e de imagem. Os formatos de arquivos vetoriais aceitos são o .plt (Arquivos de Plotagem em HP-GL) e o .dxf (Arquivo de Formulário de Troca de desenho - *Drawing Exchange Format*) e para arquivos de imagens são suportados os formatos, .bmp (Arquivos Bitmap do Windows), .jpeg (Arquivos de fotos do jpeg - *Joint Photographic Experts Group*) e .gif (Arquivo de formato para intercâmbio de gráficos - *Graphics Interchange Format*). Para controlar os parâmetros de varredura do laser neste trabalho somente o formato vetorial foi utilizado. O preenchimento (área a ser usinada), realizado via *software* Laser Draw[®], funciona apenas com este tipo de objeto gráfico, em que

linhas paralelas equidistantes são distribuídas no interior de curvas de um desenho importado, também vetorial.

O laser é gerado em meio gasoso de CO₂ dopado com nitrogênio. A potência máxima nominal é de 60 W (100%). Esse é considerado de baixa potência e destina-se à gravação e ao corte de materiais orgânicos, tais como os polímeros. Porém, o tempo de utilização do equipamento excede cinco anos, implicando na redução do valor real de potência. Desse modo, utilizou-se um medidor de potência, modelo P100 da marca Lasercraft[®]. Esse sensor funciona com um cabeçote térmico, o qual foi exposto à potência máxima do laser por 20 segundos. Constatou-se que, atualmente, **a potência máxima do laser é de 43 W**, valor utilizado em todos os ensaios realizados. Optou-se pelo uso da potência máxima disponível de modo a, para uma mesma profundidade, maximizar a velocidade de varredura do laser.

3.2 Material e corpos de prova

O material utilizado nas amostras para os ensaios, bem como para validação do método proposto foi o **Poli(metacrilato de metila) - PMMA**. Também conhecido como acrílico, trata-se de um polímero sintético cujas principais características são suas propriedades ópticas e mecânicas. Este material caracteriza-se como um polímero com boa resistência a intempéries como: ácidos minerais e orgânicos, soluções alcalinas, gorduras e a maioria dos gases. É indicado para utilização em temperaturas até 85 °C em uso contínuo, atingindo seu ponto de fusão a 120 °C (AQUINO, 2005).

O PMMA foi selecionado como substrato para as análises, conforme o estudo de Costa (2009) em que avaliou a adequação de alguns materiais, como poliestireno (PS), PET (poli(tereftalato de etileno)), PMMA, chapa de raio-X, poliéster e titânio em superfície de vidro no processamento a laser com fonte CO₂. Os materiais foram analisados visualmente considerando os aspectos referentes ao corte, formação ou

não de grande quantidade de gases, alteração de cor do material (alteração química do composto) entre outros. Foram realizadas usinagens superficiais para formar sulcos e cortes para a separação em uma ou mais partes. Dentre os materiais, o PMMA foi o que apresentou melhor qualidade visual nos cortes.

Este polímero ao degradar termicamente produz basicamente seu monômero, CO₂ e outros gases, ocasionando uma usinagem limpa e sem contaminantes. Além disso, apresenta alta resistência elétrica possibilitando utilizá-lo em aplicações que necessitem de altas tensões, bem como, baixa capacidade calorífica e condutividade térmica proporcionando rápido aquecimento no ponto focal do laser (COSTA, 2009). Assim, como os resultados acima citados, a folha de PMMA apresenta-se como um sólido visualmente homogêneo e não poroso facilitando as análises das marcações do laser e assim, a medição dos dados de usinagem.

Existem na literatura, diversos estudos correlacionando os modos de interação entre o laser de CO₂ e o PMMA, como visto, no item 2.5. Contudo, os resultados encontrados podem variar devido às diferenças de fabricação tanto dos equipamentos quanto do substrato (COSTA, 2009). Portanto, há a necessidade de realizar uma série de ensaios sistemáticos para avaliar os parâmetros das variáveis envolvidas no processo e os resultados gerados pela metodologia visando enquadrar-se como estudo com rigor científico.

Para a preparação dos corpos de prova realizou-se o corte a laser das chapas, de acordo com medidas requeridas em cada ensaio proposto. Esta redução de medidas visou facilitar o manuseio dos corpos de prova para as análises subsequentes. As espessuras das chapas utilizadas nos ensaios foram de 5,5 mm para os ensaios iniciais e de validação e, posteriormente, utilizou-se as chapas de 10 e 20 mm de espessura somente nos ensaios de validação final. Utilizou-se também uma placa de 2 mm de espessura, mas somente no ensaio para pré-seleção de altura da mesa via dispositivo. Em todos os corpos de prova selecionados foi realizada uma inspeção visual e tátil para verificar o aspecto superficial (acabamento) resultante da

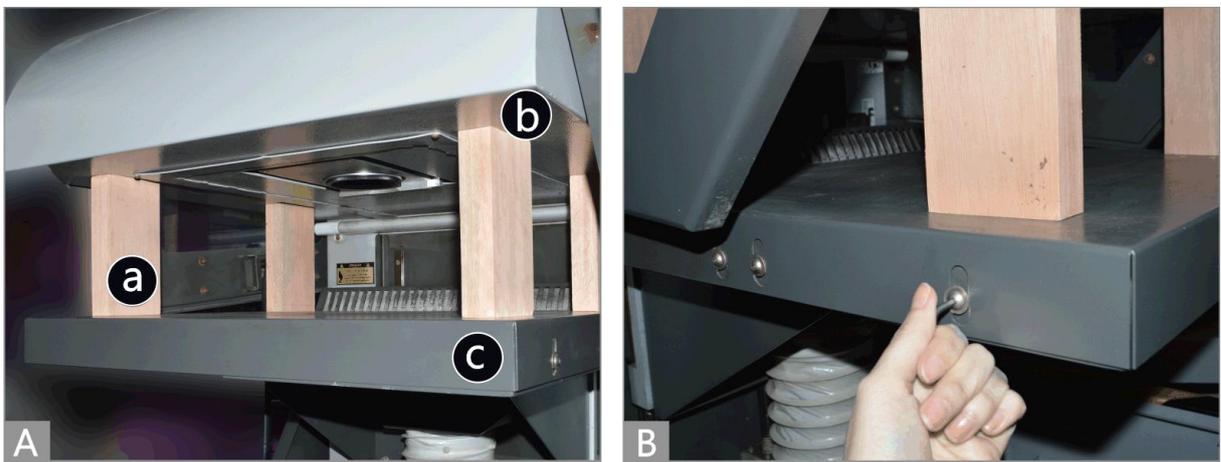
interação com laser. Essa percepção serviu como uma triagem para evitar a utilização de amostras com rebarbas ou danificadas para os ensaios.

3.3 Nivelamento da plataforma móvel

O nivelamento consistiu em equiparar a plataforma no plano xy em relação à lente focalizadora. Para nivelar utilizou-se quatro calços de madeira (160 x 80 x 30 mm) com todos os lados planificados por usinagem CNC. Os quatro perfis foram dispostos sobre a plataforma móvel da máquina formando 90° em relação à placa de suporte da lente focal.

A placa de suporte serviu como padrão de referência para o nivelamento. Para o processo, elevou-se a plataforma até que todos os calços tocassem simultaneamente a placa (Figura 21A). Posteriormente, o ajuste foi finalizado por meio dos parafusos laterais da plataforma (Figura 21B).

Figura 21 - Nivelamento da plataforma móvel da máquina.



A - (a) Calço de madeira planificado, (b) placa de suporte da lente focalizadora, (c) plataforma móvel da máquina Mira 3007 e B - ajuste manual do nivelamento da plataforma auxiliado pelos parafusos dispostos em ambas laterais da peça.

Com o nivelamento da plataforma foi possível a adequação necessária para determinar a distância focal de acordo com a lente utilizada. Buscou-se, por meio de

um sistema eletrônico de controle a elevação da plataforma para o ajuste do foco de modo automatizado proposto no item a seguir.

3.4 Dispositivo de controle para deslocamento vertical da plataforma móvel

Na configuração original da Mira 3007, o sistema de ajuste focal para a lente em uso é auxiliado pelo movimento vertical da plataforma móvel. A plataforma desloca-se sobre duas guias lineares, por meio de um fuso acionado por motor de passo.

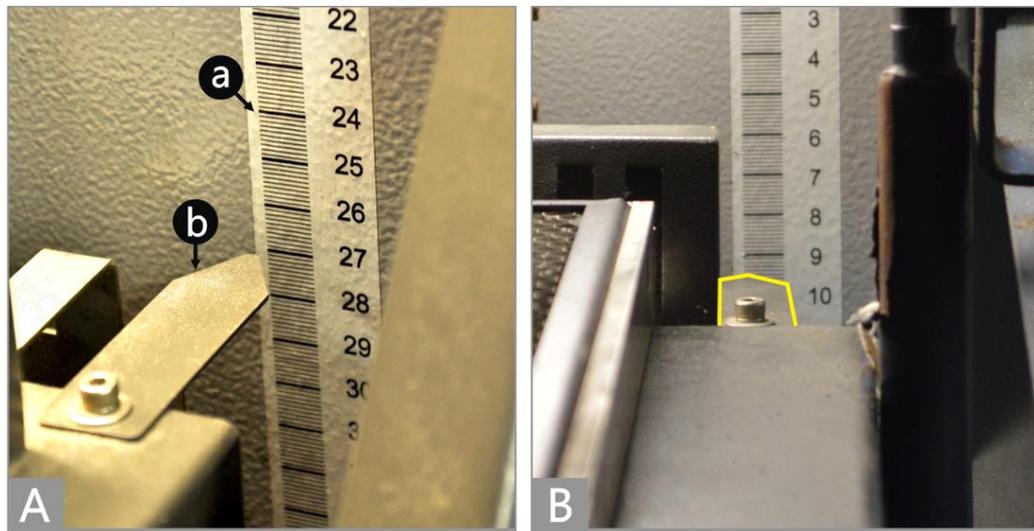
O motor é responsável pelo controle e exatidão do posicionamento da mesa, estando conectado ao *hardware* do sistema da máquina. O modelo do motor de passo é o SM1. 8-D18-MN (bipolar), controlado pelo *driver* Q2HB44MA(A), o qual recebe comandos do *software* específico da máquina.

O deslocamento da plataforma ocorre pelo acionamento manual de dois botões, responsáveis por sua elevação e descida. Este acionamento possibilita a correção da distância focal, de acordo com a lente utilizada, considerando a altura da mesa de trabalho de 30 mm. Para a lente de 100 mm, a distância focal definida pelo fabricante é de 58 mm (medida entre a lente focal e o topo da mesa de trabalho).

O posicionamento é verificado por uma escala métrica localizada no fundo da máquina e indicado por uma seta metálica engatada na parte posterior da plataforma (Figura 22A). Os valores do posicionamento são dados em milímetros, mas a medida é incerta, pois cabe ao operador nivelar-se à seta indicadora e identificar visualmente a posição requerida (Figura 22B) na escala. Esta situação pode ocasionar erro de paralaxe, ou seja, erro de visualização devido à diferença de posicionamento visual do operador em relação à seta indicadora. Assim, na configuração original do equipamento não existe a possibilidade de determinar a medida real do deslocamento gerado. Para o desenvolvimento do método proposto é essencial

controlar a profundidade de usinagem, a fim de garantir que todas as camadas sejam gravadas com a mesma espessura.

Figura 22 - Ajuste do posicionamento vertical da mesa de trabalho.



A - (a) Escala métrica da máquina e (b) seta indicadora da posição na escala métrica e B - vista frontal do operador em relação à escala métrica com indicação da seta destacada em amarelo.

De acordo com Wang e Zen (2007) se a posição da mesa mantém-se inalterada durante a gravação das camadas, o foco na superfície da peça irá afastar-se gradualmente, resultando no aumento de tamanho do feixe, causando erros de profundidade de usinagem. Neste contexto, desenvolveu-se um dispositivo para controle do deslocamento vertical da plataforma, bem como para garantir a exatidão da altura da mesa de acordo com a lente utilizada. Por esse dispositivo foi possível determinar o passo, isto é, o deslocamento vertical da plataforma. Esta variável precisou ser definida em relação à profundidade de usinagem desejada, por meio de ensaio descrito no item 3.7.2.

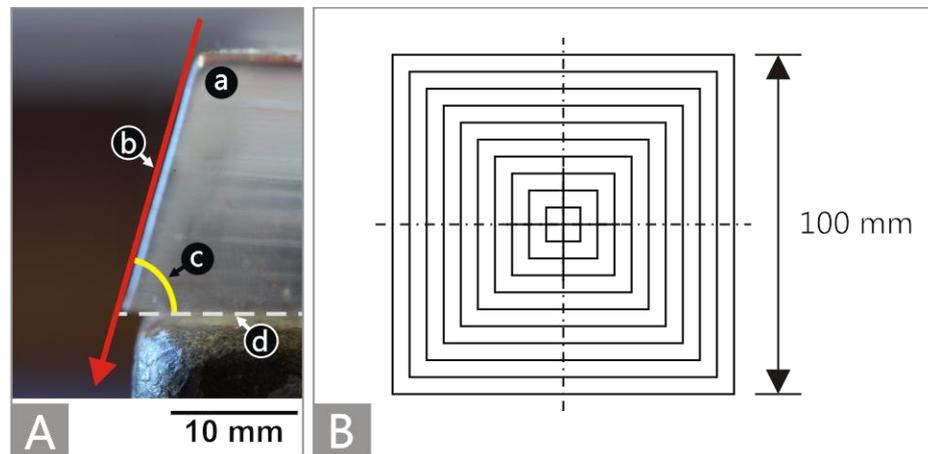
Com a implementação do ajuste eletrônico via dispositivo, a régua graduada da Mira 3007 deixou de ser utilizada. Assim, o avanço da plataforma (eixo z) foi delimitado entre os dois sensores de final do curso (superior e inferior) das guias lineares. O sensor superior é o ponto de origem para iniciar o deslocamento. O deslocamento máximo é de 391,43 mm, referente à distância entre os sensores. Quando selecionada a lente via dispositivo, a plataforma (juntamente com a mesa

trabalho) eleva-se até o sensor superior e desce até o posicionamento definido como correto para a lente pré-selecionada.

3.5 Determinação dos ângulos de varredura do feixe de laser

A máquina Mira 3007 possui dois espelhos internos rotacionados (eixos x e y) por motores galvos para guiar o laser emitido até a lente focalizadora. Devido ao movimento é gerada uma inclinação na varredura do feixe (Figura 23A). Assim, em cada linha de varredura é formado um ângulo. Desse modo, buscou-se por meio de ensaio determinar os ângulos gerados dentro da área máxima de trabalho com a amostra centralizada. Esta área máxima refere-se ao campo focal da lente em uso, no caso, para lente de 100 mm.

Figura 23 - Estudo da angulação da varredura do feixe de laser.



A - (a) lateral da amostra analisada, (b) plano de inclinação do feixe de laser, (c) o ângulo de incidência projetado (ângulo γ), (d) plano de referência (mesa de trabalho) e B - Desenho aplicado para ensaio, vista superior do plano de corte.

Para o ensaio, dez amostras quadrangulares foram cortadas conforme o desenho da Figura 23B. A partir da medida máxima de 100 mm e reduziu-se 2,5 mm de cada lado, gradualmente, até a medida de 10 mm. Os ângulos obtidos em cada amostra foram analisados e determinados com auxílio de uma lupa estereoscópica e programa para edição de imagens. Com o resultado obtido, visou-se auxiliar na

elaboração de diretrizes para estratégias de usinagem 3D considerando as distâncias de centro da área máxima de trabalho possibilitando medir a altura máxima do artefato a ser usinado de acordo com o ângulo.

3.6 Determinação do ponto focal de acordo com espessura do substrato

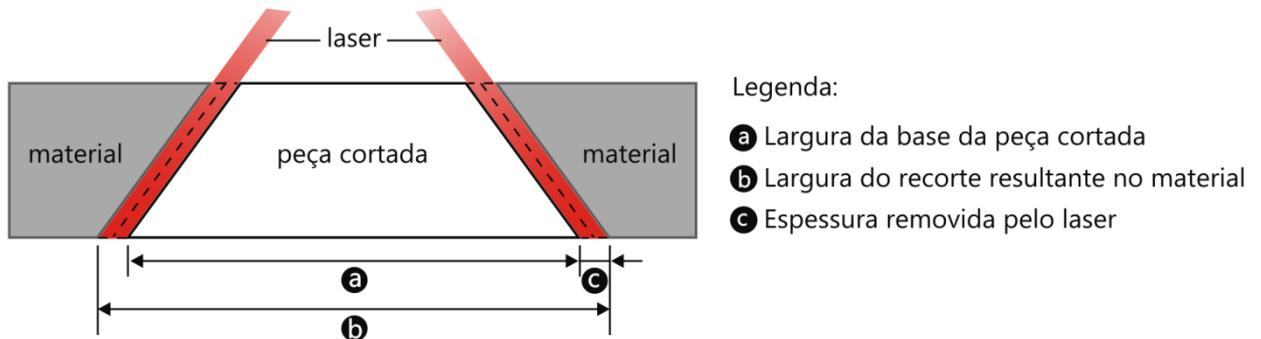
O ponto focal é definido como a região de menor diâmetro do feixe de laser. Nesse sentido, nesta etapa, buscou-se definir a altura da mesa de trabalho com melhor foco para processamento com uma lente de 100 mm considerando a espessura do material processado. Desse modo, a partir de ensaio para verificação de medidas nas amostras cortadas estabeleceu-se este posicionamento. Com o valor encontrado, o deslocamento da mesa (eixo z) pode ser automatizado por meio do dispositivo de controle de deslocamento.

Neste ensaio, 30 amostras de 2 mm de espessura foram cortadas com medida de 10 x 10 mm. Em cada uma, gravou-se o número referente à altura da mesa no momento do processo para identificação, bem como para análise visual do traçado. Os ensaios iniciaram em 70 (altura definida entre os dois sensores de final do curso da plataforma) e foi realizado até 100 mm. Definiu-se o passo (deslocamento vertical da mesa via dispositivo) da máquina em 1 mm, assim, a mesa de trabalho desceu 1 mm a cada altura ensaiada. No processo, as velocidades aplicadas foram de 1 m/min para corte da chapa e de 35 m/min para gravação, ambas com potência máxima.

As medidas verificadas foram a largura da peça cortada (a) e a largura do recorte resultante da chapa (b), sendo que a diferença entre essas larguras indicou a espessura removida pelo laser (c), conforme a Figura 24. Cada amostra cortada foi medida sempre na mesma posição, bem como seu recorte na placa, utilizando paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Definiu-se como melhor foco a posição na qual foi obtida a menor espessura de material removido. Paralelamente,

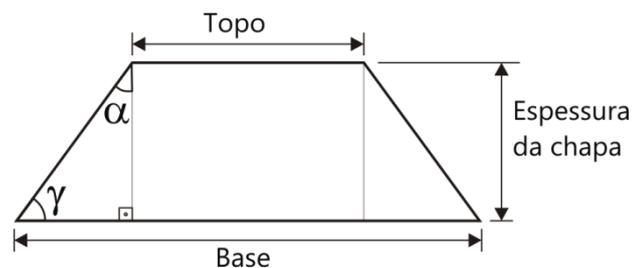
foi avaliada a qualidade visual da gravação nas amostras com auxílio de uma lupa estereoscópica.

Figura 24 - Imagem ilustrativa do corte a laser e as medidas verificadas no ensaio.



Em teoria a posição com melhor foco deveria resultar em uma amostra com a medida de 10 x 10 mm no topo (ainda a descontar a espessura de material removido pelo laser, conforme a Figura 24). Porém, considerando o efeito da angulação do feixe (α , a ser determinado nos ensaios de ângulo de varredura, item 3.5) e a espessura da chapa de 2 mm, a medida da base seria maior, conforme observa-se na Figura 25.

Figura 25 - Imagem ilustrativa da angulação gerada na amostra pelo corte a laser.



A partir da Figura 25, foi possível deduzir a Equação 1 para calcular o tamanho da base em função da medida pré-estabelecida do topo da peça. Cabe destacar que o ângulo γ é definido como $90^\circ - \alpha$. Com esta equação foi possível obter medidas com melhor exatidão.

$$Base = Topo + 2 \frac{Espessura}{\tan(\gamma)} \quad \text{Equação 1}$$

3.7 Determinação de parâmetros para usinagem 3D laser

A gravação a laser é caracterizada pela remoção controlada de uma fração de material de substrato por meio da absorção de energia. Neste estudo tornou-se importante analisar a profundidade de usinagem na peça visando compreender a relação com as variáveis do equipamento, tais como a velocidade de movimentação do feixe (m/min) e o preenchimento (espaçamento entre linhas (mm) da varredura). As variáveis mencionadas influenciam diretamente na exatidão da espessura das camadas sobrepostas, bem como, a potência do feixe de laser (W), mas esta se manteve constante para facilitar a medição dos resultados.

Deve-se ressaltar outra variável importante no desenvolvimento deste estudo, o passo da máquina via dispositivo de controle de deslocamento vertical da mesa de trabalho. O passo deve ser definido para ajustar o foco da lente de acordo com o valor requerido para remoção de material do substrato, originando a profundidade de usinagem e conseqüentemente a altura da camada. Desse modo, o passo vertical da máquina (igual à profundidade de usinagem) foi estabelecido de acordo com ensaio do item 3.7.2.

Nos ensaios, para o preenchimento da área a ser usinada optou-se pelo modo vetorial por meio do *software* gráfico Laser Draw[®]. A ferramenta de preenchimento calcula automaticamente uma série de vetores paralelos que formam o preenchimento da figura podendo ser aplicado a qualquer objeto do sistema, exceto imagens do tipo *raster*. É possível designar cores para o contorno e seu preenchimento. Têm-se disponíveis oito cores que identificam os objetos vetoriais na figura para configuração distinta a cada um. Por este comando determinam-se os valores para velocidade e potência de cada cor.

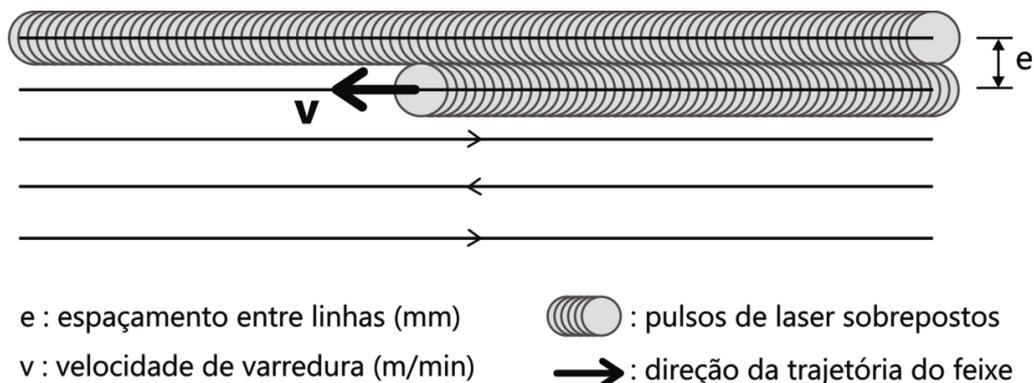
O Quadro 2 mostra os parâmetros que foram ajustados neste estudo por meio do comando "Propriedades de Preenchimento" do *software* gráfico da máquina.

Quadro 2 - Propriedades de preenchimento que podem ser editadas.

Descrição	
Preenchimento	Serve para adicionar ou remover o preenchimento da figura.
Ângulo	Define-se o ângulo de inclinação dos vetores que formam o preenchimento, podendo variar de 0° a 360°.
Espaçamento	Define-se a distância em milímetros entre os vetores (linhas) do preenchimento. Inicia em 0,1 e finaliza em 0,01 mm.

Os ângulos 0° e 90° estabelecem uma varredura com linhas paralelas, equidistantes e sem inclinação. Os demais ângulos produzem um varrimento em que o feixe remove o material de forma angular (com inclinação) exigindo a movimentação dos dois espelhos (eixos x e y). Nos ensaios, definiu-se o preenchimento vetorial da figura com linhas equidistantes com ângulo de 0°, de modo a utilizar apenas um dos dois espelhos galvanométricos do sistema óptico da máquina, bem como para restringir essa variável de angulação.

A Figura 26 mostra esquema ilustrativo do preenchimento vetorial via *software* conforme a trajetória do feixe sobre a superfície da amostra ensaiada. Assim, buscou-se analisar e estabelecer os melhores parâmetros para a usinagem 3D a laser a partir dos ensaios descritos nos itens seguintes.

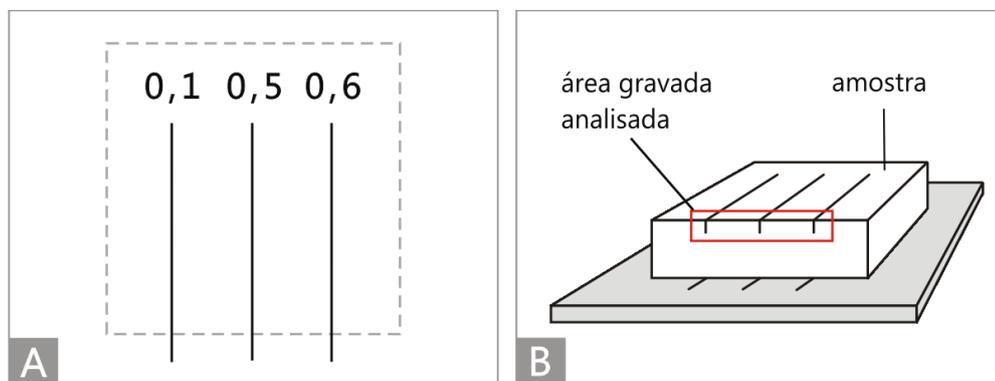
Figura 26 - Trajetória do laser realizada no preenchimento vetorial.

