

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

Frank Ajata

**ANÁLISE DE EQUIPAMENTO PROTÓTIPO DE  
SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER PARA A FABRICAÇÃO  
DE PEÇAS POLIMÉRICAS COM GRADAÇÃO FUNCIONAL DE  
MATERIAL**

Florianópolis

2012



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE EQUIPAMENTO PROTÓTIPO DE  
SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER PARA A FABRICAÇÃO  
DE PEÇAS POLIMÉRICAS COM GRADAÇÃO FUNCIONAL DE  
MATERIAL**

Dissertação submetida à

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

Para a obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FRANK AJATA

Florianópolis, dezembro de 2012

Ajata, Frank

Análise de equipamento protótipo de Sinterização Seletiva a Laser para a Fabricação de Peças Poliméricas com Gradação Funcional de Material [dissertação] / Frank Ajata; orientador, Carlos Alberto Martin; co-orientador, Carlos Henrique Ahrens. - Florianópolis, SC, 2012.

244 p. ; 21 cm

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

Inclui referências

1. Introdução. 2. Revisão bibliográfica. 3. Descrição geral da metodologia. 4. Descrição da aplicação da metodologia. 5. Resultados e discussões.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE EQUIPAMENTO PROTÓTIPO DE  
SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER PARA A FABRICAÇÃO  
DE PEÇAS POLIMÉRICAS COM GRADAÇÃO FUNCIONAL DE  
MATERIAL**

**FRANK AJATA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

sendo aprovada em sua forma final.

---

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Eng. - Orientador

---

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. – Co-orientador

---

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng - Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Eng. – Presidente

---

Prof. Alexandre Lago, Dr. Rer. Nat

---

Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr. Eng.

---

Prof. Gean Vitor Salmória, Dr.



Dedico este trabalho a meus avós  
Victor Ajata Choque e Isabel Sosa Romero.

Esta dissertação representa o fruto de  
seus esforços na educação a seus filhos, mas  
também uma motivação para seus netos e  
bisnetos.





## AGRADECIMENTOS

Aos professores Carlos Alberto Martin e Carlos Henrique Ahrens pela orientação na realização desta dissertação.

A David Pimentel pela motivação na escolha do tema sob estudo e pela sua amizade.

Aos professores do colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pelo conhecimento transmitido nas aulas, em especial aos professores C.A. Martin, C.H. Ahrens, E. R. Pieri, D. Martins e A. Dias.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia através do CNPq pelo fomento à pesquisa e pela bolsa de estudo concedida.

Ao professor Dr. Alexandre Lago por sua disposição e valiosa informação na análise do equipamento sob estudo.

Aos colegas do laboratório LHW, em especial a Javier Reckmann e Daniel Ponce, pelo conhecimento e experiências compartilhadas.

Aos colegas do laboratório Cimject, em especial a Priscila Klauss e Rodrigo Paggi pela valiosa informação transmitida para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Aos meus colegas de aula Vitor Carreto e João Vitor Borges, por sua amizade e pelo apoio durante esta jornada.

A Nicole Portilla, pela colaboração com a leitura da primeira versão desta dissertação e por sua amizade.

Aos meus pais, Orlando Ajata e Mirta López, pela sua constante motivação e incentivo para atingir os meus sonhos.

Aos meus irmãos Lizette e Rolando por seu apoio e preocupação.

A minha esposa Georgina e meu filho Diego pelo apoio nos momentos difíceis e por aceitar o desafio de viver em um outro país, para alcançar meus desejos de conhecimentos.



*"Todo problema contém a semente de sua própria solução."*

Norman Peal

*"Se um produto deve corresponder às exigências do cliente, deve, em geral, ser produzido por um processo que seja estável ou replicável."*

Douglas C. Montgomery



## RESUMO

A presente dissertação descreve uma análise metodológica de um equipamento de manufatura aditiva, visando a redução da variabilidade do seu processo de fabricação. O equipamento, que tem sido utilizado para a geração de conhecimento de novos materiais e técnicas de fabricação, corresponde a um protótipo funcional desenvolvido para auxiliar na fabricação de corpos de prova poliméricos com variação espacial na sua composição material e estrutural por meio da técnica de sinterização seletiva a Laser. A metodologia utilizada, adaptada dos modelos de referência: ciclo PDCA para melhoria da qualidade e metodologia de análise e melhoria de processos, é apresentada em 3 etapas visando: 1) conhecer o processo de fabricação do equipamento; 2) identificar as causas dos problemas nele apresentados, procurando sua redução ou eliminação; e 3) procurar as causas da variabilidade do processo de fabricação e de seus parâmetros, apresentando propostas para sua redução ou eliminação. O resultado da aplicação da metodologia apresentou evidências de que as causas da variabilidade originam-se na concepção escolhida para o desenvolvimento do equipamento, na sua implementação e nas posteriores modificações realizadas para preencher novos requisitos. As soluções advindas da aplicação da metodologia permitirão definir ações para reduzir a variabilidade no processo de fabricação.

**Palavras-chave:** Análise de processos, Metodologia de Análise e Melhoria de Processos, Ciclo PDCA, Manufatura Aditiva, Prototipagem Rápida, Sinterização Seletiva a Laser, FGM.