3.7.1 Ensaio de verificação da largura e profundidade

No estudo da largura e profundidade do traçado do feixe utilizaram-se amostras quadrangulares de 20 x 20 mm com espessura de 5,5 mm. Com a mesa de trabalho imóvel, nas amostras foram gravadas três linhas paralelas equidistantes (Figura 27A) que iniciaram sobre o corpo-de-prova e terminaram foram dele (Figura 27B), permitindo a visualização da secção transversal de cada traçado.

As velocidades aplicadas foram as seguintes: 0,1; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1 m/min. A partir de 1 m/min, a velocidade foi variada de 5 em 5 m/min até atingir 100 m/min. A largura e a profundidade foram medidas por meio de imagens obtidas na lupa estereoscópica e posterior processamento no programa AnalySIS Starter[®]. Este programa estima as larguras e profundidades das gravações utilizando a razão entre o número de *pixels* por unidade métrica nas imagens.

Figura 27 - Ensaio para verificar a largura e profundidade do traçado de laser.



A - Ensaio elaborado, onde os números indicam as velocidades aplicadas nas linhas verticais correspondentes a serem gravadas na amostra (linha tracejada). B - desenho ilustrativo do resultado da gravação e área analisada (em vermelho). Fonte: (B) Adaptado de CIDADE (2012).

3.7.2 Ensaio de determinação da profundidade e qualidade superficial

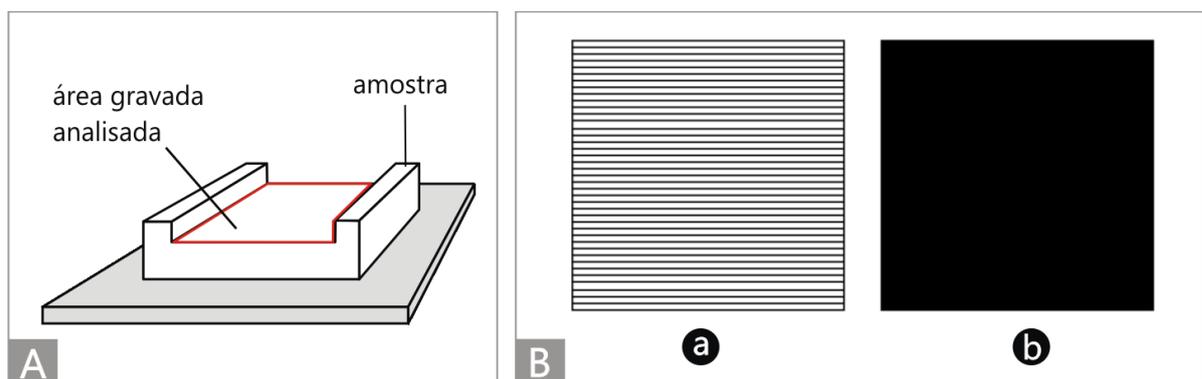
Nesta etapa utilizou-se o preenchimento vetorial via *software* gráfico nativo da máquina Mira 3007, o Laser Draw[®], e analisou-se o espaçamento entre linhas em função da velocidade aplicada. Inicialmente, foi definido o valor esperado da profundidade de cada camada, optou-se pela remoção de 0,5 mm de material em

amostra quadrangular (30 x 30 mm) com espessura de 5,5 mm. Desse modo, as amostras foram gravadas com a mesa de trabalho imóvel e distância focal ajustada para a espessura do substrato. Aquelas que atingiram a medida (exata ou aproximadamente) da profundidade proposta com qualidade visual e tátil (percepção de superfície homogênea a vista desarmada e ao toque da ponta dos dedos) foram selecionadas para o ensaio preliminar.

O ensaio elaborado analisou os seguintes espaçamentos: 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02 e 0,01 mm. Em testes anteriores observou-se que nas amostras gravadas com velocidades inferiores a 5 m/min a profundidade obtida foi superior a 0,5 mm. Assim, a velocidade inicial aplicada foi de 5 m/min e variou de 5 em 5 até 95 m/min. A Figura 28 mostra o esquema ilustrativo do resultado do ensaio na amostra e exemplos de espaçamentos entre linhas utilizados no preenchimento da área gravada analisada.

A profundidade gerada em cada amostra foi analisada visualmente via lupa estereoscópica e para medir sua medida utilizou-se um paquímetro digital. Com os resultados obtidos foi possível estabelecer graficamente a relação entre profundidade em função da velocidade e compreender os efeitos destas variáveis.

Figura 28 - Ensaio para obtenção da profundidade de usinagem a laser.



A - Desenho ilustrativo do resultado do ensaio, onde área gravada é delimitada por linha em vermelho e B - Desenho gravado em cada amostra com espaçamento entre linhas pré-definido via Laser Draw[®]: (a) espaçamento entre linha de 0,5 mm e (b) de 0,1 mm. A partir do preenchimento 0,1 mm, o espaçamento entre linhas torna-se extremamente reduzido gerando uma percepção de preenchimento total da área de usinagem projetada.

3.8 Ensaio de validação inicial

A fim de avaliar os parâmetros obtidos foi proposta a produção de uma pirâmide de base quadrangular usinada a laser por múltiplas camadas. Nesse sentido, a velocidade de processamento (m/min) e o valor do espaçamento entre linhas (mm) foram aplicados no preenchimento da figura de acordo com os valores determinados no ensaio do item 3.7.2. E pelo sistema de controle do deslocamento vertical da mesa de trabalho desenvolvido determinou-se o passo de 0,5 mm. O valor do passo corresponde à altura da camada usinada para remoção de 0,5 mm de material.

A confecção de cada camada foi por meio de um programa de edição de imagens. Nesta etapa optou-se pela criação de grafismo bidimensional de baixa complexidade formal e estrutural sendo formado por formas geométricas lineares. Isto se deve à facilidade de desenvolvimento, correção de eventuais erros gráficos e aplicação da técnica.

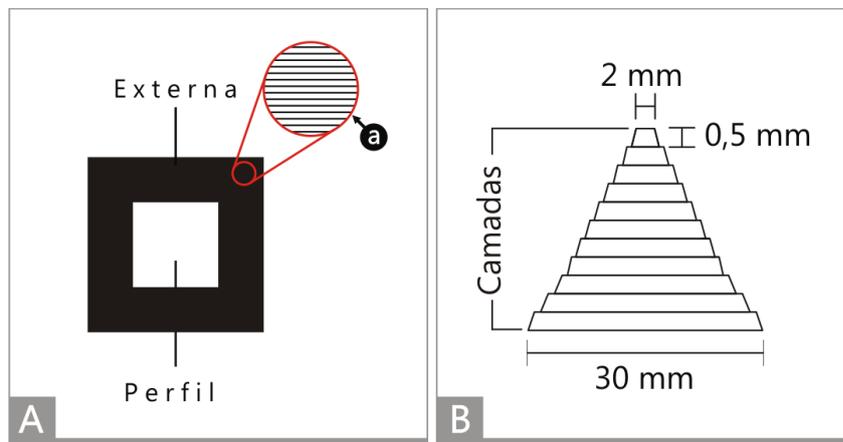
Cabe ressaltar que a figura projetada para cada camada deve apresentar basicamente duas regiões: a externa e a do perfil. A região externa é onde ocorre à remoção do material devido à passagem do laser, esta delimita a região do perfil. O preenchimento via *software* Laser Draw[®] é aplicado na região externa com o espaçamento entre linhas e velocidade, designados nos ensaios anteriores.

Na região do perfil não deve ocorrer à usinagem, desse modo, não deve receber preenchimento. Esta região formará a silhueta do artefato em cada camada. Para evitar que o perfil seja usinado, aplicou-se a ferramenta "Combinar" disponível no *software* gráfico nativo da Mira 3007, mas também existente em programas de edição de imagens. Este comando tornou possível a aplicação do preenchimento em determinada área.

A pirâmide gerada no ensaio deveria ter onze camadas, de modo que, foram preparados onze arquivos vetoriais com 5,5 mm de espessura. A Figura 29 mostra

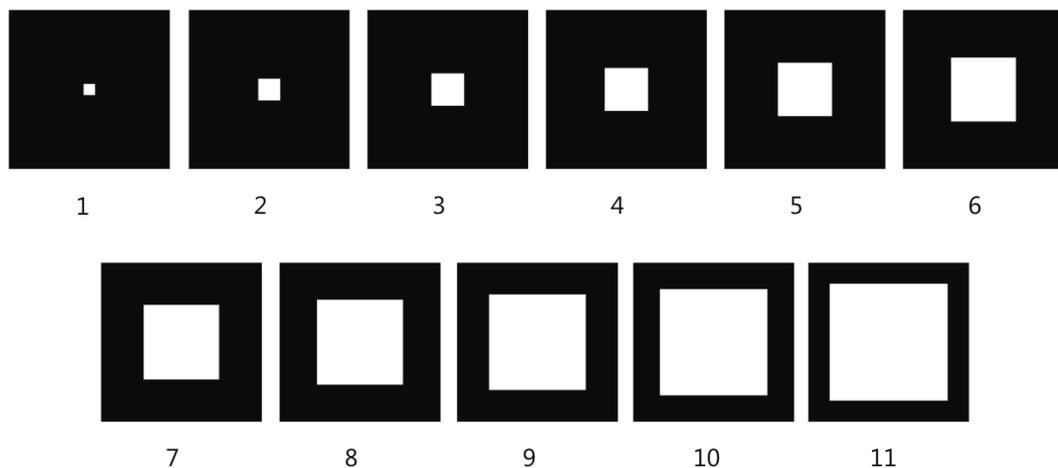
uma ilustração descritiva da figura elaborada para a camada da pirâmide e suas regiões, bem como, um modelo esperado da pirâmide usinada. Deve-se ressaltar que devido à angulação do feixe, os degraus gerados apresentaram-se levemente inclinados em cada camada, como pode ser observado na Figura 29B. A Figura 30 mostra as onze camadas da pirâmide criadas e preenchidas no *software* gráfico da máquina.

Figura 29 - Elementos dos ensaios preliminares.



A - Figura elaborada para o ensaio, onde (a) indica a ampliação (círculo vermelho) da região externa que recebe o preenchimento vetorial por linhas paralelas e equidistantes e B - modelo esperado de pirâmide no ensaio.

Figura 30 - Camadas elaboradas para o ensaio preliminar.



A numeração indica a ordem sequencial da camada no processo de gravação, em que sua seleção e troca são efetuadas manualmente no programa Laser Draw®.

No ensaio, a medida da região externa permaneceu constante, com 30 x 30 mm, e a região do perfil foi gradualmente ampliada em 2 mm proporcionalmente. Assim, o perfil iniciou medindo 2 x 2 mm, no topo, e finalizou com 22 x 22 mm, na base da pirâmide. Após a usinagem, cada pirâmide produzida foi escaneada tridimensionalmente a laser pelo equipamento Digimill 3D[®], seguindo os procedimentos detalhados por Silva (2006). Por meio da técnica de digitalização a laser foi possível medir as espessuras de cada camada.

O *scanner* Digimill 3D[®] possibilita a varredura de pontos de um objeto físico no espaço para reconstruí-lo em um ambiente digital gráfico. Em seu funcionamento, o *scanner* movimenta-se sobre a amostra, sendo orientado no plano x-y por meio do CNC, enquanto o cabeçote laser calcula a altura no eixo z. Os dados obtidos resultam em arquivos de textos, com os milhares de pontos da superfície do objeto descritos em coordenadas (x, y z). O conjunto de pontos é chamado de "nuvem de pontos" e após manipulação computacional pode gerar uma superfície tridimensional (FREITAS, 2006; SILVA, 2011).

A aquisição de dados com alta precisão depende essencialmente da lente utilizada. Desse modo, para a digitalização foi utilizada a lente de 50 mm, indicada para relevos de até 8 mm, com precisão máxima no eixo z de 0,006 mm e resolução nominal de 0,05 mm, oferecendo qualidade no detalhamento superficial. A qualidade da digitalização 3D a laser depende de alguns fatores, como a opacidade e a cor da superfície a ser escaneada. O PMMA, por ser um material transparente, necessitou de recobrimento superficial (branco) para evitar inviabilidade ao processo devido sua refração e reflexão especular. Dessa forma, as peças foram recobertas com revelador não aquoso da marca Metal-Chek D70, sendo este um produto disponível em aerossol que ao secar torna-se um fino pó branco e opaco de fácil remoção.

Para medição das espessuras, os dados obtidos (nuvem de pontos) foram processados no *software* Geomagic Studio[®] para filtragem de pontos (remoção de excesso pontos) e geração da malha de triângulos (fechamento de superfície entre os

pontos). A malha gerada possibilitou a análise de dados topográficos das superfícies das pirâmides e a verificação de medidas entre as camadas sobrepostas. Neste *software*, o modelo digital da pirâmide foi seccionado por planos horizontais orientados paralelamente a cada degrau da peça. Assim, foi possível medir a distância entre os dois planos e obter a altura de cada camada. Os dados obtidos foram compilados em planilhas e, a partir destas, geraram-se as médias entre as medidas das camadas de cada pirâmide.

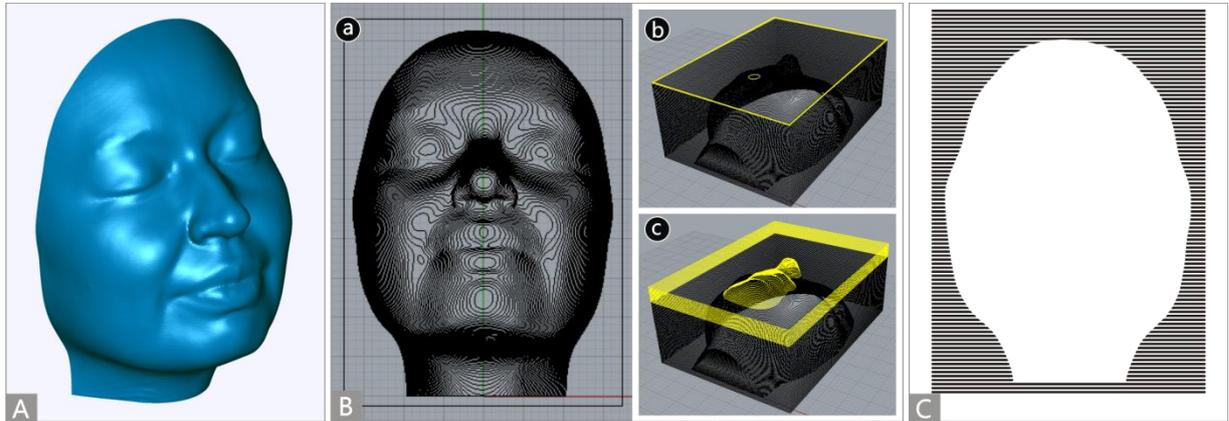
Um efeito inerente ao processo de construção em camadas é o efeito degrau ou escada, que relaciona-se com a inclinação das superfícies em relação ao eixo de construção (eixo z) (VOLPATO, et al., 2007). Este efeito pode ser minimizado pela redução da espessura da camada. Desse modo, de posse dos resultados do ensaio de profundidade, buscou-se definir os parâmetros referentes à usinagem de um artefato com camadas de 0,2 mm. Essa altura de camada foi determinada por ser possível de realizar um ensaio manualmente, bem como por ser compatível com as impressoras 3D utilizadas em *fab labs*.

3.9 Modelo 3D final para validação do processo

Para validar o método desenvolvido neste trabalho foi criado um modelo 3D com um formato de maior complexidade formal, sendo a região do perfil composta por curvas que descreveram silhuetas diversas. Assim, a usinagem 3D pela técnica de gravação a laser por múltiplas camadas foi realizada a partir de um modelo digitalizado tridimensionalmente, no caso, uma face humana (rosto e porção do pescoço). O equipamento utilizado foi o Artec Eva, um *scanner* 3D portátil, que possui um sistema de digitalização com o autoposicionamento das nuvens de pontos obtidas em tempo real. Dessa forma, permite o escaneamento em apenas uma etapa, nas quais os dados obtidos para geração da malha são processados diretamente no *software* específico, Artec Studio[®]. A malha do rosto foi ajustada no *software* Geomagic Studio[®] gerando, assim, o modelo virtual 3D (Figura 31A) que

posteriormente foi fatiado no *software* Rhinoceros® (Figura 31B). Para o fatiamento, criou-se uma caixa em torno da peça para delimitar a camada gerando, assim, a região externa para receber o preenchimento (Figura 31C).

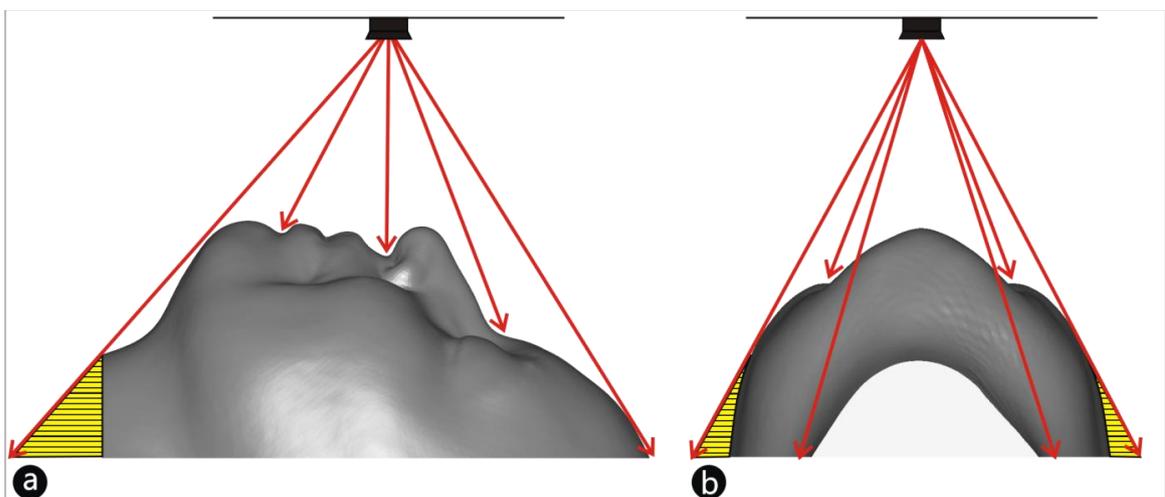
Figura 31 - Resultado de digitalização 3D da face e fatiamento.



A - Malha tridimensional da face e B - (a) fatiamento horizontal do rosto formado por curvas equidistantes (verticalmente) que formam cada camada, (b) seleção de apenas uma camada e (c) seleção de diversas camadas. C - esquema ilustrativo da varredura do laser de uma camada.

A manipulação computacional permitiu ajustes, como, por exemplo, a rotação da peça visando auxiliar a incidência do laser. Com a inclinação, as áreas em que o feixe não alcançaria, bem como aquelas que excederiam o ângulo máximo de trabalho, foram ajustadas conforme a Figura 32.

Figura 32 - Incidência do laser em peça com inclinação corrigida.



Esquema ilustrativo onde (a) indica a vista lateral e (b) indica a vista da base da peça. As setas indicam a incidência do laser e as áreas hachuradas (em amarelo) indicam regiões de sombra onde o laser não alcança.

As regiões com paredes próximas a 90°, nas laterais do rosto, ficaram inalcançáveis pelo laser, conforme observa-se na Figura 32b. Ainda assim, visto que tais regiões afetam apenas as extremidades do modelo, este foi utilizado também para avaliar o erro gerado em função do ângulo de incidência do laser.

Após o fatiamento cada camada foi exportada no formato de arquivo vetorial, no caso, na extensão .ai (Arquivo do Adobe Illustrator). As camadas exportadas foram ajustadas em programa de edição de imagens, no qual por meio da ferramenta gráfica "combinar" foram unidas todas as linhas da camada para delimitar as regiões externa e do perfil. Em seguida, cada camada foi exportada no formato de arquivo vetorial, neste caso, na extensão .plt, que é suportada pelo programa gráfico nativo da Mira 3007 (Laser Draw[®]).

Para o processamento a laser, a escala do modelo foi ajustada de acordo com a espessura do material para a utilização de chapas de PMMA de 5,5; 10 e 20 mm. Os três modelos resultantes foram fatiados em camadas de 0,2 mm. Para o desbaste controlado nessa espessura, foram utilizados os parâmetros obtidos nos ensaios anteriores, referentes à velocidade de processamento (m/mim) e ao preenchimento das camadas (mm).

3.10 Análise Dimensional

Foi realizada uma análise dimensional entre os três protótipos produzidos (que foram digitalizados em 3D) e os respectivos modelos virtuais (que deram origem às camadas para usinagem). Para tanto, utilizou-se o *software* Geomatic Qualify[®] que aponta os níveis dos erros dimensionais a partir da sobreposição das malhas 3D dos modelos. Este *software* permite um cálculo comparativo entre as superfícies e estabelece a média das diferenças dimensionais e o desvio-padrão. Para finalizar, os três protótipos obtidos por usinagem a laser foram comparados a três protótipos

correspondentes obtidos por uma impressora 3D³ *desktop* FDM (*Fused Deposition Modeling* - Fabricação por deposição de material fundido). Visou-se, assim, avaliar medidas referentes ao modelo real em um processo semelhante de fabricação (por adição de camadas), em um equipamento disponível *fab labs* e laboratórios de criação e pesquisa. A impressão 3D dos modelos para comparação foi realizada na máquina 3D Cloner DH em PLA (Poli(ácido láctico)). A altura definida para cada camada foi de 0,25 mm, valor disponível no programa operacional do equipamento mais próximo ao valor que já havia sido aplicado nos modelos usinados a laser (0,2 mm). Foi utilizada a velocidade máxima de impressão de 120 mm/s.

³ Impressora 3D, termo utilizado para equipamentos de baixo custo e de uso particular (domésticos) ou por sistemas comerciais (SANTANA, 2015). A tecnologia utilizada consiste na fabricação por deposição de material fundido (FDM), também conhecida como fabricação por filamento fundido (FFF, *Fused Filament Fabrication* - Fabricação por filamento fundido), na qual um filamento de termoplástico é forçado ao longo de um bico de extrusão aquecido para construção da peça 3D em camadas (SILVA & CALDOVINO, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados quanto à aplicação das etapas para a usinagem 3D a laser, descritas no capítulo anterior. Os resultados apresentam o sistema desenvolvido para controle de deslocamento vertical da mesa de trabalho, ensaios para determinação de parâmetros para usinagem 3D a laser, bem como ensaios para obtenção de um modelo 3D.

4.1 Dispositivo de controle para deslocamento vertical da mesa de trabalho

No processamento 3D a laser é essencial que a profundidade de usinagem seja controlada. Neste sentido, buscou-se a partir do deslocamento vertical da mesa de trabalho garantir este controle. Assim, foi desenvolvido um dispositivo de controle do deslocamento no eixo z da mesa disposto acoplado externamente à máquina (Figura 33). Sua implementação não alterou as características e configurações originais da Mira 3007, pois conforme sua utilização, este pode ser ativado ou desativado. O detalhamento do dispositivo e do sistema eletrônico elaborado é apresentado no APÊNDICE A.

Figura 33 - Dispositivo de controle do deslocamento vertical da mesa de trabalho.



(a) Dispositivo em perspectiva e (b) dispositivo acoplado na Mira 3007.

A estrutura do dispositivo foi projetada e fabricada por impressão 3D composta basicamente por um caixa com tampa removível. Na base da caixa foram acoplados os botões de comando e o *display* de LED (*Light Emitting Diode*) e em seu interior ficaram dispostos todos componentes eletrônicos, tendo em uma de suas laterais uma entrada para o cabo USB, oferecendo uma opção de alimentação da placa controladora. A tampa fez o fechamento do dispositivo e nela foram fixados a placa controladora, os módulos relés e a saída do cabo de alimentação do dispositivo para máquina. O dispositivo permitiu definir um tempo de acionamento do motor de passo via placa controladora, modelo Arduino Uno⁴. Esta placa possui como vantagens o seu preço acessível e a utilização de um código aberto para programação. A alimentação do Arduino Uno pode ser feita por meio de conexão USB ou por fonte de alimentação externa (ARDUINO, 2017).

Para o funcionamento do dispositivo, duas ações tornaram-se essenciais: o reposicionamento da chave do *driver* (Switch D4) da máquina para alterar o modo de entrada (de *off* para *on*) e o ligamento do cabo de alimentação do dispositivo na máquina para controle via Arduino Uno.

A relação entre o número de passos do motor e o deslocamento vertical da mesa foi testada e confirmada por ensaio prévio. No ensaio, um determinado número de passos foi dado e, por meio de um relógio comparador verificou-se a medida. Concluiu-se, que a cada 32 passos de giro do motor a plataforma deslocou-se 0,01 mm. Este valor foi aplicado na configuração do *software* operacional da placa controladora do dispositivo. Esta placa é responsável por toda a lógica sequencial de comando, bem como, enviar sinal de controle para o *driver*, enviar informações para *display*, ler os botões de interface com o usuário e ler os sensores de final de curso.

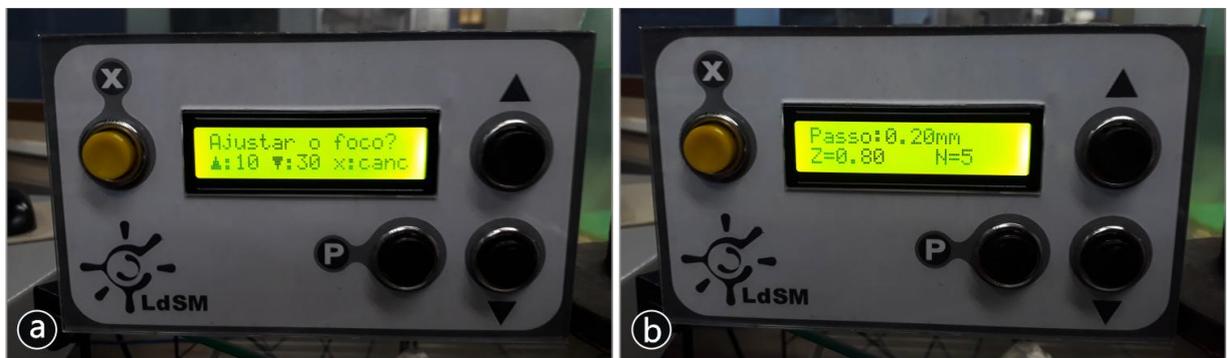
⁴ Arduino Uno é responsável por gerar a sequência de pulsos que acionam o motor recomendado, cuja placa possui seis entradas analógicas, quatorze pinos de entrada/saída digital, um cristal oscilador de 16 MHz, conexão USB, um botão de reinicialização e entrada de alimentação com conexão ICSP (ARDUINO, 2017).

O dispositivo dispõe de dois módulos relés que serviram para assegurar que a mesa de trabalho da máquina movimente-se apenas na trajetória entre seus sensores de final de curso. Os sensores estão dispostos um na parte superior e outro na parte inferior da máquina. Estabeleceu-se que cada módulo relé seria responsável por um sensor, delimitando assim a trajetória no eixo z da mesa de trabalho. O acionamento das funcionalidades definidas no *software* do Arduino Uno podem ser visualizadas no *display* do dispositivo. Todas as operações realizam-se por meio de quatro botões descritos no Quadro 3. A Figura 34 mostra exemplos de duas operações disponíveis no sistema desenvolvido para controle do deslocamento vertical da máquina.

Quadro 3 - Funcionalidades dos botões do dispositivo desenvolvido.

Botão	Função
X	Responsável pelo cancelamento de todas as opções de operação e também pelo acionamento da pré-seleção de ajuste focal conforme a lente utilizada após dois segundos de pressão.
P	Refere-se ao passo do deslocamento vertical da mesa com valor centesimal em milímetros. Possui as opções de "Passo Contínuo" e "Passo Definido". No modo "Passo Contínuo", o deslocamento vertical da mesa ocorre sem pré-definição serve para agilizar o posicionamento. Já no modo "Passo Definido" pode-se configurar o valor do deslocamento e verificar o número da camada usinada e somatório do desbaste.
▲ e ▼	São responsáveis pela elevação ou descida da mesa, no modo "Passo Contínuo", servem para definir o valor do deslocamento no modo "Passo Definido", para selecionar a lente focal com altura pré-definida, bem como ajustar a distância focal.

Figura 34 - Exemplos de operações visualizadas no *display* do dispositivo.



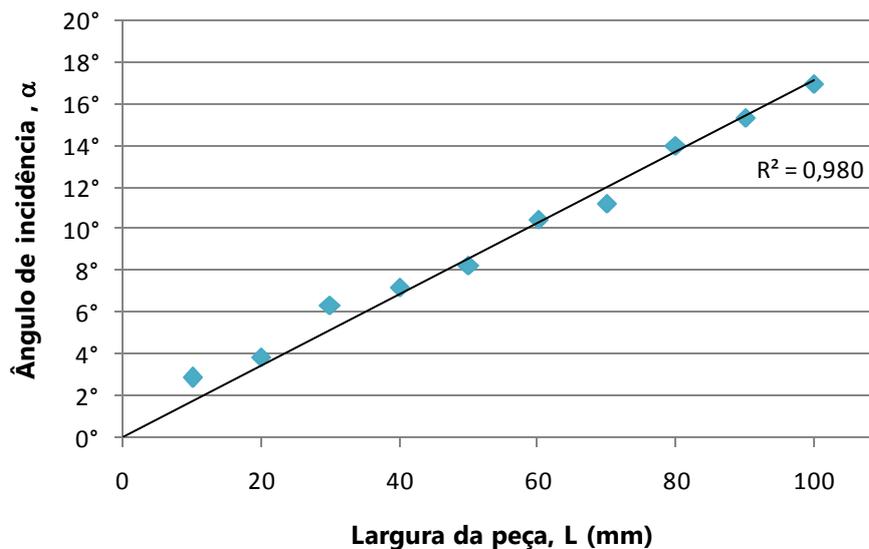
(a) indica a interface de ajuste da altura para definição do ponto focal para as lentes de 10 cm e 30 cm e (b) indica a interface de ajuste do passo (Passo Definido) aplicado na usinagem e as informações norteadoras do processo, como o somatório das espessuras desbastadas, indicada pela letra "Z" e o número da camada usinada indicada pela letra "N". Cabe ressaltar que "N" inicia a contagem em zero.

4.2 Determinação dos ângulos de varredura do feixe de laser

A partir das imagens fotográficas de alta resolução de cada uma das quatro laterais das dez amostras cortadas, foi possível medir os ângulos de incidência do feixe de laser por meio de um programa de edição de imagens, conforme apresentado na Figura 23 (página 56).

Com os ângulos determinados, foram tabuladas as médias entre os valores dos ângulos de cada amostra. A partir dos dados obtidos determinou-se graficamente a relação entre o ângulo de incidência e a largura da peça, como observado na Figura 35.

Figura 35 - Ângulo de incidência em função da largura da peça.



De acordo com o esperado, a Figura 35 mostra que os valores do ângulo de incidência aumentaram conforme aumentaram as medidas da distância do centro da mesa. Essa relação linear resultou na Equação 2 (com $R^2=0,98$)⁵, sendo " α " o ângulo

⁵ O valor R-quadrado é um coeficiente que determina a segurança da linha de tendência, ou seja, quanto mais próximo de 1 mais confiável será a equação obtida (MICROSOFT, 2016).

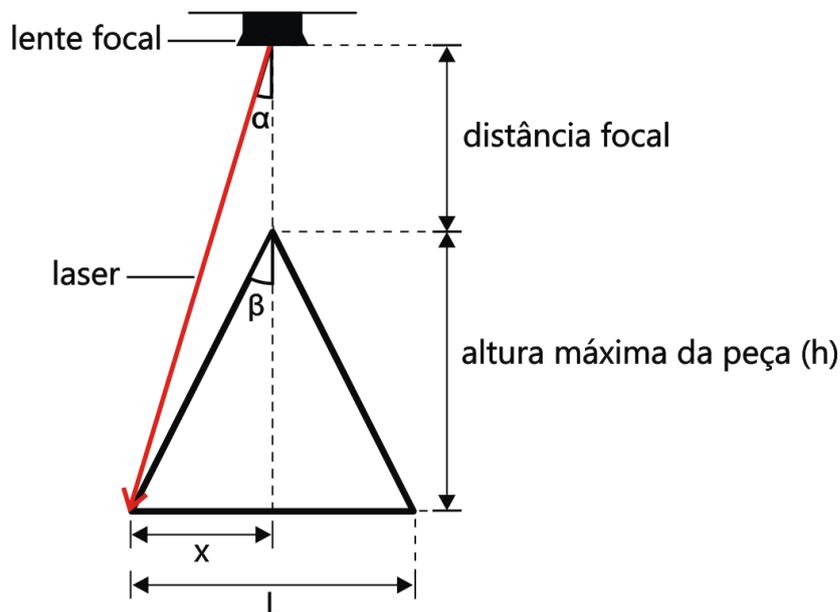
de incidência do laser e "L" a largura da peça. Com esta equação tornou-se possível determinar o ângulo limite de acordo com a largura máxima da peça a ser usinada.

$$\alpha = 0,17 L$$

Equação 2

Com os ângulos determinados tornou-se possível desenvolver uma equação para encontrar a altura máxima ($h_{\text{máx}}$) do artefato a ser usinado a partir da metade da medida da base do modelo projetado ($x=L/2$), conforme a Figura 36.

Figura 36 - Esquema ilustrativo para cálculo da altura máxima ($h_{\text{máx}}$).



Considera-se que o ângulo β precisa ser menor do que o ângulo α , ou seja, que a peça possua um ângulo menor do que o ângulo de incidência do laser. Desse modo, a tangente do ângulo β (x/h) precisa ser maior do que a tangente do ângulo α . Isso resulta na Equação 3.

Assim, delimita-se o volume de usinagem, que é representado por uma pirâmide de base quadrada (na mesa da máquina) e com vértice no centro da lente.

$$h_{\text{máx}} = \frac{L}{2 \tan(\alpha)}$$

Equação 3

Ainda é possível considerar que o ângulo de incidência do laser pode ser expresso em função da largura da peça, conforme a Equação 2, assim, substituindo-o na Equação 3, obtém-se a Equação 4.

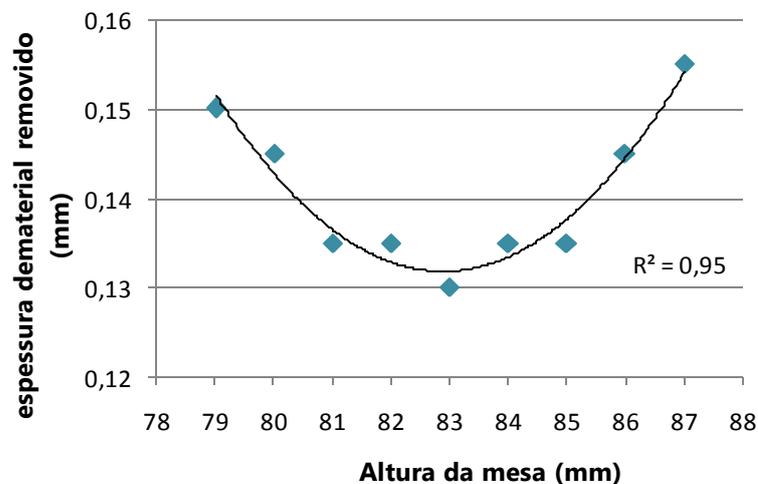
$$h_{\text{máx}} = \frac{L}{2 \tan(0,17 L)} \quad \text{Equação 4}$$

4.3 Determinação do ponto focal

Obtiveram-se como resultados, de acordo com ensaio proposto no item 3.6 que nos intervalos das alturas menores que 79 mm e maiores que 88, as amostras não foram cortadas apenas com um passe de laser, evidenciando a necessidade de ajuste focal. Desse modo, as amostras desses intervalos foram retiradas do ensaio. A menor espessura de material removido encontrada foi de 0,26 mm (sendo 0,13 mm em cada lado da amostra) na altura de 83 mm.

A Figura 37 mostra a relação entre a espessura de material removido e a altura da mesa. Na curva gerada nota-se, inicialmente, uma queda na espessura de material removido para posterior ascendência.

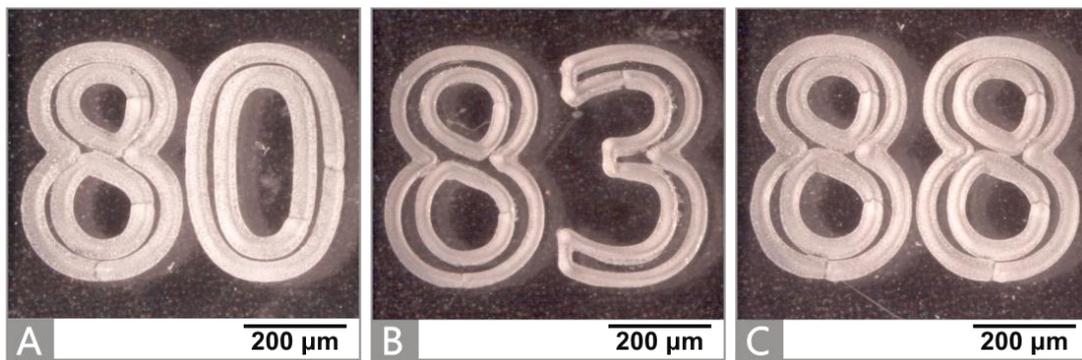
Figura 37 - Gráfico da espessura de material removido em função da altura da mesa.



Pode-se observar também o intervalo entre alturas em que foi removido menos material, no caso, entre as alturas de 81 e 85 mm indicando a região com melhor foco. A equação da curva $0,0013x^2 - 0,2168x + 9,2$ ($R^2=0,95$) pode ser derivada e igualada a zero para determinar o seu ponto de mínimo. Isso resulta na equação $0,0026x - 0,2168 = 0$, a qual resolvida para x resulta em 83,4 mm.

A análise da qualidade visual da gravação em lupa estereoscópica corroborou com os resultados das medições. O acabamento ficou melhor (linhas mais finas e texto mais legível) próximo ao foco de 83 mm, sendo as distâncias de 80 e 88 limites de qualidade inferior. A Figura 38 apresenta as imagens obtidas via lupa estereoscópica das amostras analisadas.

Figura 38 - Amostras analisadas para determinação do foco.



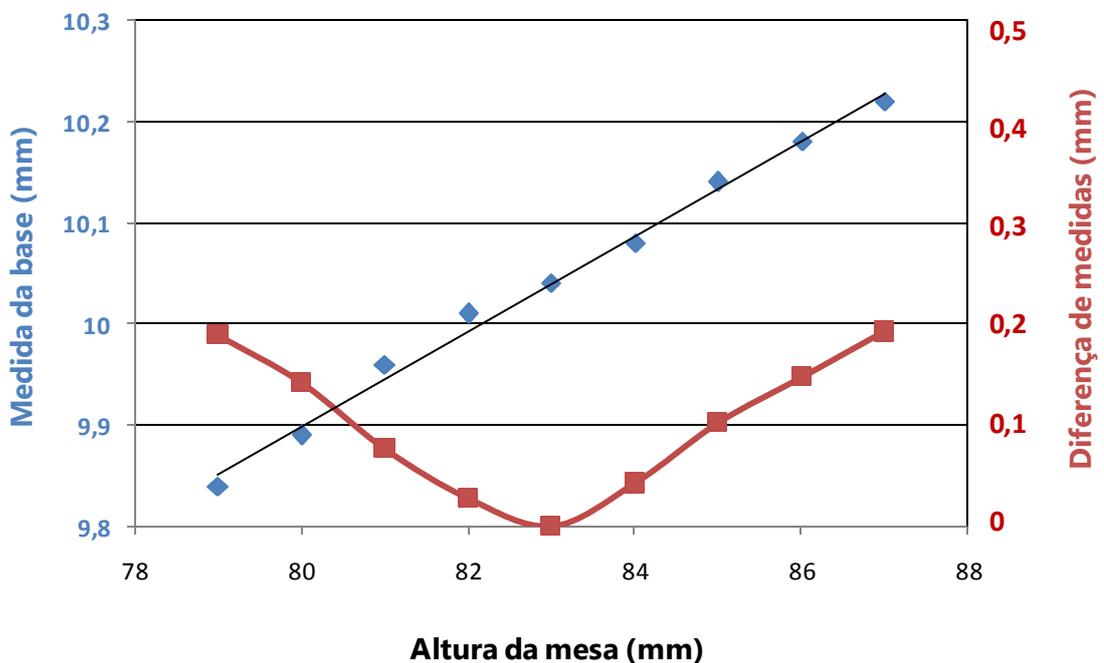
Percebe-se visualmente que os traçados do laser nas alturas 80 e 88 mm apresentaram linhas com maior espessura indicando que o laser não estava em seu ponto focal. Na altura de 83 mm este efeito foi reduzido e a qualidade visual do texto aumentou em relação a outras amostras gravadas.

A Figura 39 (em azul) mostra a medida da base da peça cortada em função da altura da mesa de trabalho. Observa-se que o aumento da medida da base é diretamente proporcional ao aumento da altura da mesa resultando em uma relação linear. Esta linearidade é decorrente da relação entre o campo focal da lente e a altura da mesa. O aumento da altura da mesa implica na ampliação do campo focal da lente gerando aumento da projeção de varredura do feixe sobre a peça de trabalho. Desse modo, o grafismo projetado tem suas dimensões ampliadas causando alterações nas medidas do corte da peça.

Conforme descrito na metodologia, esses valores foram ainda relacionados com a exatidão do corte, isso foi feito a partir da medida a ser obtida segundo cálculos. Portanto, para uma amostra com topo de 10 mm, o ângulo de incidência do laser (α) seria de 3° (conforme determinado nos ensaios do item 4.2) e isso, de acordo com a Equação 1 (página 58), resultaria em uma base de 10,21 mm. Porém, essa medida não considera a quantidade de material removido no processo, pois ao cortar o laser retira uma porção do material da peça e outra da chapa cortada (conforme exemplificado na Figura 24B, página 58).

Os valores com o cálculo corrigido de acordo com a espessura de material removido foram subtraídos dos valores medidos. A relação entre a diferença de medidas (mensurada e calculada) com a altura da mesa pode ser expressa graficamente, como visto na Figura 39 (em vermelho).

Figura 39 - Gráficos de medidas para determinação do melhor ajuste de foco.



Medida da base (em azul); e diferença entre medida mensurada e calculada (em vermelho); ambas representadas em função da altura da mesa.

Os cortes mais precisos ficaram na região de foco 83 mm. Este valor vem ao encontro dos resultados anteriores (Figura 37 e Figura 38). Considerando que a chapa

ensaiada possuía espessura de 2 mm, a altura adequada da mesa de trabalho, para lente focal de 100 mm, foi definida como **81 mm mais a espessura da chapa a ser cortada**. Visto que este trabalho utilizará gravações superficiais de pequena profundidade, esse valor foi utilizado para todos os ensaios seguintes. Cabe observar que para cortes de maior profundidade é interessante colocar o foco na metade da espessura da chapa a ser cortada, pois, assim, tem-se um melhor aproveitamento do comprimento focal.

4.4 Determinação de parâmetros para usinagem 3D laser

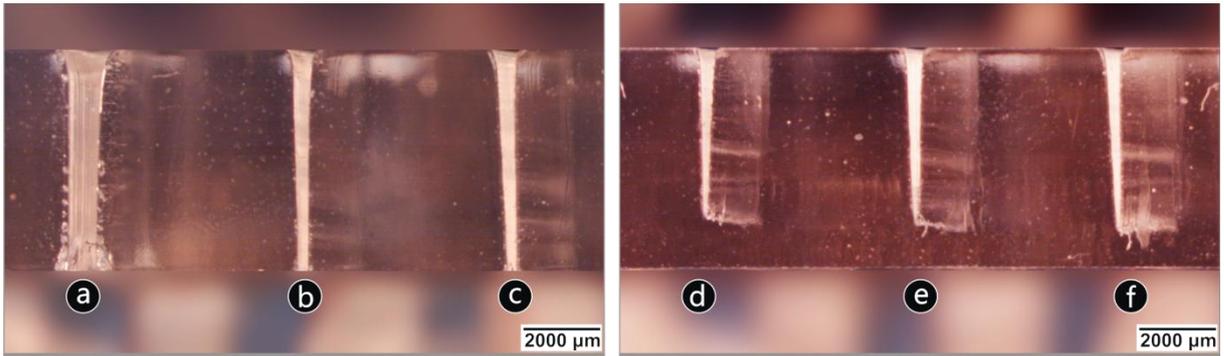
Conforme já exposto no item 3.7.2, a profundidade de gravação é uma variável de processo extremamente importante, pois influencia diretamente na exatidão da espessura das camadas sobrepostas. A relação dessa variável com a velocidade de movimentação do feixe (m/min) e o preenchimento vetorial da imagem foi analisada a fim de estabelecer os melhores parâmetros para a usinagem 3D a laser. Os resultados obtidos em cada ensaio proposto apresentam-se nos itens seguintes.

4.4.1 Ensaio de verificação da largura e profundidade do traçado

Conforme o ensaio proposto na seção 3.7.1 buscou-se verificar as medidas da largura e da profundidade do traçado do laser em função das respectivas velocidades aplicadas em cada amostra com potência máxima.

A velocidade inicial aplicada foi de 0,1 m/min, percebeu-se que até a velocidade de 0,6 m/min o traçado gravado gerou um corte passante na amostra. Desse modo, a largura do sulco foi medida a partir da velocidade de 0,7 m/min. A Figura 40 mostra exemplos de imagens obtidas via lupa estereoscópica das laterais das amostras utilizadas para análise das dimensões dos sulcos oriundos dos cortes gerados.

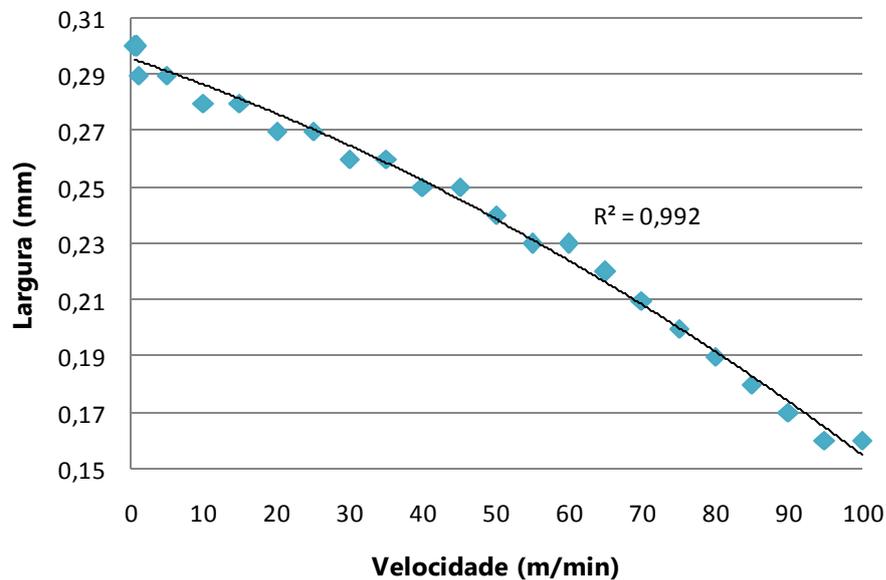
Figura 40 - Vista lateral das amostras analisadas no ensaio.



Velocidades (m/min) aplicadas: (a) 0, 1, (b) 0,5, (c) 0,6, (d) 0,7, (e) 0, 8 e (f) 0,9.

Os resultados obtidos foram compilados em planilhas e, a partir destas, foram gerados gráficos separadamente com os dados da largura e da profundidade em função da velocidade aplicada. A Figura 41 mostra a curva gerada pela relação entre a largura do traçado do laser e a velocidade de gravação.

Figura 41 - Gráfico da largura do traçado do laser em função da velocidade de gravação.

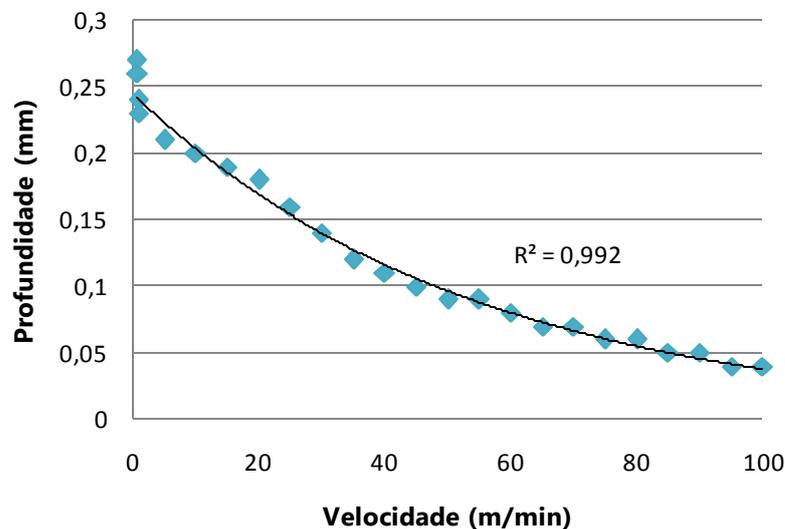


Notou-se que o aumento da velocidade gerou a redução da largura do traço do laser. Isso ocorre, pois a energia térmica gerada pela passagem do laser implica diretamente no dimensionamento do traçado resultante. Em velocidades menores, tem-se maior energia (maior tempo de aplicação sobre o PMMA) sobre o substrato, conseqüentemente, aumento da largura do traçado. Observou-se que a relação entre

essas duas variáveis foi semelhante aos resultados apresentados por Costa (2009), conforme a Figura 17 (página 45).

Assim, como na largura, as medidas da profundidade relacionam-se com a velocidade. Porém, neste caso a relação mostrou-se exponencial, conforme se observa na Figura 42. Este comportamento foi de acordo com as teorias de transferência de calor e o resultado obtido foi semelhante ao encontrado no estudo de Costa (2009), apresentados na revisão (Figura 18, na página 46).

Figura 42 - Gráfico da profundidade do traçado do laser em função da velocidade de gravação.



A partir desses resultados, buscou-se estabelecer uma relação com a profundidade gerada pelo preenchimento vetorial via *software* Laser Draw[®] por meio do ensaio apresentado no item seguinte.

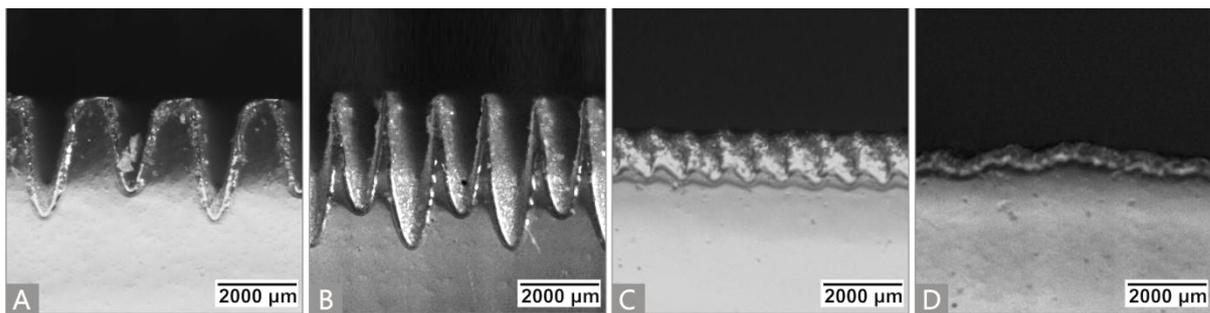
4.4.2 Ensaio de determinação da profundidade e da qualidade superficial

O controle da profundidade obtida em função do espaçamento do preenchimento vetorial utilizado nas amostras usinadas é importante, bem como a qualidade das superfícies resultantes. A partir das amostras usinadas, conforme o ensaio proposto na seção 3.7.2 foram realizadas a avaliação da qualidade superficial por meio de análise tátil e visual via lupa estereoscópica e a medição de

profundidade com auxílio de paquímetro digital. A profundidade de usinagem foi obtida pela diferença entre a espessura da amostra (5,5 mm) e a espessura resultante do material usinado.

A análise tátil e visual revelou que as superfícies das amostras usinadas nos espaçamentos entre 0,5 e 0,2 mm com velocidades inferiores a 15 m/min não apresentaram boa qualidade superficial. Em síntese, neste intervalo a superfície mostrou-se áspera devido às variações em seu formato, na qual configurou-se um aspecto serrilhado com vales e picos sobre a área usinada. Este formato é devido ao perfil gaussiano do laser, como visto na seção 2.5 (Figura 16). Com a redução do valor do espaçamento entre linhas, este efeito mostra-se menos aparente, pois os sulcos formados vão gradualmente tornando-se mais lisos decorrentes da sobreposição das linhas. O aspecto visual das superfícies mais lisas assemelha-se ao de material fundido, isto se deve à redução da energia térmica necessária para gerar a linha usinada adjacente, pois o feixe passa a sobrepor-se entre as linhas causando o efeito já exposto na seção 2.5 (página 47). A Figura 43 mostra os aspectos superficiais resultantes em quatro amostras usinadas com velocidade de 10 m/min e com diferentes espaçamentos entre linhas.

Figura 43 - Superfícies das amostras usinadas com diferentes preenchimentos.

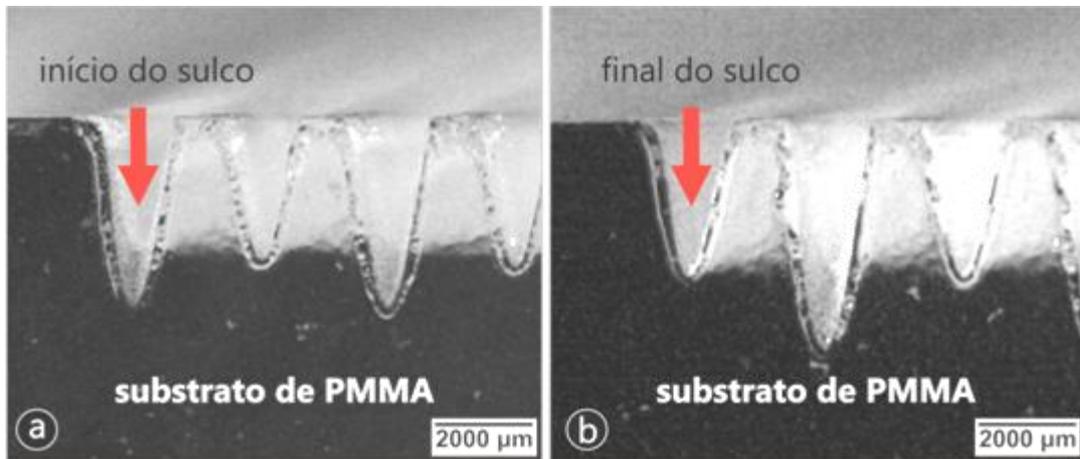


Imagens via lupa estereoscópica da vista lateral das amostras usinadas com velocidade de 10 m/min e preenchimento com espaçamento entre linhas de: A - 0,5 mm, B - 0,3 mm, C - 0,1 mm e D - 0,05 mm.

A Figura 43 revelou as diferentes profundidades entre os sulcos formados em um mesmo preenchimento. Estas diferenças foram analisadas isoladamente (via lupa estereoscópica) na amostra gravada com velocidade de 10 m/min. Assim, verificou-se

que as profundidades do início e do final de um mesmo sulco não coincidiram. As setas (em vermelho) da Figura 44 apontam a primeira linha analisada.

Figura 44 - Superfície de amostra usinada com velocidade de 10 m/min.



As setas indicam: (a) sulco gerado no início da primeira linha gravada e (b) sulco gerado ao final da primeira linha gravada, com espaçamento de 0,5 mm. A segunda imagem foi espelhada para melhor comparação com a primeira.

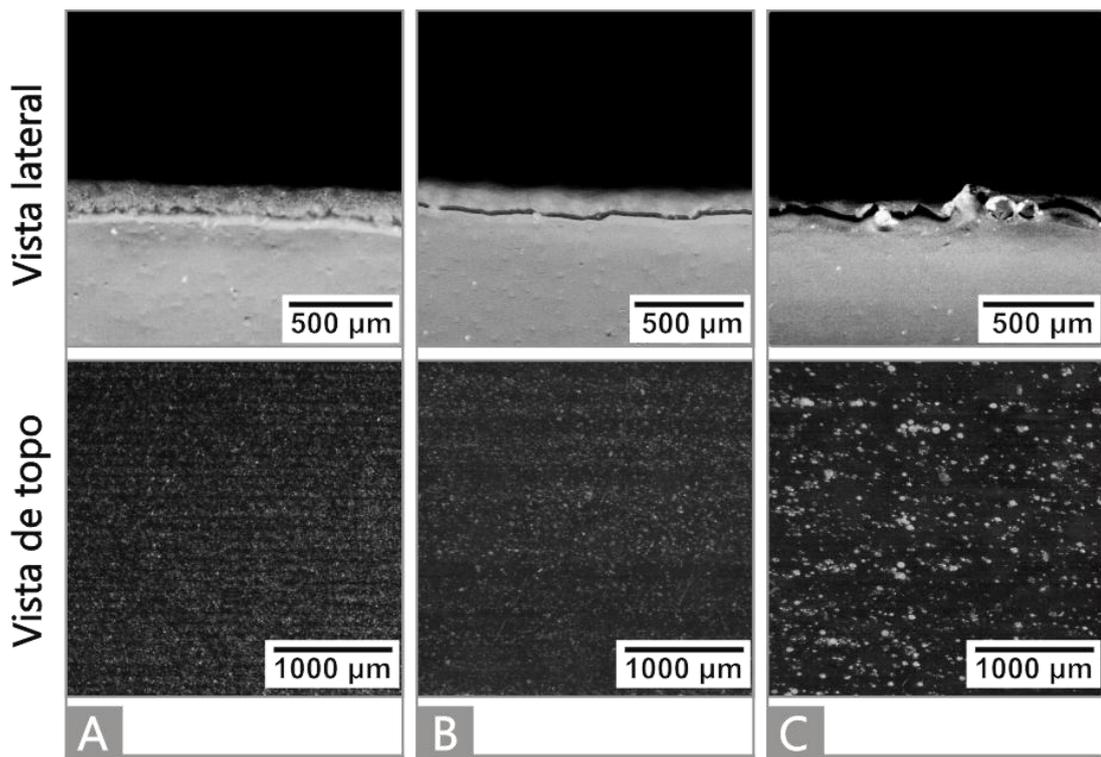
Tais diferenças de profundidade resultam da quantidade de energia recebida em cada sulco, que depende da velocidade e da potência da radiação. Portanto, a diferença entre os sulcos se deve à aceleração e desaceleração dos galvômetros dos espelhos do sistema óptico do laser. Como a varredura do laser vai a uma direção e retorna na direção oposta, os sulcos apresentaram as diferenças de profundidade de modo intercalado. Com a redução do espaçamento entre os sulcos, essa diferença tende a ser eliminada.

Com o aumento da velocidade (a partir de 15 m/min) e a redução do espaçamento entre linhas (a partir de 0,1 mm) observou-se o aumento da qualidade superficial em decorrência da redução das marcas deixadas pelos sulcos. Superfícies com aspecto transparente foram obtidas a partir da usinagem com velocidade de 20 m/min e espaçamento de 0,05 mm. Notou-se que o sistema de exaustão da máquina aspirou parte do material volatilizado, mas a parte não aspirada formou uma fina camada de pó, a qual permaneceu depositada sobre a amostra após finalização

da gravação exigindo limpeza na área usinada. A formação de pó permaneceu nas velocidades posteriores.

A Figura 45 exemplifica alguns dos resultados obtidos do ensaio proposto, em amostras gravadas com velocidade de 40 m/min e com preenchimento (espaçamento entre linhas) de 0,04, 0,02 e 0,01 mm. Visualmente, o espaçamento de 0,04 mm (Figura 45A) apresentou uma superfície extremamente lisa e transparente, considerado o melhor resultado. Entretanto, com espaçamentos menores (Figura 45B e C) as superfícies voltaram a ficar ásperas. Com o espaçamento de 0,01 mm, a qualidade superficial ficou bastante prejudicada em função da grande quantidade de energia transferida para o material.

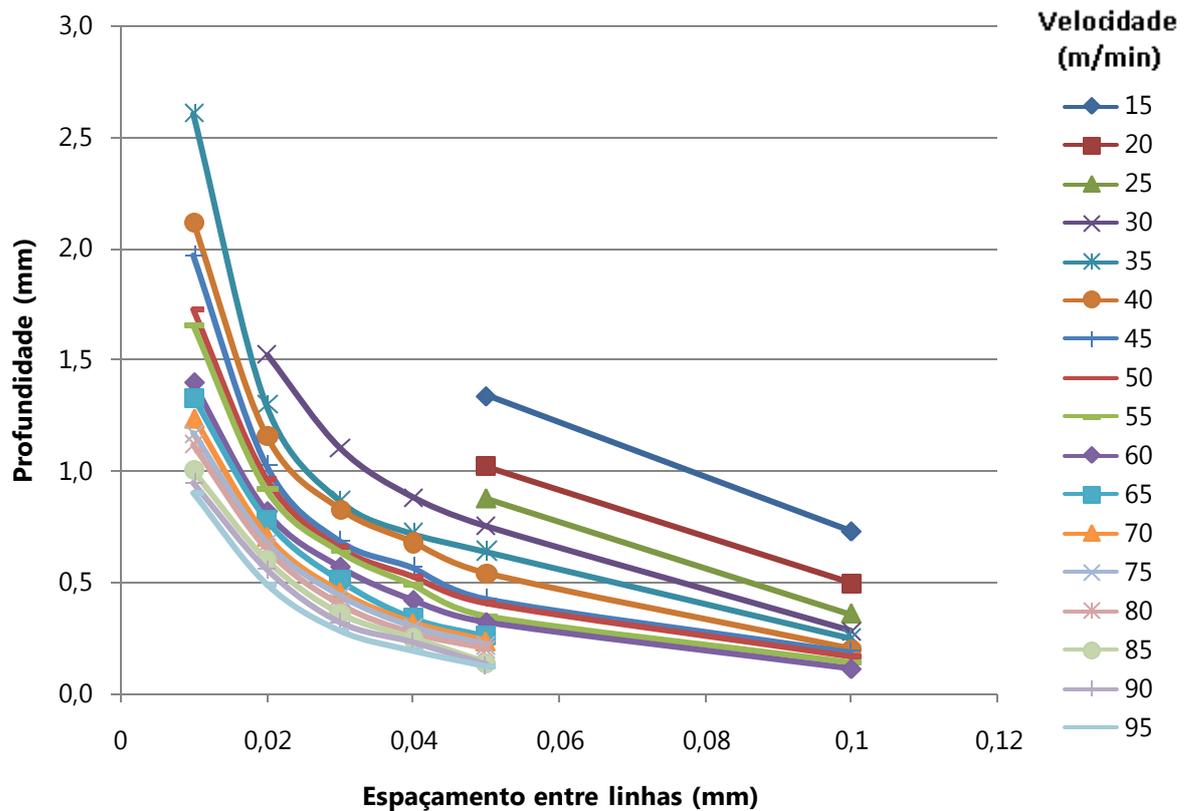
Figura 45 - Aspecto superficial das amostras usinadas com velocidade de 40 m/min.



Imagens obtidas via lupa estereoscópica: A - amostra preenchida com espaçamento entre de 0,04 mm, B - amostra preenchida com espaçamento entre de 0,02 mm e C - amostra preenchida com espaçamento entre de 0,01 mm.

Os resultados obtidos da relação entre a profundidade de usinagem e o espaçamento entre linhas aplicados, para cada velocidade analisada, foram compilados e expressos graficamente, conforme a Figura 46.

Figura 46 - Gráfico das profundidades resultantes em função do espaçamento entre linhas.



Pelo gráfico observa-se que, independente da velocidade utilizada, a profundidade de usinagem em função do espaçamento descreve uma curva com comportamento aparentemente exponencial. Como esperado, os resultados alcançados demonstraram que o aumento da velocidade implicou na redução de remoção do material, ocasionando menor profundidade de usinagem no substrato. A redução do espaçamento entre linhas ocasiona o aumento da profundidade de usinagem, o que ocorre devido ao aumento de energia transferida para o material em decorrência da sobreposição das linhas gravadas.

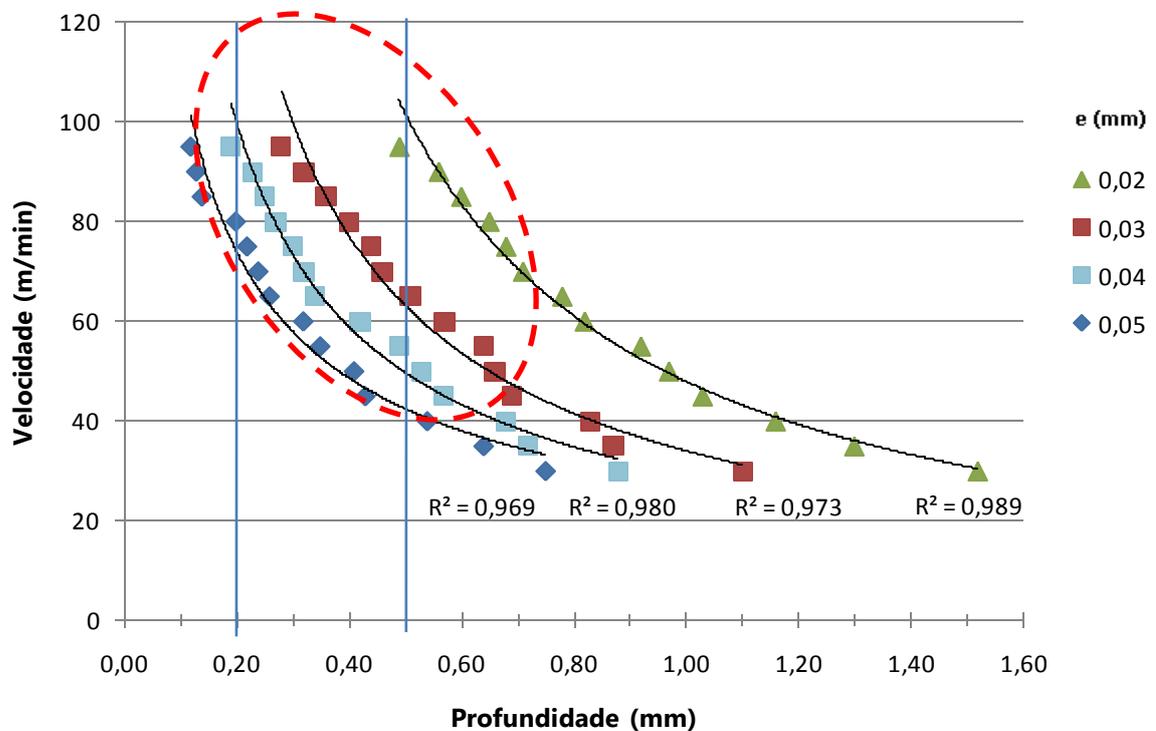
Para a realização de ensaios preliminares de usinagem em múltiplas camadas, inicialmente, foi proposta uma altura de camada (profundidade) de 0,5 mm. Valores próximos a esse foram atingidos em diferentes combinações de velocidades e preenchimentos (destacadas em azul), como visto no Tabela 1.

Tabela 1 - Profundidades (mm) obtidas nos ensaios.

Velocidade (m/min)	Espaçamento entre linhas (mm)					
	0,1	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
20	0,50	1,02	-	-	-	-
40	0,20	0,54	0,68	0,83	1,16	2,12
55	0,14	0,35	0,49	0,64	0,92	1,66
65	0,10	0,26	0,34	0,51	0,78	1,33
95	0,08	0,12	0,19	0,28	0,49	0,90

Os espaçamentos (de 0,02 a 0,05 mm) que geraram resultados com maior qualidade superficial na análise tátil e visual, bem como que atingiram profundidade próxima de 0,5 mm foram compilados em um gráfico da velocidade aplicada em função da profundidade atingida, conforme a Figura 47.

Figura 47 - Gráfico da velocidade aplicada em função da profundidade gerada para cada espaçamento entre linhas.



A área destacada indica região com os melhores acabamentos superficiais. As linhas verticais em destaque correspondem às alturas de camada (profundidades) de 0,2 e 0,5 mm.

Cabe destacar que o comportamento exponencial é o mesmo observado quando da gravação de uma única linha, conforme os ensaios iniciais (Figura 42). Porém, com a redução do espaçamento entre linhas, as curvas deslocam-se para a direita do gráfico. A área demarcada no gráfico indica a região em que as velocidades e as profundidades não apresentaram superfícies com vales e picos identificados pela percepção tátil, bem como a ausência de irregularidades ou deformações, pela análise via lupa estereoscópica. As linhas verticais (azuis) indicam as profundidades de usinagem utilizadas neste trabalho, no caso, 0,5 mm para os ensaios preliminares e 0,2 mm para os ensaios finais.

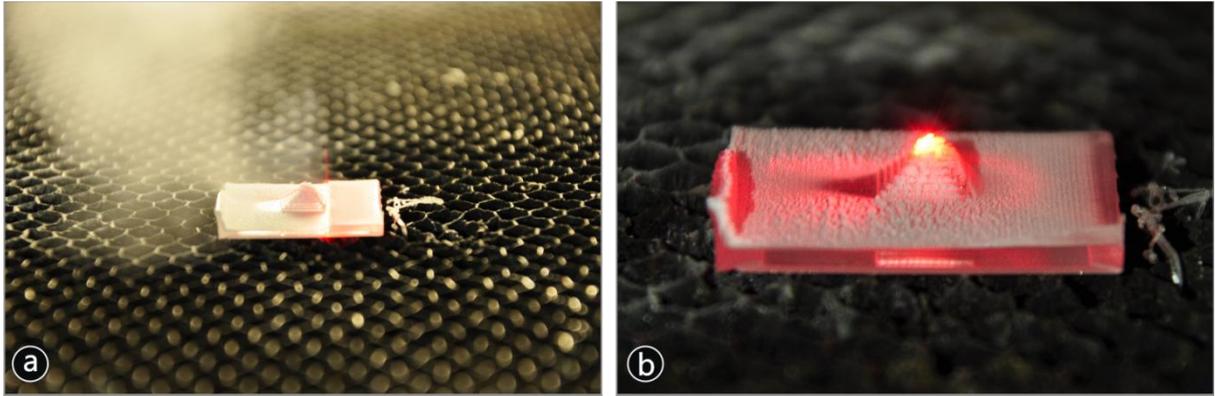
4.5 Ensaio de validação inicial

Os parâmetros referentes à velocidade e ao preenchimento, conforme apresentados na Figura 47, foram aplicados na construção de quatro pirâmides de base quadrangular, como descrito no item 3.8 da metodologia.

Inicialmente, a usinagem ocorreu com a peça centralizada na mesa de trabalho e fixada por fita dupla face de alto desempenho (modelo VHB da marca 3M[®]), para evitar a movimentação durante a varredura do laser. Após a usinagem, cada pirâmide foi analisada por meio de lupa estereoscópica, para análise visual referentes à configuração formal e acabamento superficial e por meio da técnica digitalização 3D para medir a altura média das camadas.

A exemplo do ocorrido nos ensaios de profundidade e qualidade superficial notou-se a formação de um fluxo de material removido durante a usinagem, conforme pode ser observado na Figura 48a. O sistema de exaustão da máquina não possui capacidade para coletar completamente o material ejetado, assim, ocorre o acúmulo de pó condensado sobre toda a superfície usinada, bem como sobre os degraus das pirâmides (Figura 48b).

Figura 48 - Usinagem 3D a laser com amostra centralizada.



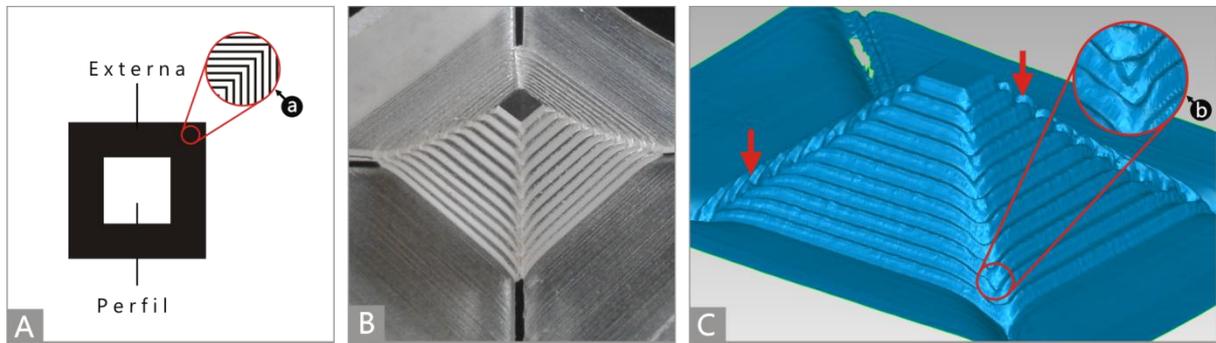
(a) fluxo de material ejetado durante a usinagem a laser e (b) parte do material ejetado aderido nos degraus da pirâmide usinada.

Outra característica observada foi que a deposição do pó ocorre sempre na mesma face oposta à direção em que a varredura é realizada. Assim, o fluxo de material evaporado choca-se contra as paredes formadas pelas camadas anteriores (degraus da pirâmide) e funde-se na superfície, prejudicando o acabamento superficial.

Notou-se que a pirâmide com velocidade de 65 m/min e espaçamento entre linhas de 0,03 mm obteve melhor resultado, mas apresentou deformações devido ao pó acumulado nos degraus. Para auxiliar na remoção do material ejetado, tentou-se utilizar um aspirador de pó (com potência de 1.300 W), mas, devido ao forte fluxo de material e à dificuldade de posicionamento da mangueira, esse procedimento não foi satisfatório. Desse modo, para avaliar a questão do pó ejetado aplicou-se uma trajetória de varredura do laser configurada de modo concêntrico (Figura 49). Com a estratégia concêntrica, obteve-se como resultado uma usinagem sem formação excessiva de pó. A pirâmide gerada analisada à vista desarmada mostrou-se uniforme e com boa qualidade superficial (Figura 49B). Posteriormente, avaliou-se também a exatidão das medidas entre as camadas com auxílio da digitalização a laser 3D. O modelo virtual 3D obtido evidenciou um aprofundamento nas arestas laterais de cada canto da pirâmide (Figura 49C). O efeito foi decorrente da desaceleração da

varredura do feixe, devido à mudança de direção em cada canto do perfil quadrangular, comprometendo, assim, a geometria da peça.

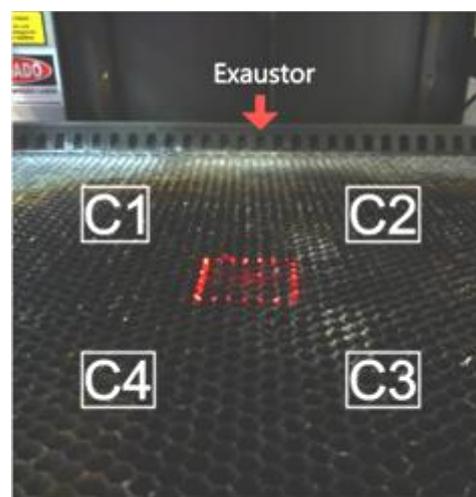
Figura 49 - Ensaio com preenchimento concêntrico.



A - (a) indica a ampliação de região que recebe o preenchimento por linhas concêntricas e equidistantes. O arquivo vetorial foi criado por ferramenta de Contorno Interativo do programa CorelDraw[®], B - a pirâmide usinada e C - modelo virtual 3D gerado onde (b) indica a ampliação de canto com deformação dos degraus e as setas indicam as deformações presentes em todas as arestas laterais.

A alternativa encontrada foi a descentralização da peça na mesa de trabalho. O *software* Laser Draw[®] possibilita o reposicionamento do desenho a ser executado na área de trabalho (em x e y), o qual é indicado por um laser visível (*red pointer*). A descentralização da peça foi limitada pela área máxima de varredura para lente de 100 mm. A Figura 50 mostra um esquema ilustrativo da disposição das peças em cada canto limite da área de trabalho (C1, C2, C3 e C4).

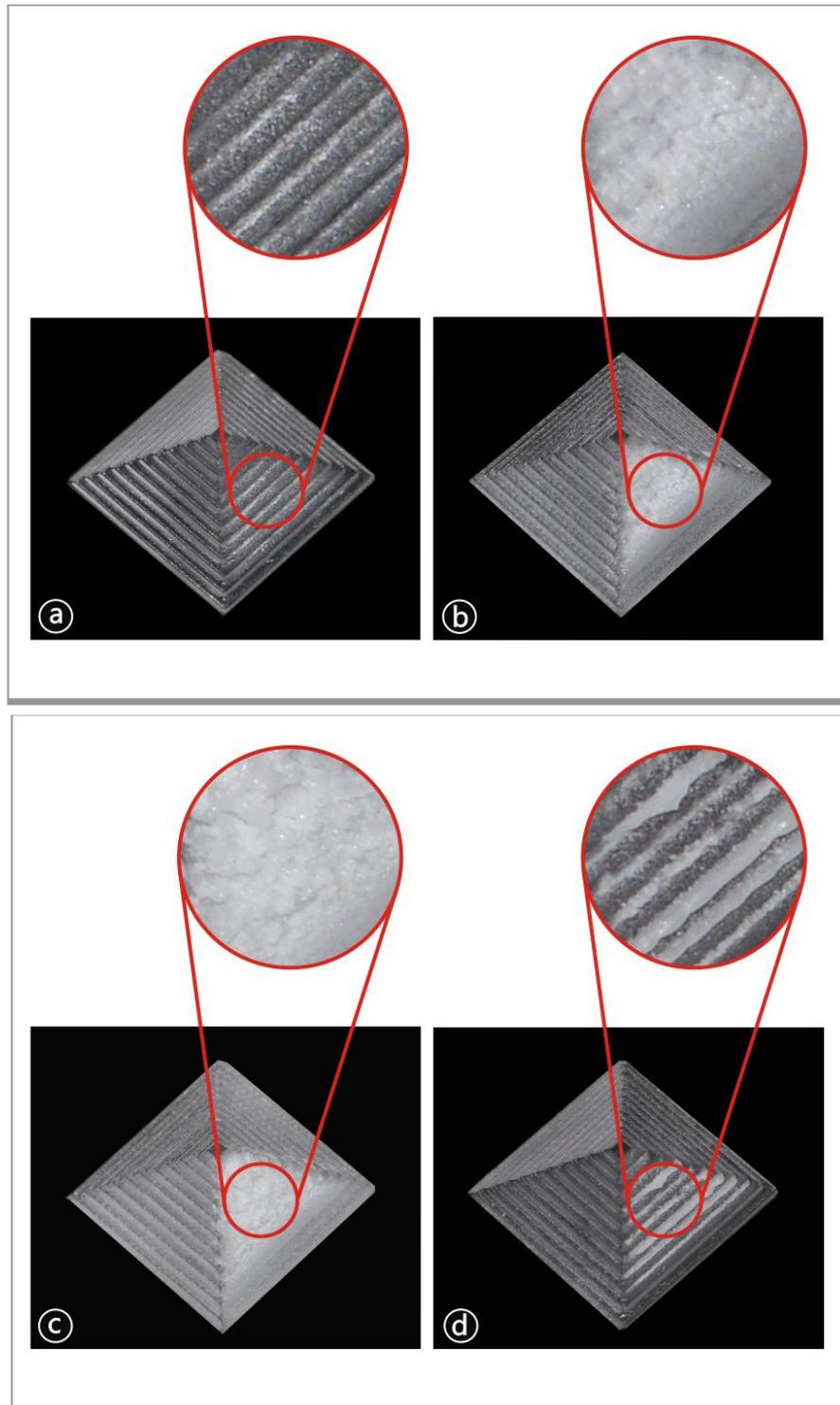
Figura 50 - Esquema ilustrativo da disposição das peças em cada canto na área de trabalho.



C1 - canto esquerdo próximo ao exaustor; C2 - canto direito próximo ao exaustor; C3 - canto direito afastado do exaustor; C4 - canto esquerdo afastado do exaustor.

Assim, em cada canto, foi efetuada uma usinagem de modo equidistante, com velocidade de 65 m/min e espaçamento entre linhas de 0,03 mm. As pirâmides obtidas em cada canto podem ser visualizadas na Figura 51.

Figura 51 - Pirâmides usinadas em cada canto da área de trabalho.

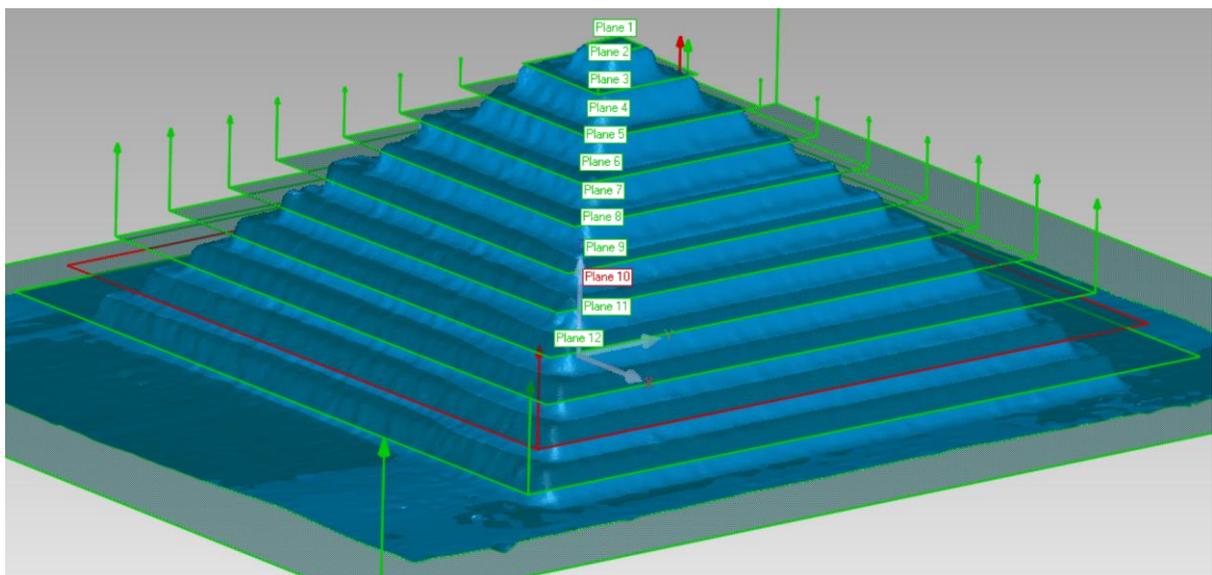


(a) ensaio no canto C1 (próximo ao exaustor); (b) ensaio no canto C4 (afastado do exaustor); (c) ensaio no canto C3 (afastado do exaustor); (d) ensaio no canto C2 (próximo ao exaustor).

A análise visual (vista desarmada) revelou que nos cantos mais distantes ao exaustor da máquina houve grandes deformações nos degraus, devido o acúmulo de pó fundido, como visto nas pirâmides indicadas em (b) e (c). Nos cantos mais próximos ao exaustor houve algumas irregularidades, especialmente na pirâmide indicada em (d), em que alguns degraus apresentaram as bordas dos degraus derretidas. Assim, a posição do canto da pirâmide usinada indicado em (a) foi definido como local para o reposicionamento das amostras do ensaio preliminar. Cabe salientar que essa é a posição mais próxima da tomada de ar do exaustor e, por isso, o material é mais bem aspirado.

Desse modo, os ensaios preliminares foram realizados com as amostras descentralizadas, com posicionamento mais próximo ao exaustor. A pirâmide produzida na usinagem com velocidade 55 m/min e espaçamento 0,04 mm apresentou melhor qualidade visual e tátil. Este modelo foi digitalizado em 3D para verificação de medidas (Figura 52). Pelo *software* Geomatic Studio[®], a pirâmide foi seccionada por planos horizontais orientados paralelamente (comando *Best Fit*) a cada degrau da peça, permitindo medir a distância entre os dois planos e obter a medida da altura de cada camada para gerar o valor médio entre elas.

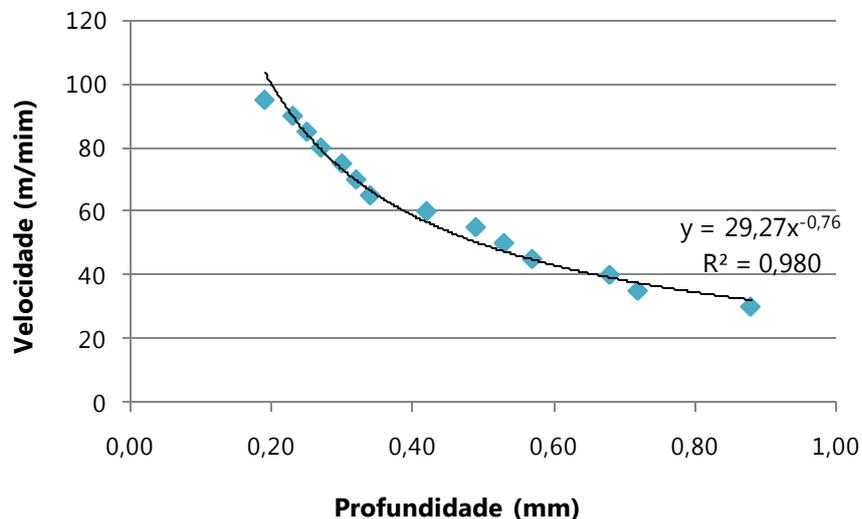
Figura 52 - Modelo virtual da pirâmide analisada.



Em verde, os planos da secção definidos sobre cada degrau. Em vermelho, a seleção de um plano.

Nessa análise, obteve-se o valor de 0,4 mm para a altura média entre as camadas. Assim, uma vez definido o espaçamento entre linhas com melhor acabamento (0,04 mm), estudou-se mais profundamente a relação entre a velocidade e a profundidade para esse preenchimento. Retomando os resultados do referido ensaio, já apresentados na Figura 47, buscou-se definir a equação da curva obtida para determinar a velocidade adequada para a remoção de 0,5 mm de material. A Figura 53 apresenta o gráfico obtido com sua respectiva equação.

Figura 53 - Gráfico da velocidade em função da profundidade (preenchimento de 0,04 mm).

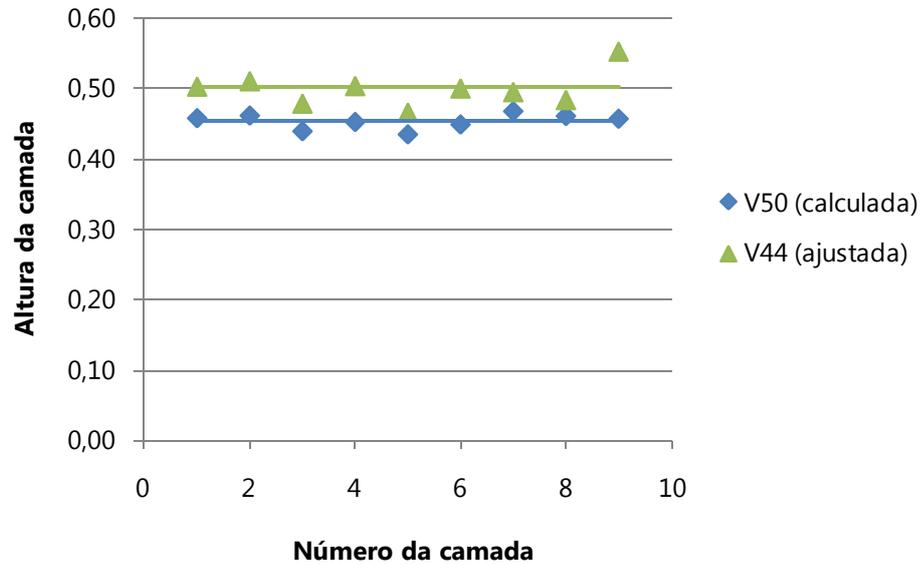


$$\text{Velocidade} = 29,27 \cdot \text{profundidade}^{-0,76}$$

Equação 5

De acordo com a equação da curva (Eq. 5) obteve-se como resultado a velocidade de 50 m/min para remoção de 0,5 mm de material. A velocidade foi ensaiada e, posteriormente, as medidas do modelo produzido foram verificadas com auxílio da digitalização 3D. O valor encontrado para média da diferença entre as alturas das camadas foi de 0,45 mm. Desse modo, novos ensaios foram realizados para obter um ajuste fino e, assim, definiu-se a velocidade de 44 m/min. A Figura 54 mostra a comparação entre as velocidades ensaiadas.

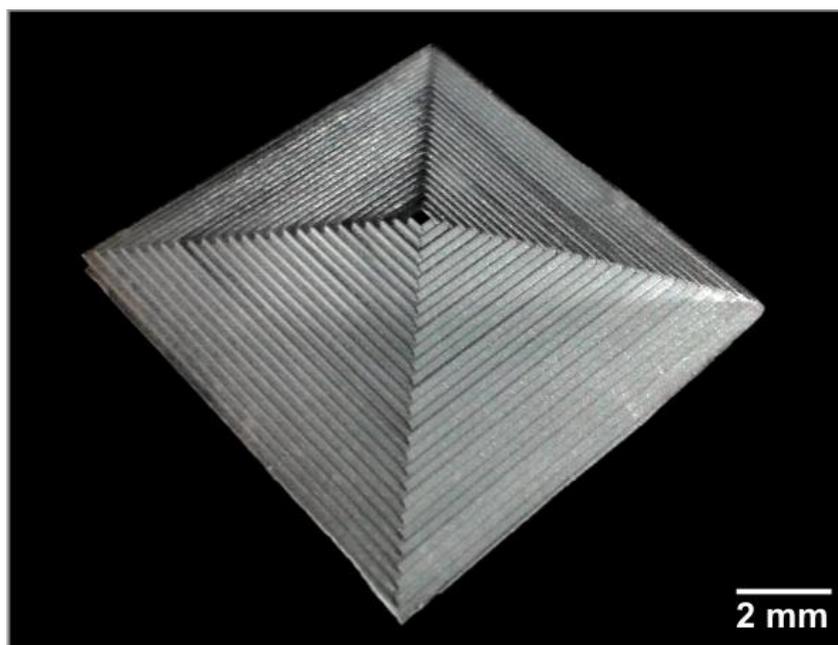
Figura 54 - Gráfico de ajuste de altura das camadas para profundidade de 0,5mm.



V50 = velocidade calculada de acordo com a equação;
 V44 = velocidade ajustada a partir de ensaios.

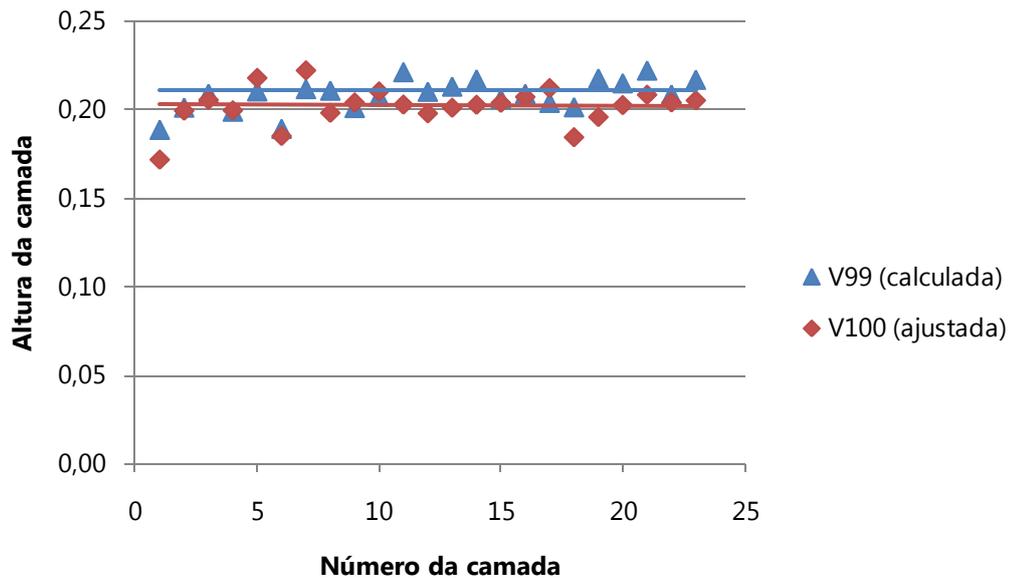
A equação da curva também foi aplicada para definir o valor da velocidade aplicada na usinagem para profundidade de 0,2 mm, destinada para o ensaio de validação. Foi utilizado o mesmo procedimento do ensaio anterior e a pirâmide gerada pode ser vista na Figura 55.

Figura 55 - Pirâmide obtida para ensaio de validação.



Assim, obteve-se como resultado a velocidade de 99 m/min. As camadas da pirâmide gerada atingiram a profundidade de 0,21 mm e, por ajuste fino, definiu-se a velocidade de 100 m/min para atingir a profundidade proposta. A comparação entre os resultados pode ser vista na Figura 56.

Figura 56 - Gráfico da altura da camada em função do número da camada para profundidade de 0,2 mm.



V99 = velocidade calculada de acordo com a equação;
V100 = velocidade ajustada a partir de ensaios.

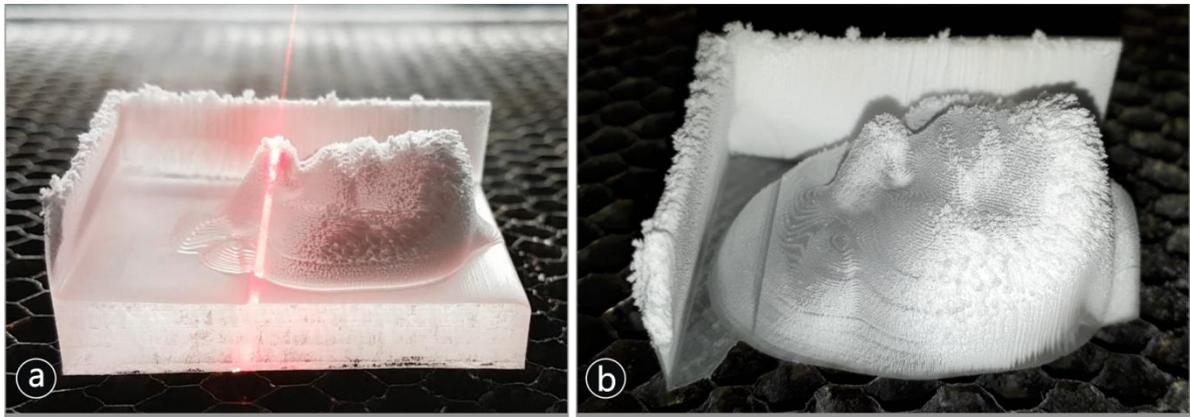
4.6 Obtenção de modelos 3D para validação do processo

Com os parâmetros definidos para a camada com profundidade de 0,2 mm, tornou-se possível desenvolver os modelos 3D finais nas amostras de 5,5, 10 e 20 mm de espessura, conforme proposto no item 3.9.

Na usinagem a laser dos rostos (Figura 57), o pó resultante da ejeção de material depositou-se na superfície usinada, mas foi possível a remoção dos resíduos da porção em que não ocorreu fusão do material. Assim, após o processamento a laser, limpou-se cada modelo gerado com uma escova e descartou-se o material

excedente da amostra. Os rostos obtidos no ensaio de validação podem ser vistos na Figura 58.

Figura 57 - Processamento a laser do rosto em substrato de 20 mm de espessura.



(a) remoção de camada pela varredura do laser e (b) o rosto obtido com deposição de pó em sua superfície, principalmente nas regiões do queixo e bochechas.

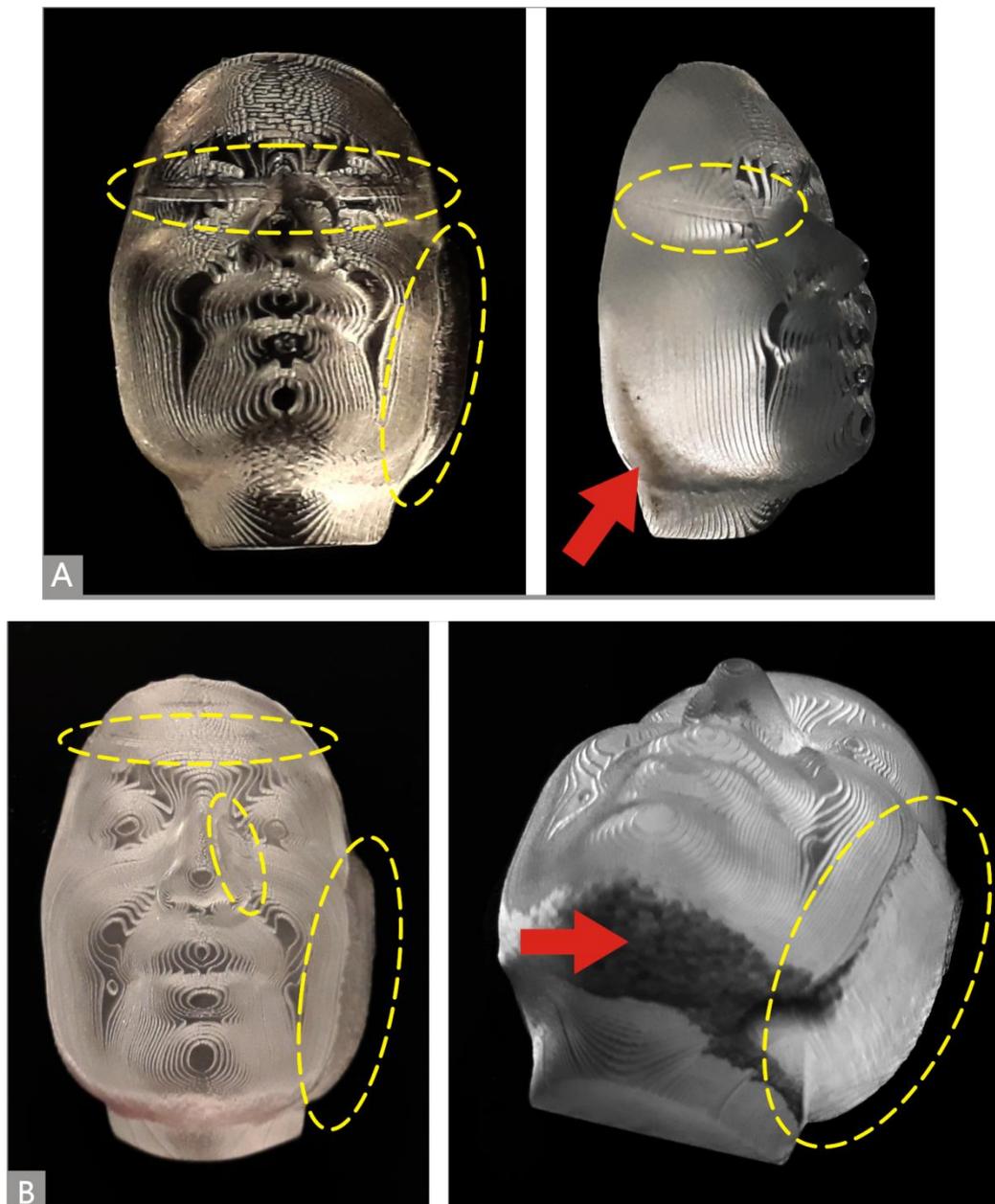
Figura 58 - Resultado do ensaio de validação do processo.



Rostos usinados com camadas de 0,2 mm de espessura, onde A - indica rosto usinado em chapa de 5,5 mm de espessura, B - indica rosto usinado em chapa de 10 mm de espessura e C - indica rosto usinado em chapa de 20 mm de espessura.

Os resultados obtidos foram semelhantes, mas notou-se que a peça com maiores dimensões, e conseqüentemente maior número de camadas, ofereceu melhor detalhamento referente ao modelo real correspondente. O número de camadas usinadas em cada modelo foi de 27 para o rosto de 5,5 mm, 50 para o rosto de 10 mm e 100 camadas para o rosto de 20 mm. Em todos os modelos, observou-se a formação de uma "crosta" de material fundido no lado esquerdo (Figura 59).

Figura 59 - Deformidades dos rostos usinados a laser.



A - Rosto usinado em substrato de 10 mm de espessura e B - rosto usinado em substrato de 20 mm de espessura. As áreas circundadas indicam os defeitos, como riscos na região dos olhos e material fundido no lado direito. Setas indicam pó fundido em cada modelo.

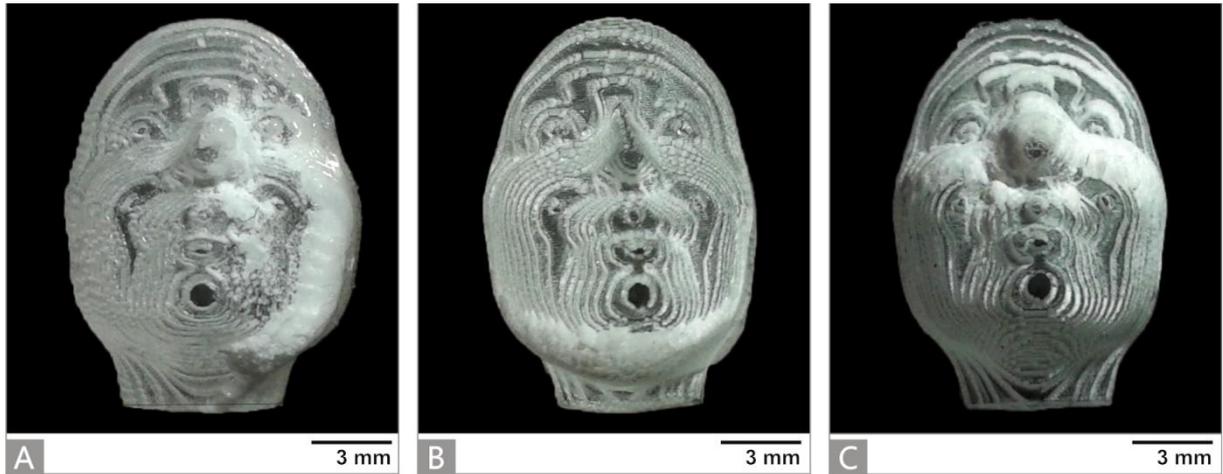
Isso se deve ao ângulo de varredura do laser que não alcançou a região desejada em função da parede lateral (bochecha) formada pelo modelo. Esse defeito já esperado, conforme ilustrado na Figura 32 (página 67). O defeito concentrou-se apenas em um dos lados devido ao deslocamento do modelo em relação ao centro da mesa. A dimensão da deformação foi proporcional ao tamanho da peça, dessa forma, essa mostrou-se bastante evidente na face com 20 mm de espessura.

Outra irregularidade percebida foi na aplicação do preenchimento vetorial da camada via programa gráfico da máquina, Laser Draw[®]. Em algumas camadas, houve erro de processamento das curvas e uma linha horizontal atravessou a região do perfil (não usinada) e, conseqüentemente, a marca tornou-se perceptível no modelo. No rosto de 10 mm de espessura, a região afetada foi a dos olhos (Figura 59A) e no rosto de 20 mm, em menor grau, foi a da testa (Figura 59B). Este risco não foi gerado no rosto de 5,5 mm. Acredita-se que esse defeito seja atribuído a limitações do *software* do equipamento, o qual possui uma versão antiga (2009).

Novamente, o fluxo de material ejetado da superfície gerou danos durante a usinagem, o qual ocasionou acúmulo de um pó fundido na região do queixo (indicado pelas setas vermelhas da Figura 59). Isso ocorre devido ao fluxo de material removido ser direcionado para trás do sentido de varredura (que foi da testa para o queixo). Assim, as paredes mais altas que ficam na porção final da usinagem (no caso o queixo) acabam retendo esse material e gerando o defeito.

Buscou-se resolver esta questão do acúmulo de material mudando o modelo de orientação e posicionamento sobre a mesa de trabalho. Foram realizados ensaios com posicionamentos e orientações diversas. Porém, os resultados obtidos foram insatisfatórios, pois apresentaram defeitos superficiais em outras regiões da face, principalmente, de acordo com a orientação em relação ao fluxo de material removido. Isso pode ser observado na Figura 60, que apresenta três rostos em amostras de 5,5 mm de espessura.

Figura 60 - Resultados da usinagem em diferentes orientações e posicionamentos.



A - Rosto usinado com sentido de varredura da esquerda para a direita (posicionado entre o centro e o canto mais próximo do exaustor, orientado com a testa em direção ao exaustor); B - Rosto usinado com sentido de cima para baixo (posicionado entre o centro e o canto mais próximo do exaustor, orientado com o lado esquerdo da face em direção ao exaustor); C - Rosto usinado com sentido de varredura de baixo para cima (posicionado centralizado, orientado com o lado direito da face em direção ao exaustor).

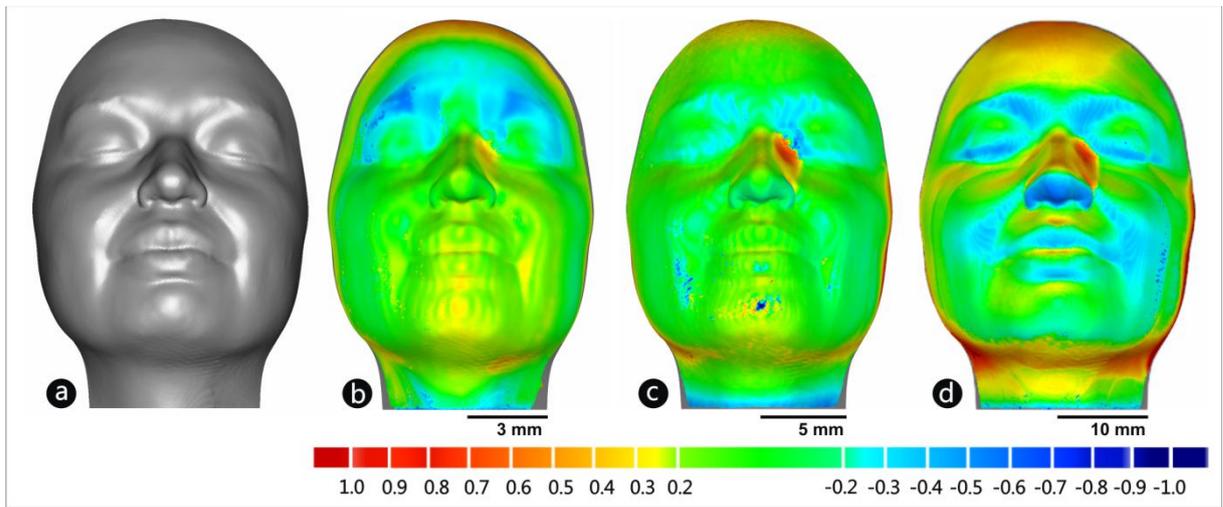
4.7 Análise Dimensional

Os rostos usinados foram digitalizados em 3D e os dados obtidos possibilitaram a análise dimensional de cada peça, comparando-as com o modelo virtual do rosto escaneado tridimensionalmente.

Nesta análise, os erros dimensionais foram representados em cores que simulam as diferenças medidas entre os modelos por meio do *software* Geomatic Qualify[®]. O programa possibilitou calcular uma superfície média entre o rosto usinado a laser e o modelo virtual do rosto escaneado.

De acordo com a Figura 61, na escala de cores, os tons azulados indicam os pontos localizados abaixo da superfície de referência (modelo virtual do rosto escaneado) e as cores avermelhadas, pontos acima. As tonalidades em verde identificam as áreas nas quais o erro dimensional encontra-se abaixo de 0,2 mm (configurado de acordo com a espessura de camada).

Figura 61 - Análise dimensional dos rostos usinados a laser.



(a) rosto original, (b) rosto usinado em amostra de 5,5 mm de espessura, (c) rosto usinado em amostra de 10 mm de espessura e (d) rosto usinado em amostra de 20 mm de espessura.

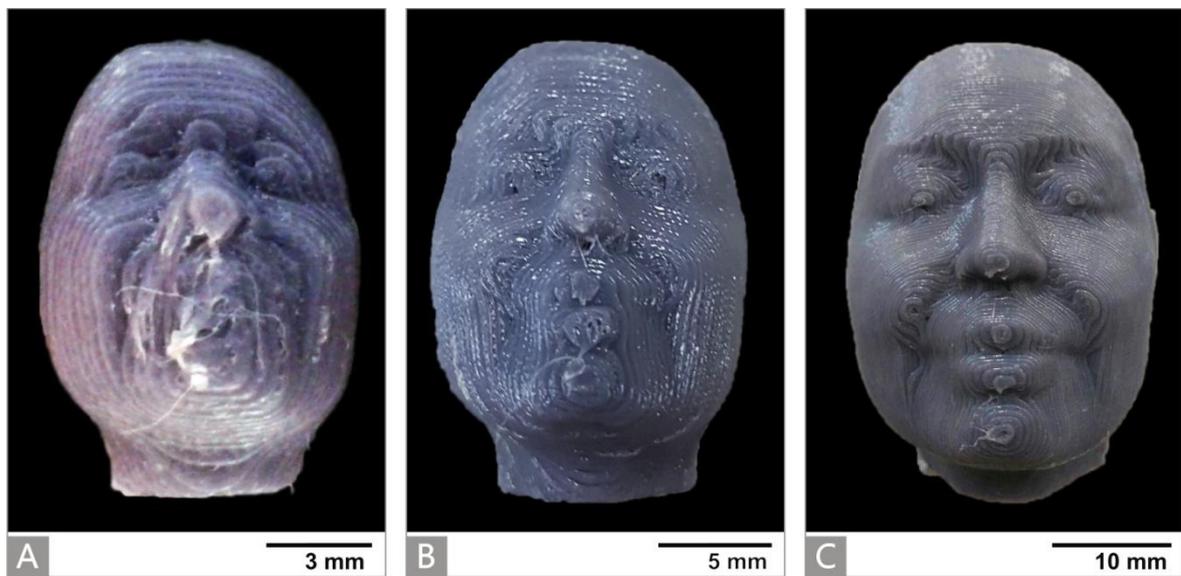
A análise dimensional do rosto obtido na espessura de 5,5 mm (Figura 61b) revelou que houve áreas com erros dimensionais, principalmente, na região superior do modelo. Nas regiões da testa, sobrancelhas e final do pescoço, a coloração azulada indica uma superfície com rebaixo em relação ao rosto original, com erro dimensional negativo entre 0,3 e 0,4 mm. Já as regiões amareladas revelam o inverso, superfícies acima da superfície de referência com erro de 0,3 mm. A comparação entre os modelos estabeleceu um erro médio de $\pm 0,14$ mm com desvio-padrão de 0,17 mm.

O rosto de 10 mm de espessura demonstrou melhor compatibilidade entre as malhas 3D sobrepostas. Conforme apresentado na Figura 61c, há pequenas regiões com erros dimensionais acima da média. As áreas entre os olhos e final do pescoço indicam erro negativo de 0,2 mm. Notou-se uma pequena região de cor avermelhada na lateral direita do nariz, indicando um desvio de aproximadamente 0,7 mm. A região apresenta excesso de material depositado decorrente de pó ejetado fundido, assim, a superfície possui pontos mais elevados que a região do modelo original. A média dos erros dimensionais definida neste caso foi de $\pm 0,12$ mm com desvio-padrão de 0,16 mm.

Os dois primeiros modelos apresentaram erros praticamente idênticos, enquanto o último teve praticamente o dobro do erro (Figura 61d). A região da lateral direita do nariz do modelo de 20 mm de espessura apresentou o mesmo perfil de deformação presente no modelo de 10 mm. Assim, a coloração avermelhada indicou um desvio de aproximadamente 0,7 mm nesta região. Na parte abaixo dos maxilares e queixo houve erro de até 0,8 mm. Este modelo apresentou erros maiores devido ao seu tamanho maior, o qual também implica em uma redução do alcance do ângulo de incidência do laser (conforme avaliado no item 4.2). Assim, esse modelo apresentou erro médio de $\pm 0,24$ mm com desvio-padrão de 0,3 mm.

Por fim, como descrito no item 3.10 comparou-se os modelos fabricados por impressão 3D com seus modelos correspondentes fabricados pela usinagem 3D a laser. A Figura 62 apresenta os modelos obtidos por impressão 3D.

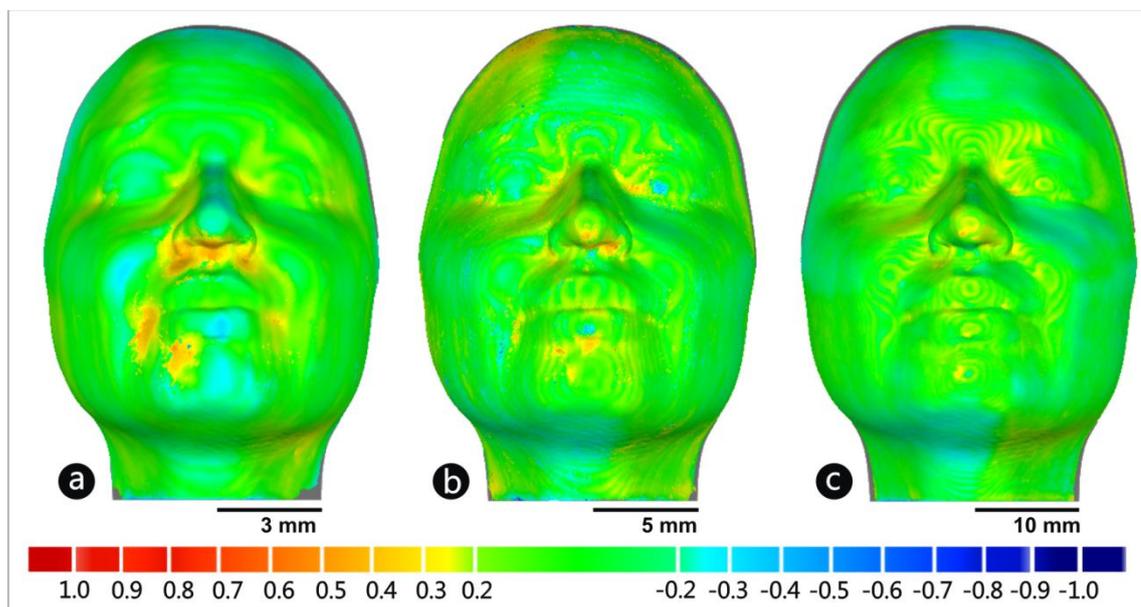
Figura 62 - Rostos fabricados por impressão 3D.



A - Modelo em substrato 5,5 mm de espessura, B - Modelo em substrato de 10 mm e C - Modelo em substrato de 20 mm.

Os modelos impressos em 3D também foram digitalizados e avaliados quanto à exatidão dimensional. A Figura 63 apresenta os resultados obtidos na análise realizada.

Figura 63 - Resultado da análise dimensional das peças impressas em 3D.



(a) - Modelo de 5,5 mm de espessura, (b) - Modelo de 10 mm e (c) - Modelo de 20 mm.

A impressão 3D apresentou um erro médio praticamente constante para os três modelos. Para o modelo de 5,5 mm foi observada uma maior dificuldade de representar detalhes menores, tais como na região do nariz e boca. Para efeito de comparação, as médias dos erros são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Média e desvio-padrão (σ) dos erros dimensionais dos modelos 3D.

Modelo (mm)	Laser (mm)	Impressão 3D (mm)
5,5	0,14 (σ 0,17)	0,08 (σ 0,10)
10	0,12 (σ 0,16)	0,10 (σ 0,07)
20	0,24 (σ 0,30)	0,07 (σ 0,08)

Conforme já apresentado, a usinagem a laser apresentou erros próximos para os modelos menores e um erro médio maior para o modelo de 20 mm. Isso ocorre devido ao aumento do ângulo de incidência do laser (em função da maior largura do modelo), bem como da maior quantidade de material depositado nas paredes verticais (em função da maior altura do modelo). Em geral, a impressão 3D

apresentou erros menores, sendo que os modelos de 10 mm foram os que ficaram com erros mais próximos.

Quanto ao tempo de processamento em cada modo de fabricação, cabe ressaltar que na usinagem a laser fez-se o somatório do tempo apenas na etapa de gravação, nesse sentido, contabilizou-se o período de ação do laser sobre o substrato na remoção de uma camada. Buscou-se assim, comparar os processos considerando ambos automatizados. Os resultados obtidos foram compilados conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Tempo de processamento das peças em cada processo analisado.

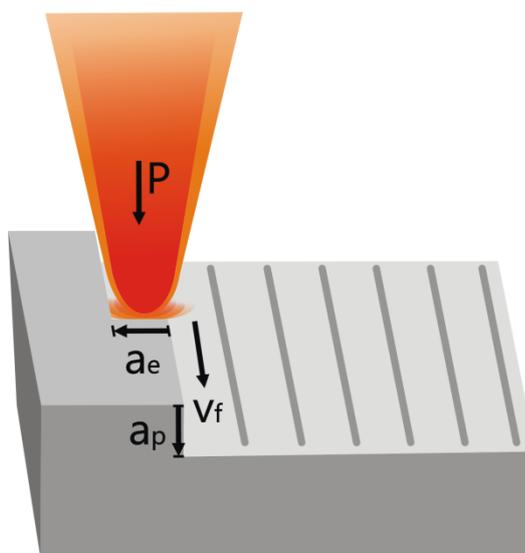
Modelo (mm)	Tempo de processamento (min)	
	Usinagem 3D a laser	Impressão 3D
5,5	3,8	5,5
10	9,2	17,0
20	46,8	43,5

Comparando os tempos de cada processo, nota-se que o processamento a laser foi mais rápido para os dois modelos menores, especialmente para o modelo de 10 mm, que demorou quase a metade do tempo da impressão. Porém, o modelo maior acabou demandando um tempo superior ao da impressão 3D. Isso ocorre devido à característica de varredura da máquina, a qual percorre toda a área de cada camada, apenas desligando o laser nas áreas não usinadas. Desse modo, observou-se que o tempo da usinagem a laser foi dependente do tamanho do paralelepípedo gerado em torno do modelo 3D para o fatiamento. Cabe ressaltar que não foi observada uma relação linear do tempo de usinagem com o volume de material removido. Assim, para produtividade do processo, pode-se recomendar a utilização da mínima área (XY) necessária em volta do modelo 3D, por exemplo, reduzindo as dimensões da chapa a ser usinada ou limitando essa área a um *offset* do contorno do modelo.

4.8 Síntese dos parâmetros e do processo de usinagem a laser

Finalizados os ensaios, ficaram estabelecidos os parâmetros para a usinagem a laser por múltiplas camadas, conforme o processo proposto. Pode ser feita uma analogia com os parâmetros utilizados na usinagem por fresamento: o espaçamento entre linhas é equivalente à penetração de trabalho (a_e); a velocidade de varredura do laser é equivalente à velocidade de avanço (V_f); e a profundidade atingida pelo laser é equivalente à profundidade de corte (a_p). Destaca-se que na usinagem a laser não há o parâmetro de rotação de ferramenta (n), mas há o parâmetro de potência do laser (P). A Figura 64 ilustra os parâmetros determinados para a usinagem a laser:

Figura 64 - Parâmetros determinados para a usinagem a laser por múltiplas camadas.



Parâmetros de usinagem: espaçamento entre linhas = penetração de trabalho (a_e); velocidade de varredura do laser = velocidade de avanço (V_f); profundidade atingida pelo laser = profundidade de corte (a_p); potência do laser (P).

Neste trabalho, foram determinados parâmetros para obtenção de camadas (profundidade de corte) de 0,2 e 0,5 mm, em PMMA, conforme a Tabela 4. Cabe destacar que, fixando a potência em 43 W e o espaçamento entre linhas em 0,04 mm, a profundidade desejada pode ser obtida com a velocidade calculada de acordo com a Equação 5 e ajustada com ensaios de calibração (a exemplo dos já apresentados na Figura 54 e na Figura 56).

Tabela 4 - Parâmetros determinados para usinagem a laser de PMMA.

Profundidade (ap) (mm)	Velocidade (Vf) (m/min)	Espaçamento (ae) (mm)	Potência (P) (W)
0,2	100	0,04	43
0,5	44	0,04	43

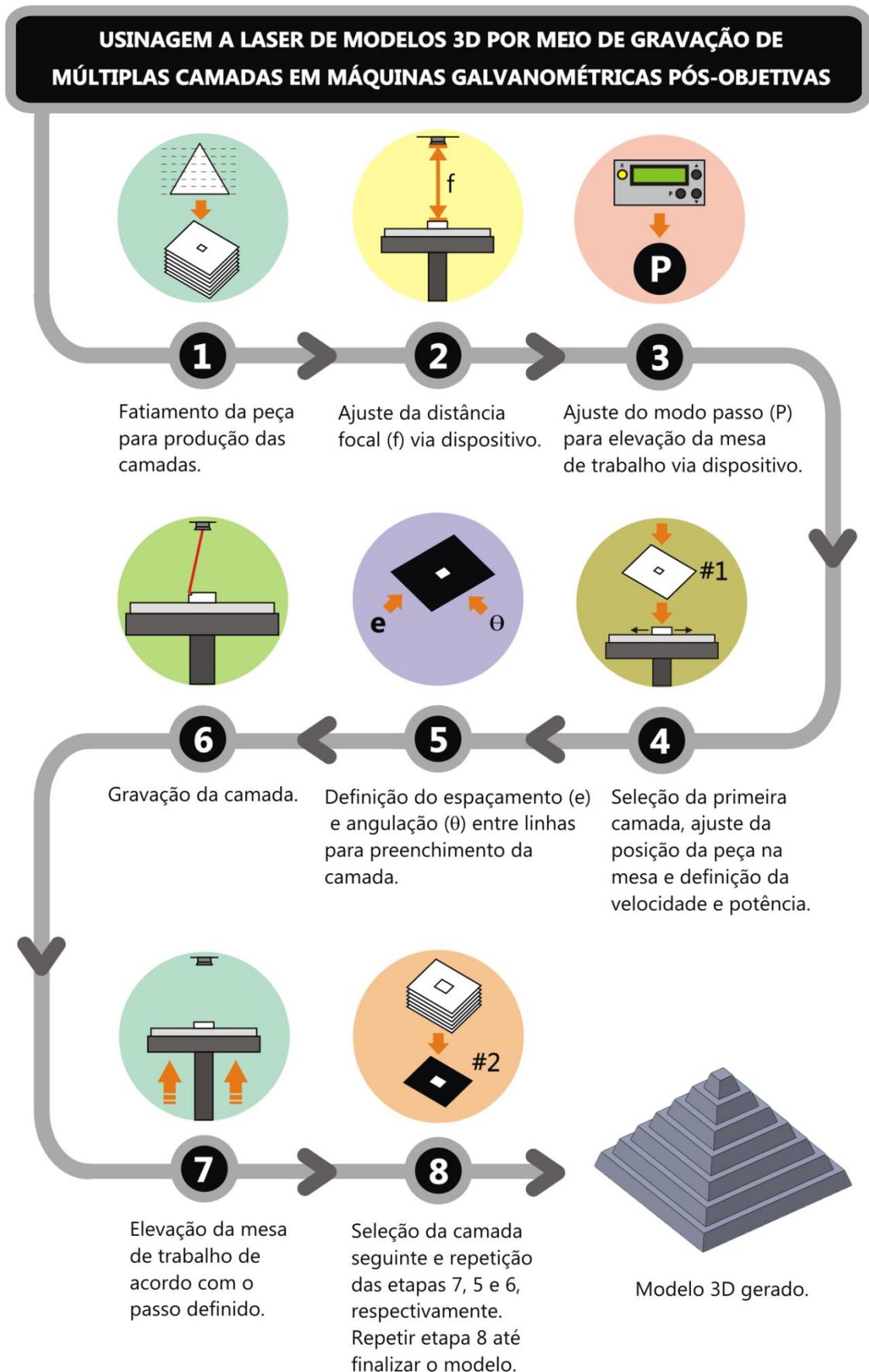
Alguns parâmetros mostraram-se independentes, ou seja, não dependem dos valores dos demais parâmetros e podem ser ajustados ao longo do processo. Outros parâmetros mostraram-se dependentes, conforme o Quadro 4. Tais parâmetros influenciam principalmente a geometria e o acabamento da peça usinada.

Quadro 4 - Relação entre os parâmetros para a usinagem a laser.

Parâmetros dependentes (resultado da configuração)	Parâmetros independentes (ajustáveis no processo)	Principal influência verificada na peça
Ângulo de varredura	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Tamanho da peça ▶ Posição da peça (em relação ao centro) 	Geometria
Direção do fluxo de material removido	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Posição da peça (proximidade do exaustor) ▶ Sentido de varredura (estratégia de varredura) 	Acabamento
Profundidade de usinagem (altura da camada)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Potência do laser ▶ Velocidade de varredura ▶ Espaçamento entre linhas 	Geometria Acabamento

Por fim, após o desenvolvimento de um sistema de controle de deslocamento da mesa da máquina e a determinação dos principais parâmetros de processo, o método proposto foi validado. Para um melhor entendimento do método de usinagem a laser de modelos 3D por meio da gravação de múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas, elaborou-se um fluxograma das etapas desenvolvidas, conforme a Figura 65.

Figura 65 - Fluxograma do método desenvolvido.



5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de um método para a usinagem a laser por múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas. Buscou-se o aprimoramento operacional de um maquinário destinado à produção de artefatos bidimensionais por meio da implementação de uma nova funcionalidade.

Neste contexto, os ensaios realizados permitiram identificar, avaliar e validar os principais parâmetros necessários para o processamento de modelos 3D nesse tipo de equipamento de gravação e corte a laser. Assim, as conclusões do presente estudo são as que seguem.

O método de usinagem a laser desenvolvido mostrou-se viável e aplicável para criação de pequenos objetos em PMMA. Por meio dos resultados obtidos, esta pesquisa trouxe contribuições para a área de desenvolvimento de pequenos protótipos e produtos, uma vez que o processo poderá ser otimizado e adaptado a outros materiais e equipamentos a laser.

Os principais passos para o planejamento do processo estão baseados no fatiamento dos modelos 3D (geração das camadas), no posicionamento da peça na mesa de trabalho e na seleção dos parâmetros de processamento: potência do laser, velocidade de varredura e espaçamento entre linhas. Estes três parâmetros definirão a profundidade de usinagem (altura da camada).

Para o PMMA utilizado, os parâmetros determinados para usinar camadas de 0,2 mm foram potência do laser de 43 W, espaçamento entre linhas de 0,04 mm e velocidade de varredura de 100 m/min. Para obter camadas de 0,5 mm, basta ajustar a velocidade para 44 m/min. Ainda, fixando essa potência e esse espaçamento entre linhas, a velocidade necessária para obter outras profundidades pode ser estimada por meio das equações obtidas. Para ajustar a velocidade, de modo a obter a exatidão desejada, recomenda-se a gravação de algumas camadas sobrepostas e medição do resultado.

O ajuste focal da lente, de acordo com a espessura do material a ser processado, mostrou-se de extrema importância, pois interfere diretamente na qualidade superficial e na profundidade da gravação. Para manter as condições de usinagem, bem como a exatidão do processo, o foco deve ser reajustado entre cada camada usinada, o que pode ser automatizado a partir do dispositivo desenvolvido.

O processo de usinagem a laser em substrato de PMMA resulta em uma grande quantidade de material vaporizado. Este, quando em contato com a superfície do material, acaba condensando na forma de um fino pó, o qual se deposita e adere em parte da peça já usinada, constituindo um limitante do processo. Esse pó aderido prejudica o acabamento e exige um sistema de exaustão adequado. Uma das possíveis soluções foi aproximar a peça da entrada do exaustor, porém, o deslocamento da peça na mesa de trabalho afeta também o ângulo de incidência do laser, o qual, por sua vez, pode limitar a geometria da peça.

Além do posicionamento da peça na mesa de trabalho, a direção de varredura do laser (estratégia de usinagem) mostrou-se de fundamental importância para o acabamento da peça. Isso se deve ao fluxo de material vaporizado, o qual se move direcionado para trás do sentido de varredura do laser. Assim, as superfícies mais altas, de camadas superiores já usinadas, acabam retendo esse material que condensa e se acumula nas paredes, prejudicando localmente o acabamento.

Os modelos obtidos com altura de camada de 0,2 mm em chapas de 5,5 e 10 mm apresentaram erros médios próximos a 0,1 mm. Tais erros foram ligeiramente maiores dos que os apresentados por protótipos obtidos com uma impressora 3D FDM, porém, em um tempo de produção menor. Já o modelo obtido em chapa de 20 mm apresentou um erro bastante superior aos demais, o que foi atribuído ao direcionamento do fluxo de material ejetado da superfície, conforme já referido.

Outra questão a ser levada em consideração diz respeito aos *softwares* gráficos utilizados para o processamento das camadas do modelo 3D. Foram observadas algumas limitações referentes à importação de arquivos com curvas em

formatos suportados pelo programa nativo do equipamento. Nos ensaios realizados as camadas foram ajustadas individualmente, mas essa é uma etapa que necessita ser automatizada para dar produtividade ao processo e para permitir o uso de profundidades de usinagem menores.

Assim, com a automação do equipamento, será possível produzir modelos mais detalhados, mesmo que com alguma restrição geométrica, o que é característico dos processos de usinagem em geral. Por fim, cabe salientar que a potencialidade da usinagem a laser de pequenos protótipos é interessante para o nicho de fabricação digital, particularmente para *fab labs* e laboratórios de design.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade de pesquisas relacionadas ao tema abordado, sugerem-se os seguintes caminhos:

- ▶ Estudo e desenvolvimento de *software* CAM para ajustar os parâmetros de usinagem, realizar o fatiamento do modelo 3D e calcular as trajetórias do laser em cada camada;
- ▶ Estudo e desenvolvimento de *software* de controle para o sistema de usinagem a laser, o qual seja capaz de comandar o equipamento e automatizar a sequência necessária para usinar uma camada após outra;
- ▶ Estudos da aplicação do método em outros materiais, em especial para estabelecer os parâmetro adequados para cada material;
- ▶ Avaliar o uso de um sistema de exaustão secundário, ou de ar comprimido, para oportunizar a usinagem a laser de modo centralizado na mesa de trabalho e garantir a retirada do material oriundo do processamento;
- ▶ Adaptar o método proposto para possibilitar a usinagem a laser com outras lentes; ou outros tipos de equipamentos, tais como máquinas de óptica móvel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDA, J. **Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation**. Encyclopedia of Optical Engineering, 2003.

AQUINO, K. **Estabilização radiolítica do poli (metacrilato industrial)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2005.

ARDUINO. **Apresentação de produto: Arduino Uno**. Disponível em: <<http://www.arduino./en/main/arduinoboarduno>> . Acesso em: jan 2017.

AUTOMATISA SISTEMAS. **Mira 3007**: Manual do usuário (2009).

AUTOMATISA. **Tecnologia em Corte e Gravação a laser - Máquinas**. Disponível em: <<http://www.automatisa.com.br/>> . Acesso em: fev. 2016.

BAGNATO, S. **Laser e suas aplicações em Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

BARBIAN, T. **Design e Tecnologia: Gravação a laser de desenho no arenito**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BERRETTA, J. **Investigação do processo de endurecimento de materiais via laser**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1995.

BOSMAN, J. **Processes and strategies for solid state q-switch laser marking of polymers**. Tese de Doutorado. Universiteit Twente, Velden, 2007.

BUCHFINK, G. **The laser as a tool**. Wurzburg: Vogel Buchverlag, 2007.

CASTILLEJO M.; MARTIN, M., OUJJA, M.; REBOLLAR, E., DOMINGO, C., et al. Effect of wavelength on the laser cleaning of polychromes on wood. **Journal Cultural Heritage**, v. 4.; p. 243-249, 2003.

CATORZE, M. **Laser: fundamentos e indicações em dermatologia**. Educação Médica Continuada - Med. Cutan. Iber. Lat. Am. 1° ed, Lisboa, v. 37, 2009.

CELANI, M.; PUPO, R. Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para Arquitetura e Construção: Definições e Estado da Arte no Brasil. **Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**, v. 8, n. 1 - Universidade Presbiteriana Mackenzi, São Paulo, 2008.

CHENG-JUNG, L.; YI-CHUNG, W.; LANG-DONG, L.; CHYI-RONG, C.; MING-JER, T. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 198 p. 419 - 425, 2008.

CIDADE, M. **Caracterização e padronização do processo de gravação a laser em ágata aplicado ao design de joias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CIDADE, M.; PALOMBINI, F.; LIMA, N.; DUARTE, L. Método para determinação de parâmetros de gravação e corte a laser CO₂ com aplicação na joalheria contemporânea. **Design & Tecnologia**, v.12, p. 54-64, 2016.

COSTA, E. **Processo de fabricação de mini e microdispositivos fluídicos por ablação a laser de dióxido de carbono**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DAHOTRE, N.; HARIMKAR, S. **Laser fabrication and machining of materials**. New York: Springer Science, 2008.

DAKKA, S. TG/MS of poly(methyl metracrylate) - The effect of heating rate on the rate of production of evolved gases. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 75, p. 765-782, 2004.

DAVIM, P., BARRICAS, N.; CONCEIÇÃO, M. Some experimental studies on CO₂ laser cutting quality of polymeric materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 198, p. 99-104, 2008.

DIACI, J.; DRAGO, B.; GORKIC, A; MOZINA, J. Rapid and flexible laser marking and engraving tilted and curved surfaces. **Journal Optics and Lasers in Engineering**, v. 49, p. 195-199, 2011.

DUBEY, A; YADAVA, V. Laser beam machining - A review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, p. 609-628, 2008.

EYCHENNE, F.; NEVES, H. **Fab Lab: A Vanguarda da Revolução Industrial**. São Paulo: Editorial Fab Lab Brasil, 2013.

FARO, C. **Estudo e otimização do corte laser de alta velocidade em chapa metálica fina**. Dissertação de mestrado. Universidade do Porto, Porto, 2006.

FERNANDES, L. **Sensores de Imagem de Grande Área em Tecnologia de Silício Amorfo**. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

FREITAS, G. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GANNEV, R. **Laser: surface interactions**. New York: Springer Science, 2014.

HAN, A.; GUBENCU, D. Analysis of the laser marking technologies. **Nonconventional Technologies Review**, n. 4, p. 17 - 22, 2008.

HEYL, P.; OLSCHIEWSKI, T.; WIJNAENDTS, R. Manufacturing of 3D structures for micro-tools using laser ablation. **Journal Microelectronic Engineering**, p. 775 - 780, 2001.

HOLMES, A. Excimer laser micromachining with half-tone masks for the fabrication of 3D microstructures. **IEE. Meas. & Technology**, v. 151, 2 ed., p. 85-92, 2004.

JENSEN, F.; NOERHOLM, M.; CHRISTENSEN, L.; GESCHKE, O. Lab Chip. Microstructure fabrication with a CO₂ laser system: characterization and fabrication of cavities produced by raster scanning of the laser beam. **Journal the Royal Society of Chemistry**, v. 3, p. 302-307, 2003.

LEONE, C., LOPRESTO, V., DEIORIO, I. Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd:YAG green laser. **Journal Optics and Lasers in Engineering**, v. 47, p. 161-168, 2009.

KLANK, H.; KUTTER, J.; SNAKENBORG D. Microstructure fabrication with a CO₂ laser system. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, 2004, v. 14, p. 182-189.

KERN. Laser engraving. Disponível em: <<http://www.kern.com/laser-engraving/>>. Acesso em: ago 2015.

KOSCUN, M. Three-axis laser: technology improves demanding materials processing materials applications. **Laser Focus World**, 2014. Disponível em: <<http://www.laserfocusworld.com>>. Acesso em: abr. 2016.

KUO, L.; LIN, J. Laser cleaving on glass sheets with multiple laser beams. **Optics and Lasers in Engineering**, 2008, v. 46, p. 388-395.

MYCLASER. **MYC-Laser**. Disponível em: <<http://www.myclaserclub.com/laser/>>. Acesso em: fev. 2016.

MICROSOFT. **R-Quadrado**. Disponível em: <<http://www.microsoft.com//>>. Acesso em: dez. 2016.

NAYAK, N; LAM, Y.; YUE, C.; SINHA, A. CO₂-laser micromachining of PMMA: the effect of polymer molecular weight. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 18, 2008.

PARE, L.; COTTA, N.; TOSTADO, C. **Characterization of Micro-Models of Porous Media Fabricated Using CO₂ Laser Machining**. Belém, Pará: ENCIT 2014, 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2014.

PEDDER, J.; HOLMES, A.; BOEHLEN, K.; ALLOTT, R. Pulsed Laser Ablation for Volume Micro-Optical Arrays on Large Area Substrates. **Photonics West – SPIE Proceeding**, v. 6462, 2007.

PICHLER, R. **Design, tecnologia e valorização local: estudo de técnicas de beneficiamento em serpentinito para uso como material gemológico aplicado ao design de joias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PUPO, R. Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil: definições e estado da arte. **PARC – Pesquisa em Arquitetura e Construção (2008)**. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~parc>>. Acesso em: set. 2016.

QI J.; WANG, L.; ZHU, M. **A study on the laser marking process of stainless steel**. **Journal of Materials Processing Technology**, v: 139, p. 273-276, 2003.

RASIERA, C. **Design e tecnologia aplicada a resíduos de madeira: especificações para o processo de corte a laser em marchetaria**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SANTANA, L. **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SANTOS, M. **Desenvolvimento de um sistema automatizado para a caracterização espacial de feixes de laser**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

SANTOS, S. **Design e Tecnologia: estudo da aplicação do processo de corte e gravação a laser em couro bovino acabado e semi-acabado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOARES, S.; DILLY, J.; DUARTE, L.; SILVA, F.; CÂNDIDO, L. Contribuição ao Design de Superfície em Gemas Naturais: estudo sobre a caracterização da gravação a laser em madrepérolas. **Inovação, design e pesquisas aplicadas em gemas, joias e mineração. 4 ed. Soledade**, cap. 5, p. 66-73, 2015.

SOARES, S.; DUARTE, L.; ROLDO, L.; SILVA, F. Design de superfície em madrepérola: efeito degradê por gravação a laser. **Revista Expressão Gráfica (Online)**, v: 20 p. 40-51, 2016.

SHIGERU; SHINICHI; MAKOTO; YOSHIRO. **Optical system for flyingspot scanning system**. US Pat EP 0288970 B1, 11 ago., 1993.

SILVA, F. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

_____. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, F. P.; CALDOVINO, G. C.. Produção de réplicas acessíveis de peças museológicas via impressão 3D por filamento termoplástico. **In: IV International Conference on Design, Engineering, Management for innovation - IV Conferência Internacional de Design, Engenharia e Gestão para a inovação**, 2015, Florianópolis. **Anais do IDEMi 2015**. Florianópolis: UDESC, v. 1. p. 1726-1737, 2015.

STARRETT. Paquímetro Digital - **Manual do usuário**, 2016.

SUN, Y.; KWOK, Y.; NGUYEN, N. Low-pressure, high-temperature thermal bonding of polymeric microfluidic devices and their applications for electrophoretic separation. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v.16, p. 1681-1688, 2006.

TRUMPF. **Technical information: Laser Process**. Disponível em: <<http://www.trumpf-laser.com/en/about-trumpf/media-center/library.html>>. Acesso em: 2016.

ÜLKER, G. **Design & implementation of a control system for use of galvanometric scanners in laser micromachining applications**. Dissertação de Mestrado. Sabanci University, Istanbul, 2011.

VIANA, C. **Otimização dos parâmetros laser na texturização de anéis de pistão com cobertura em pvd através da utilização do DOE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2014.

VIDAL, J. **Desenvolvimento de um sistema opto-mecânico para micro usinagem com laser femtosegundo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

WALLACE, R.; COPLEY, S. Shaping silicon nitride with a carbon dioxide laser by overlapping multiple grooves. **Journal of Engineering for Industry**. v. 111, p. 315 - 321 apud DAHOTRE, N.; HARIMKAR, S. **Laser fabrication and machining of materials**. New York: Springer Science, 2008.

WANG C.; ZENG X. Study of laser carving three-dimensional structures on ceramics: quality controlling and mechanisms. **Opt Laser Technol**, v.39, p. 1400-5, 2007.

WU, C.; YOSHIYUKI, M.; CHIIDONG, C. **Lithography: High-energy Electron Beam Lithography for Nanoscale Fabrication**, cap. 13, 2010. Disponível em: <<http://www.http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/8670.pdf>>. Acesso em: out. 2016.

YAO, L.; CHENG, G.; RAJURKAR, K.P; FEINER, S.; ZHANG, W. Combined research and curriculum development of nontraditional manufacturing. **European Journal of Engineering Education**, v: 30, n° 3, 2005.

YUAN, D.; DAS, S. Experimental and theoretical analysis of direct-write laser micromachining of polymethyl methacrylate by CO₂ laser ablation. **Journal of Applied Physics**, v. 101, 2007.

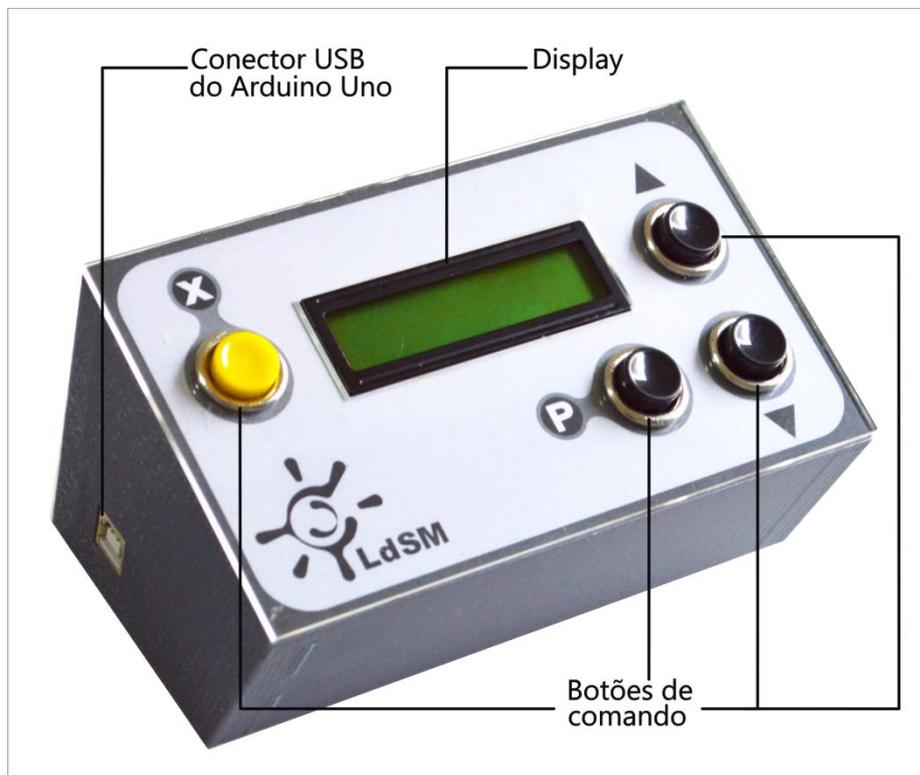
ZHANG, W.; LAWRENCE, Y. Laser Materials Processing. In: McGraw-Hill. (Ed. H. Geng). **Manufacturing Engineering Handbook**, New York: The McGraw-Hill Companies, cap. 34, v. 1, 2004.

APÊNDICE A

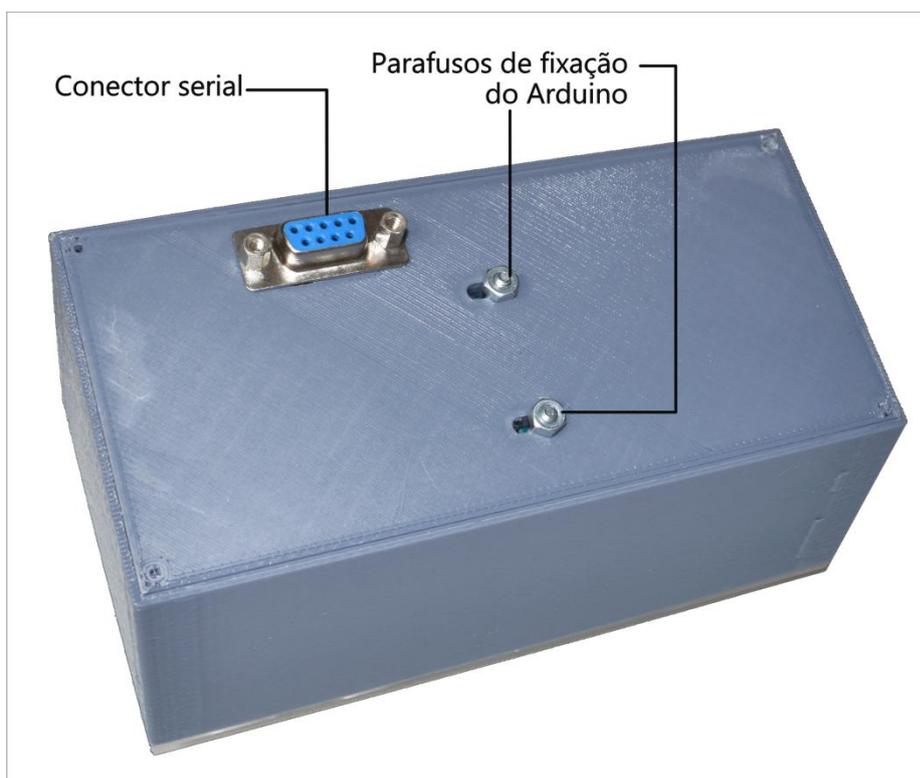
- ▶ **Imagens do dispositivo desenvolvido e os componentes do sistema eletrônico**
- ▶ **Esquema eletrônico do dispositivo**
- ▶ **Esquema do circuito elétrico do dispositivo**
- ▶ **Programação utilizada no Arduino Uno**

- **Imagens do dispositivo desenvolvido e os componentes do sistema eletrônico**

Vista frontal do dispositivo

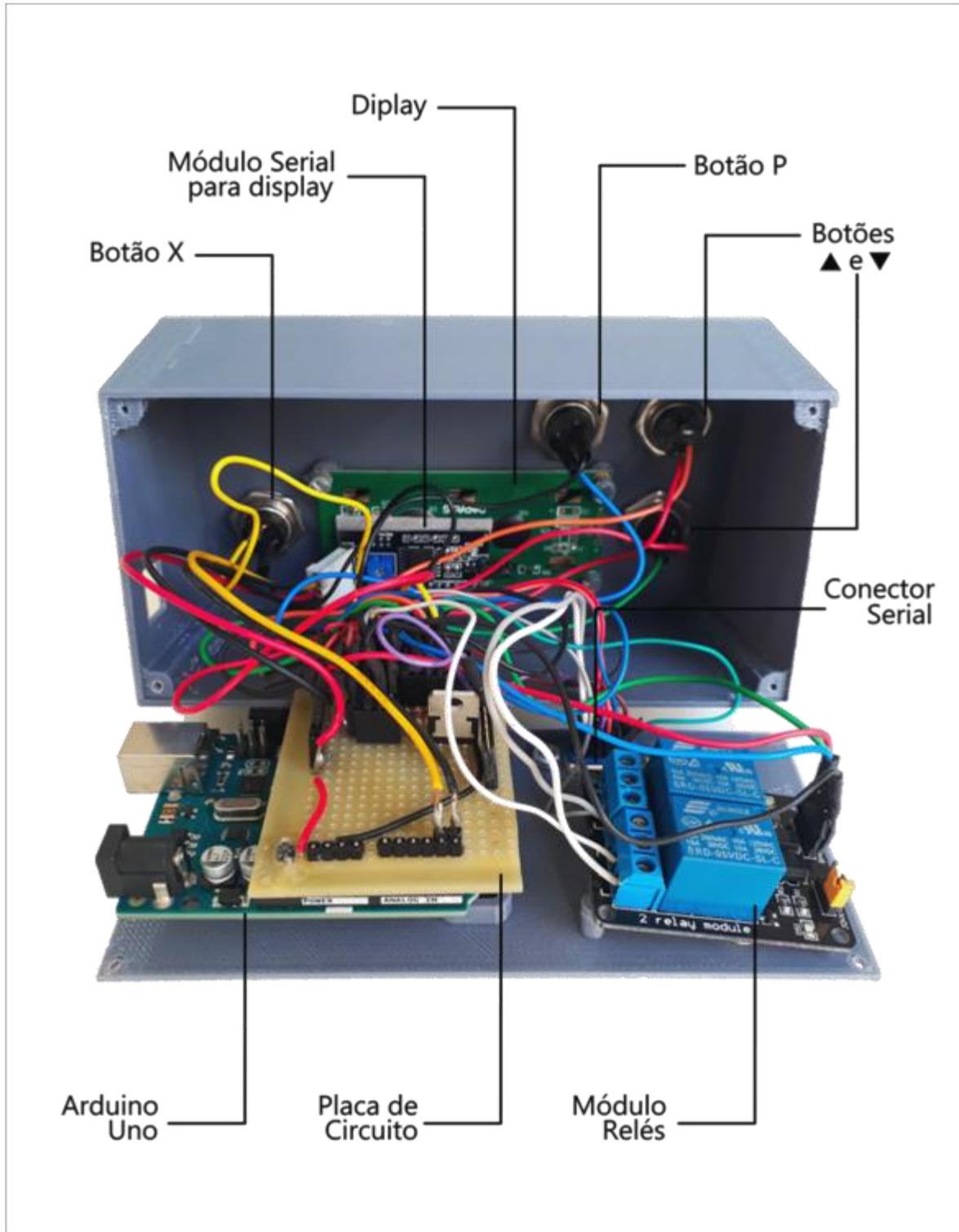


Vista posterior do dispositivo

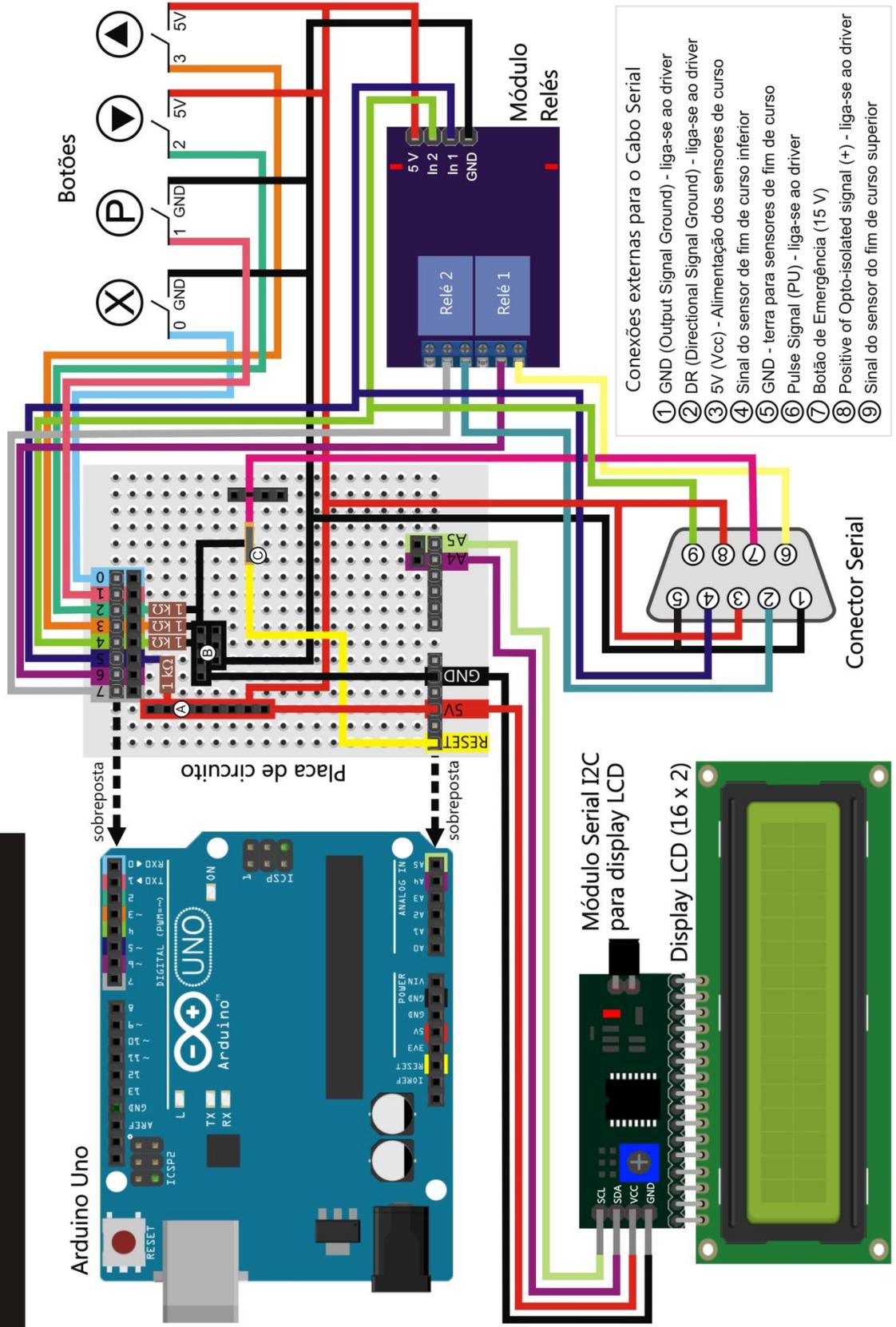


- ▶ **Imagens do dispositivo desenvolvido e os componentes do sistema eletrônico**

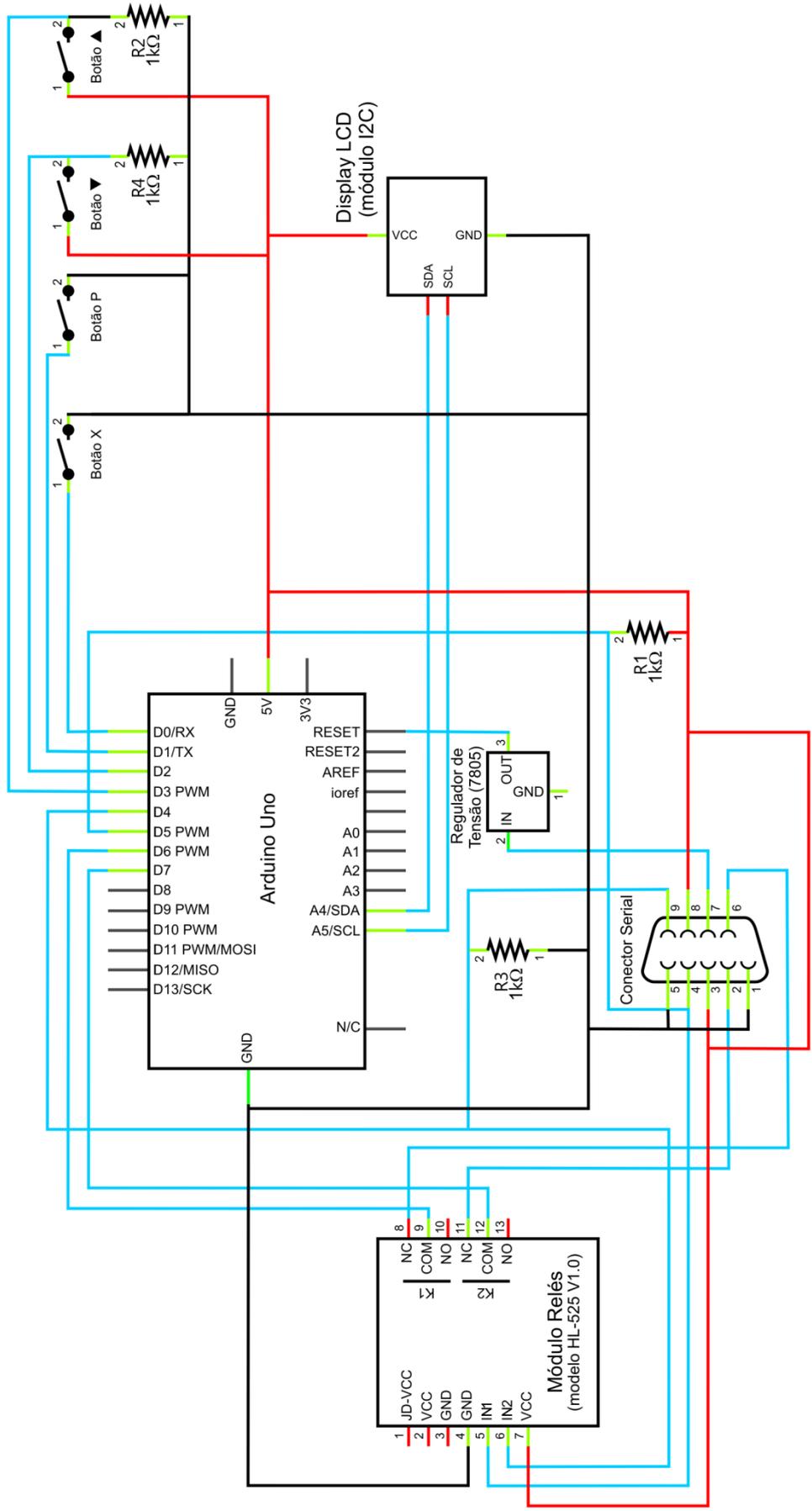
Vista interna do dispositivo



Esquema eletrônico do dispositivo



Esquema do Circuito Elétrico do dispositivo



► Programação utilizada no Arduino Uno

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "TimerOne.h"

float Tpasso= 20; //meio periodo de cada passo
float rel= 3200; //passos/mm
float cursoMax= 393;
//#define foco10 46
//#define foco30 330

//7.8125 mm/s velocidade calculada com Tpasso =
//
float vel = 1000000/ (Tpasso*2*rel); //mm/ms
float tMax = (cursoMax)/vel; //tempo em ms para percorrer o curso total.
long int tMaxms = tMax*1000;
long tMovInic = 0;
long tMov = 0;

// Inicializa o display no endereco 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3f,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);

//caracteres especiais
byte sobe[8] = {
B00000,
B00100,
B00100,
B01110,
B01110,
B11111,
B11111,
B00000
};

byte desce[8] = {
B00000,
B11111,
B11111,
B01110,
B01110,
B00100,
B00100,
B00000
};

byte canc[8] = {
B00000,
B00000,

```

```

B10001,
B01010,
B00100,
B01010,
B10001,
B00000
};

byte pontos[8] = {
B00000,
B00000,
B01100,
B01100,
B00000,
B01100,
B01100,
B00000
};

long debounceDelay = 50;
long longDebounceDelay = 1500;

int estado = 0; // 0-esperando / 1-descendo / 2-subindo
int estadoAnterior = 0;
long int passada = 5000;
float passadamm = 1;//0.25;//000.10;
long int contador = 0;
long int altura = 0; //em número de passos
float alturamm = 0;
//float relacao = 3200; //relação entre o valore em passos e o valor em mm - alturamm =
altura*relacao / passadamm = passada*relacao
float relacao = 32; //número de passos pra 1 mm

int ajustePassada[5] = {0,1,2,3,4}; //cada elemento é um dígito
int posAjuste[5] = {6,7,8,10,11}; //posição do cursor para cada dígito durante o ajuste da passada
int indiceAjuste = 0;
bool acesso = 1; //flag para indicar se o número está aparecendo ou não enquanto ele está piscando
long tempoPisca = 0;

/* Vetores de variáveis dos botões
* elemento - função do vetor
* 0      = X
* 1      = P
* 2      = descer
* 3      = subir
*/

int pinosBotoes[4] = {0, 1, 2, 3};
int pX = 0; //pull up interno
int pP = 1; //pull up interno
int pDescer = 2;
int pSubir = 3;

```

```

int pSensAlto = 4;
int pSensBaixo = 5;
int pDescerMot = 6;
int pSubirMot = 7;

int leituraBotoes[4] = {0, 0, 0, 0}; // leitura em tempo real
int valorBotoes[4] = {0, 0, 0, 0}; //valor dos botões após a estabilização 0 = off/ 1 = t curto / 2 = t
longo
int valorAnterior[4] = {0, 0, 0, 0}; //valor dos botões após longo tempo pressionado
int leituraAnteriorBotoes[4] = {0, 0, 0, 0}; //valor dos botões após a estabilização
long tempoInicioLeitura[4] = {0, 0, 0, 0}; //tempo inicial de leitura do botão.
int executar[4] = {0, 0, 0, 0}; //valor dos botões após a estabilização 0 = off/ 1 = t curto / 2 = t longo
int executado[4] = {0, 0, 0, 0};
int n = 1; //contador de passadas no modo passo
int sentidoN=0; //flag que indica o sentido do primeiro movimento de passo. / 1 = para cima /-1 =
parabaixo
float z = 0; //altura em mm, não absoluta

int fimAlto = 0;
int fimBaixo = 0;

bool subir =false;
int referenciou = 0; //flag para indicar que a plataforma chegou no fim de curso superior
referenciando
//long int foco10 = 32;
//long int foco30 = 30000;
long int foco10 = 82;
long int foco30 = 330;
long int foco = 0;
int lente = 0;
long int porcentagem = 0;

int show = 0; //flag para indicar se muda ou não muda de tela

int i;
unsigned long int cont = 0;

int fimMov = 1;

long contPisca = 0;

int mudou = 0;

//*****INICIALIZAÇÃO*****

void setup() {

  lcd.begin (16,2);
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.createChar(1, sobe);
  lcd.createChar(2, desce);
  lcd.createChar(3, pontos);

```

```

//pinos de entrada
pinMode(pX,INPUT_PULLUP); //pull up interno
pinMode(pP,INPUT_PULLUP); //pull up interno
pinMode(pDescer,INPUT);
pinMode(pSubir,INPUT);
pinMode(pSensAlto, INPUT); //sensor alto
pinMode(pSensBaixo, INPUT); //sensor baixo
pinMode(pDescerMot , OUTPUT); //sinal para descer
pinMode(pSubirMot, OUTPUT); //sinal para subir

pinMode(13,OUTPUT);

ajustePassada[0]= passadamm/100;
ajustePassada[1]= (passadamm-ajustePassada[0]*100)/10;
ajustePassada[2]= (passadamm-ajustePassada[0]*100-ajustePassada[1]*10)/1;
ajustePassada[3]= (passadamm-ajustePassada[0]*100-ajustePassada[1]*10-ajustePassada[2])*10;
ajustePassada[4] = round((passadamm-ajustePassada[0]*100-ajustePassada[1]*10-ajustePassada[2]-
float(ajustePassada[3])/10)*100);

passada = passadamm*100*relacao;

Timer1.initialize(Tpasso); //inicializa o timer para controlar o sinal do motor de passo
}

//##### FUNÇÕES DO DYSPLAY #####

void testandoEstados()
{
  lcd.setCursor(0,1);
  //lcd.print(valorBotoes[0]);
  //lcd.print(valorBotoes[1]);
  //lcd.print(valorBotoes[2]);
  //lcd.print(valorBotoes[3]);
  lcd.setCursor(14,0);
  //lcd.print(fimMov);
  lcd.print(estado);
  //delay(1000);
}

void telaboasvindas(){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" Bem Vindo!!");
  lcd.setCursor(0,1);
}

void telaContinuo(){
  if(show==1)
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
  }
}

```

```

    lcd.print("Passo: continuo");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Z=");
    lcd.print(contador);
    lcd.print("mm ");
    show =0;
}
if(mudou==1)
{
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print(z);
    lcd.print("mm ");
    mudou=0;
}
}

```

```

void telaPasso(void){
    if(show==1)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Passo:");
        lcd.print(passadamm);
        lcd.print("mm");
        //lcd.print(passada);
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("Z=");
        lcd.print(z);
        //lcd.print("mm");
        lcd.setCursor(10,1);
        lcd.print("N=");
        lcd.print(n);
        show = 0;
    }
    if(mudou ==1)
    {
        lcd.setCursor(2,1);
        lcd.print(z);
        lcd.print(" ");
        //lcd.print(contador);
        //lcd.setCursor(9,1);
        //lcd.print("mm ");
        lcd.setCursor(12,1);
        //lcd.print("N=");
        //lcd.setCursor(13,1);
        lcd.print(n);
        lcd.print(" ");
        mudou=0;
    }
}
}

```

```

void telaFoco(){
  if (show ==1)
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Ajustar o foco?");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.write(1); lcd.write(3); lcd.print("10 ");
    lcd.write(2); lcd.write(3); lcd.print("30 ");
    lcd.print("x"); lcd.write(3); lcd.print("canc");
    show = 0;
  }
}

```

```

void telaFocando()
{
  if (show == 1)
  {
    show=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Focando ");
    lcd.print(lente);
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print("x"); lcd.write(3); lcd.print("canc");
    lcd.setCursor(0,1);
  }
  else
  {
    if((millis()-tempoPisca)>750)
    {
      if(contPisca==3)
      {
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(" ");
        lcd.setCursor(0,1);
        contPisca=0;
      }
      lcd.print(".");
      contPisca = contPisca+1;
      tempoPisca = millis();
    }
  }
}

```

```

void telaAjustePasso(int indice)
{
  if(show==1)
  {
    show = 0;

```

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Passo:");
lcd.setCursor(9,0);
lcd.print(",");
lcd.setCursor(12,0);
lcd.print("mm");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(" P"); lcd.write(3); lcd.print("valor ");
lcd.print("x"); lcd.write(3); lcd.print("canc");

for(int i=0;i<=4;i++)
{
  lcd.setCursor(posAjuste[i],0);
  lcd.print(ajustePassada[i]);
}

tempoPisca = millis();
}
if(indice>0)
{
  lcd.setCursor(posAjuste[indice-1],0);
  lcd.print(ajustePassada[indice-1]);
}

//faz piscar digito selecionado
if(acesso==1)
{
  if(mudou==1)
  {
    lcd.setCursor(posAjuste[indice],0);
    lcd.print(ajustePassada[indice]);
    mudou=0;
  }
  if((millis()-tempoPisca)>500)
  {
    lcd.setCursor(posAjuste[indice],0);
    lcd.print(" ");

    tempoPisca = millis();
    acesso = 0;
  }
}
else
{
  if((millis()-tempoPisca)>300)
  {
    lcd.setCursor(posAjuste[indice],0);
    lcd.print(ajustePassada[indice]);

    tempoPisca = millis();
  }
}

```

```

    acesso = 1;
  }
}
}

//=====DEMAIS FUNCÇÕES=====

void(* resetFunc)(void)=0;

void LeBotoes()
{
  for(i=0;i<=1;i++)
  {
    leituraBotoes[i] = digitalRead(pinosBotoes[i]);

    valorAnterior[i]=valorBotoes[i];
    leituraAnteriorBotoes[i] = leituraBotoes[i];

    if (leituraBotoes[i] == 1)
    { tempoInicioLeitura[i] = millis();
      valorBotoes[i] = 0;
    }
    else{
      if ((millis() - tempoInicioLeitura[i]) > debounceDelay)
      { if ((millis() - tempoInicioLeitura[i]) < longDebounceDelay)
        { valorBotoes[i] = 1;
          }
        else
        { valorBotoes[i] = 2;
          }
        }
      }
    }
  }
}
for(i=2;i<=3;i++)
{
  leituraBotoes[i] = digitalRead(pinosBotoes[i]);

  valorAnterior[i]=valorBotoes[i];
  leituraAnteriorBotoes[i] = leituraBotoes[i];

  if (leituraBotoes[i] == 0)
  {
    tempoInicioLeitura[i] = millis();
    valorBotoes[i] = 0;
  }
  else{
    if ((millis() - tempoInicioLeitura[i]) > debounceDelay)
    { if ((millis() - tempoInicioLeitura[i]) < longDebounceDelay)
      { valorBotoes[i] = 1;
        }
      else
      { valorBotoes[i] = 2;
        }
    }
  }
}

```

```
    }  
    }  
    }  
}  
void reseta()  
{  
    altura = 0;  
    n = 1;  
    sentidoN =0;  
}  
  
void MudaEstado(int novoEstado)  
{  
    estadoAnterior = estado;  
    estado = novoEstado;  
    show = 1;  
    mudou=1;  
  
    switch (estado)  
    {  
        case 0:  
            telaboasvindas();  
            break;  
  
        case 1:  
            telaContinuo();  
            break;  
  
        case 2:  
            telaPasso();  
            break;  
  
        case 21:  
            telaPasso();  
            break;  
  
        case 22:  
            telaPasso();  
            break;  
  
        case 3:  
            telaAjustePasso(indiceAjuste);  
  
            break;  
  
        case 4:  
            telaFoco();  
            break;  
  
        case 42:  
            telaFocando();
```

```

    break;

}
}

void desceContinuo()
{
  if ((fimBaixo == 1)&&(valorBotoes[2] !=0))
  {
    if(digitalRead(pDescerMot)==HIGH)
    {
      digitalWrite(pDescerMot,LOW);
      altura = altura-1;
    }
    else
    {
      digitalWrite(pDescerMot,HIGH);
    }
  }
  else
  {
    Timer1.detachInterrupt();
    digitalWrite(pDescerMot, HIGH);
    fimMov=1;
    tMovInic = 0;
  }
}

void sobeContinuo()
{
  if ((fimAlto == 1)&&((valorBotoes[3] !=0)||subir))
  {
    if(digitalRead(pSubirMot)==HIGH)
    {
      digitalWrite(pSubirMot,LOW);
      altura = altura+1;
    }
    else
    {
      digitalWrite(pSubirMot,HIGH);
    }
  }
  else
  {
    Timer1.detachInterrupt();
    digitalWrite(pSubirMot, HIGH);
    fimMov=1;
    subir=false;
  }
}

```

```

void descePasso()
{
  if (fimBaixo == 1)
  {
    if(contador<passada*2)
    {
      contador = contador +1;
      if(digitalRead(pDescerMot)==HIGH)
      {
        digitalWrite(pDescerMot,LOW);
        altura = altura-1;
      }
      else
      {
        digitalWrite(pDescerMot,HIGH);
      }
    }
    else
    {
      Timer1.detachInterrupt();
      digitalWrite(pDescerMot, HIGH);
      if(sentidoN ==0)
      {
        sentidoN = -1;
      }
      n = n-1*sentidoN;
      fimMov=1;
    }
  }
  else
  {
    Timer1.detachInterrupt();
    digitalWrite(pDescerMot, HIGH);
    fimMov=1;
  }
}

void sobePasso()
{
  if (fimAlto == 1)
  {
    if(contador<passada*2)
    {
      //digitalWrite(pSubirMot, digitalRead(pSubirMot) ^ 1);
      contador = contador +1;
      //altura = altura+1;
      if(digitalRead(pSubirMot)==HIGH)
      {
        digitalWrite(pSubirMot,LOW);
        altura = altura+1;
      }
    }
  }
}

```

```

    }
    else
    {
        digitalWrite(pSubirMot, HIGH);
    }
}
else
{
    Timer1.detachInterrupt();
    digitalWrite(pSubirMot, HIGH);
    if(sentidoN == 0)
    {
        sentidoN = 1;
    }
    n = n+1*sentidoN;
    fimMov=1;
}
}
else
{
    Timer1.detachInterrupt();
    digitalWrite(pSubirMot, HIGH);
    fimMov=1;
}
}

void desceFoco()
{
    if (fimBaixo == 1)
    {
        if(cont<foco*2)
        {
            //digitalWrite(pDescerMot, digitalRead(pDescerMot) ^ 1);
            contador = contador +1;
            if(contador==32)
            {
                cont=cont+1;
                contador=0;
            }
            //altura = altura-1;
            if(digitalRead(pDescerMot)==HIGH)
            {
                digitalWrite(pDescerMot,LOW);
                altura = altura-1;
            }
            else
            {
                digitalWrite(pDescerMot,HIGH);
            }
        }
    }
    else

```

```

{
  Timer1.detachInterrupt();
  digitalWrite(pDescerMot, HIGH);
  // if(sentidoN ==0)
  // {
  //   sentidoN = 1;
  // }
  // n = n+1*sentidoN;
  fimMov=1;
}
}
else
{
  Timer1.detachInterrupt();
  digitalWrite(pDescerMot, HIGH);
  fimMov=1;
}
}

// -----PROGRAMA PRINCIPAL-----

void loop()
{
  LeBotoes();
  fimAlto = digitalRead(pSensAlto);
  fimBaixo = digitalRead(pSensBaixo);

  //passada = passadamm*100*relacao;
  //lcd.setCursor(0,0);
  //lcd.print(passadamm);
  //lcd.print(passada);

  if((float(altura)/(100*relacao))!=z)
  {
    mudou=1;
    z = float(altura)/(100*relacao); //altura em passos, relação em 0.01mm/passo
  }
  //lcd.setCursor(0,0);
  //lcd.print(passada);

  //testandoEstados();

  if(fimMov==0)
  {
    tMov = millis()-tMovInic;
    if(tMov > tMaxms)
    {
      Timer1.detachInterrupt();
      //tMovInic = millis();
      resetFunc();
    }
  }
}

```

```

switch(estado) //aplicar algoritmo pra evitar vários botões pressionados ao mesmo tempo
{
  case 0:
    telaBoasvindas();
    delay(2000);
    MudaEstado(1);
    break;
  case 1: //modo contínuo

    telaContinuo();
    if ((valorBotoes[0] ==0)&&(valorAnterior[0] ==1)) //botão X curto solto
    {
      reseta(); //reseta altura e contador?
    }
    if ((valorBotoes[0] ==2)&&(valorAnterior[0] ==1)) //botão X longo
    {
      MudaEstado(4); //vai para a tela de ajustar o foco
      Timer1.detachInterrupt();
    }

    if ((valorBotoes[1] ==0)&&(valorAnterior[1] ==1)) //botão P curto solto
    {
      MudaEstado(2); //vai para o modo passo
      Timer1.detachInterrupt();
    }
    if ((valorBotoes[1] ==2)&&(valorAnterior[1] ==1)) //botão P longo
    {
      MudaEstado(3); //vai para o ajuste do passo
      Timer1.detachInterrupt();
    }

    if ((valorBotoes[2] ==1)&&(valorAnterior[2] ==0)) //descer até soltar botão ou chegar na base
    {
      Timer1.attachInterrupt(desceContinuo);
      fimMov = 0;
      tMovInic = millis();
    }
    if ((valorBotoes[3] ==1)&&(valorAnterior[3] ==0)) //subir até soltar botão ou chegar no topo
    {
      Timer1.attachInterrupt(sobeContinuo);
      fimMov=0;
      tMovInic = millis();
    }

    }
  break;

  case 2: //modo passo
    telaPasso();
    if ((valorBotoes[0] ==0)&&(valorAnterior[0] ==1)) //botão X curto solto
    {
      reseta(); //reseta altura e contador

```

```

}
if ((valorBotoes[0] ==2)&&(valorAnterior[0] ==1)) //botão X longo
{
  MudaEstado(4); //vai para a tela de ajustar o foco
}

if ((valorBotoes[1] ==0)&&(valorAnterior[1] ==1)) //botão P curto solto
{
  MudaEstado(1); //vai para o modo contínuo
}
if ((valorBotoes[1] ==2)&&(valorAnterior[1] ==1)) //botão P longo
{

  MudaEstado(3); //vai para o ajuste do passo
}

if ((valorBotoes[2] ==1)&&(valorAnterior[2] ==0)) //descer 1 passada
{
  MudaEstado(21); //vai para o sub estado descendo uma passada
  fimMov=0;
  tMovInic = millis();
}
if ((valorBotoes[3] ==1)&&(valorAnterior[3] ==0)) // subir 1 passada
{
  MudaEstado(22); //vai para o sub estado subindo uma passada
  fimMov=0;
  tMovInic = millis();
}
break;

case 21: //descendo um valor determinado de passos
telaPasso();

if(fimMov==0)
{
  Timer1.attachInterrupt(descePasso);
}
else
{
  MudaEstado(2);
  contador = 0;
}
break;

case 22: //subindo um valor determinado de passos
telaPasso();

if(fimMov==0)
{
  Timer1.attachInterrupt(sobePasso);
}
else

```

```

{
  MudaEstado(2);
  contador = 0;
}
break;

```

case 3: //tela de ajuste do passo

```

telaAjustePasso(indiceAjuste);
if ((valorBotoes[0] ==1)&&(valorAnterior[0] ==0)) //botão X curto
{
  ajustePassada[0]= passadamm/100;
  ajustePassada[1]= (passadamm-ajustePassada[0]*100)/10;
  ajustePassada[2]= (passadamm-ajustePassada[0]*100-ajustePassada[1]*10)/1;
  ajustePassada[3]= (passadamm-ajustePassada[0]*100-ajustePassada[1]*10-ajustePassada[2])*10;
  ajustePassada[4]      =      round((passadamm-ajustePassada[0]*100-ajustePassada[1]*10-
ajustePassada[2]-float(ajustePassada[3])/10)*100);
  indiceAjuste = 0;
  passada = passadamm*100*relacao;
  MudaEstado(2); //volta para o estado 2
}
else
{
  if ((valorBotoes[1] ==2)&&(valorAnterior[1] ==1)) //botão P longo
  {
    indiceAjuste=0;
    passadamm
float(ajustePassada[0]*100+ajustePassada[1]*10+ajustePassada[2]+float(ajustePassada[3])/10
float(ajustePassada[4])/100);
    mudou=1;
    passada = passadamm*100*relacao;
    MudaEstado(2); //volta para o estado 2
  }

  if (((valorBotoes[1] == 0)&&(valorAnterior[1] == 1))) //botão p
  {
    indiceAjuste =indiceAjuste +1;
  }
  if(indiceAjuste>=5)
  {
    indiceAjuste=0;
  }

  if ((valorBotoes[3] ==1)&&(valorAnterior[3] ==0)) //botão subir
  {
    mudou=1;
    if(ajustePassada[indiceAjuste]= =9)
    {
      ajustePassada[indiceAjuste] =0;
    }
    else

```

```

    {
        ajustePassada[indiceAjuste] =ajustePassada[indiceAjuste]+ 1;
    }
}
if ((valorBotoes[2] ==1)&&(valorAnterior[2] ==0)) //botão descer
{
    mudou=1;
    if(ajustePassada[indiceAjuste]= =0)
    {
        ajustePassada[indiceAjuste] =9;
    }
    else
    {
        ajustePassada[indiceAjuste] =ajustePassada[indiceAjuste] -1;
    }
}

}

break;

case 4: //tela ajustar foco
telaFoco();
if ((valorBotoes[0] ==0)&&(valorAnterior[0] ==1)) //botão X curto
{
    MudaEstado(1); //volta para o estado 1 ou 2
}
if ((valorBotoes[3] ==1)&&(valorAnterior[3] ==0)) //botão subir
{
    contador = 0;
    foco = foco10*100; //foco em centésimos de mm
    lente = 10;
    MudaEstado(42); //vai para o sub estado 410 focando com a lente 10
}
if ((valorBotoes[2] ==1)&&(valorAnterior[2] ==0)) //subir descer
{
    contador = 0;
    foco = foco30*100; //foco em centésimos de mm
    lente = 30;
    MudaEstado(42); //vai para o sub estado 430 focando com a lente 30
}
break;

case 42:
telaFocando();
if((valorBotoes[0] ==1)&&(valorAnterior[0] ==0)) //se pressionar X volta pra estado anterior
{
    MudaEstado(estadoAnterior);
    referenciou =0;
    subir = false;
    Timer1.detachInterrupt();
    fimMov = 1;
}

```

```
}
else
{
  if(referenciou==0) //subindo para referenciar
  {
    if(subir==false)
    {
      tMovInic = millis();
      subir = true;
    }
    fimMov=0;
    Timer1.attachInterrupt(sobeContinuo);
    if(fimAlto!=1) //até tocar no sensor alto
    {
      fimMov = 1;
      referenciou = 1;
      contador = 0;
      reseta();
      delay(1000);
      tMovInic = millis();
    }
  }
  else //descendo para focar
  {
    fimMov = 0;
    Timer1.attachInterrupt(desceFoco);

    if((cont<foco*2)&&(fimBaixo==1))
    {
      }
    else //chegou na altura certa do passo
    {
      MudaEstado(2);
      referenciou = 0;
      cont=0;
      contador = 0;
    }
  }
}
break;
}
```