## ABSTRACT

This research described the methodological analysis of an additive manufacture equipment aiming to reducing the variability in its manufacture processes. The equipment, which has been used to generate knowledge of new materials and fabrication techniques, is a functional prototype developed to help in the manufacture of polymeric test specimens with spatial variation in its material and structural composition through the Selective Laser Sintering. The methodology applied, adapted of reference models: PDCA cycle for improvement of the quality and the methodology of analysis and improvement of processes, is presented in three stages aiming: 1) know the equipment's fabrication process; 2) identify the causes of the problems seeking to reduce and eliminate them; and 3) search causes of the process variability in the manufacturing processes and its parameter, presenting proposals for its reduction. The results of applying the methodology presented evidences that the causes regarding lack of variability originate in the conception chosen to develop the equipment, in its implementation and in its subsequent modifications performed to meet new requirements. The solutions the methodology application will allow to define actions that decrease the variability in the manufacture processes.

**Keywords:** Analysis of process, Methodology for Analysis and Process Improvement, PDCA Cycle, Additive Manufacturing, Rapid Prototyping, Selective Laser Sintering. FGM.





## RESUMEN

El presente trabajo describe el análisis metodológico de un equipamiento de fabricación aditiva, con el objetivo de reducir la variabilidad en su proceso de fabricación. El equipamiento, que ha sido utilizado para la generación de conocimiento de nuevos materiales y técnicas de fabricación, corresponde a un prototipo funcional desarrollado para ayudar en la fabricación de cuerpos de prueba en polímeros con variación espacial en su composición material y estructural por medio de la técnica de sinterización selectiva a Láser. La metodología utilizada, adaptada de los modelos de referencia: ciclo PDCA para la mejoría de la calidad y metodología de análisis y mejoría de procesos, es presentada en 3 etapas, con los siguientes objetivos: 1) conocer el proceso de fabricación del equipamiento; 2) identificar las causas de los problemas buscando su reducción y eliminación; e 3) identificar las causas de la variabilidad del proceso de fabricación e de sus parámetros, presentando propuestas para su reducción o eliminación. El resultado de la aplicación de la metodología presentó evidencias de que las causas de la variabilidad se originan en la concepción escogida para el desarrollo del equipamiento, en su implementación y en las posteriores modificaciones realizadas para cumplir nuevos requisitos. Las soluciones derivadas de la aplicación de la metodología permitirán definir acciones para reducir la variabilidad en el proceso de fabricación.

**Palabras-claves:** Análisis de Processos, Metodología de Análisis y Mejoría de Procesos, Ciclo PDCA, Fabricación Aditiva, Prototipado Rápido, Sinterización Selectiva a Láser, FGM.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio de geração do objeto por prototipagem rápida.....	8
Figura 2.2 – Fluxograma de informação em processos de RP.....	10
Figura 2.3 – Princípio do processo de sinterização seletiva por Laser. ....	12
Figura 2.4 – FGM com variação contínua e descontínua. ....	17
Figura 2.5 – Fotografias do EP: vista geral e vista interior. ....	18
Figura 2.6 – As quatro fases do ciclo PDCA.....	22
Figura 2.7 – Ciclo de análise e melhoria de processos. ....	24
Figura 3.1 – Aplicação do ciclo PDCA para a análise da variabilidade no EP.....	32
Figura 3.2 – Estrutura das etapas propostas na metodologia.....	33
Figura 3.3 – Etapa 1: Conhecimento do processo .....	34
Figura 3.4 – Formulação das funções de um sistema .....	38
Figura 3.5 – Etapa 2: Análise e melhoria do EP.....	40
Figura 3.6 – Etapa 3: Análise da variabilidade do processo.....	48
Figura 3.7 – Diagrama de Causa e Efeito.....	49
Figura 4.1 – Identificação dos componentes do EP.....	55
Figura 4.2 – Esquema do processo de fabricação do EP. ....	58
Figura 4.3 – Peças fabricadas a partir de um/vários desenhos 2D e sem/com FGM .....	60
Figura 4.4 – Subprocessos da máquina-protótipo.....	63
Figura 4.5 – Função global e desdobramento da função global da MP .....	67
Figura 4.6 – Proposta de definição da função global do EP. ....	68
Figura 4.7 – Descomposição da função global em funções parciais .....	68
Figura 4.8 – Função parcial: “Gerar camada de pó na PC” .....	69
Figura 4.9 – Etapas da construção de peças sinterizadas.....	70
Figura 4.10 – Sequência de operação da máquina-protótipo.....	72
Figura 4.11 – Fluxograma de informação do EP.....	74
Figura 4.12 – Subprocesso computacional do EP. ....	75
Figura 4.13 – Diagrama de blocos das conexões elétricas do EP.....	76

Figura 4.14 – Gráfico de Pareto dos problemas do EP por subprocessos .....	87
Figura 4.15 – Fluxograma da metodologia de análise e melhoria dos problemas do EP .....	89
Figura 4.16 – Diagrama de Causa e Efeito para as causas comuns ou aleatórias de variabilidade do processo de fabricação .....	94
Figura 4.17 – Diagrama de Causa e Efeito para as causas especiais ou assinaláveis de variabilidade do processo de fabricação.....	95
Figura 4.18 – Árvore de falha para a variabilidade causada pela matéria-prima.....	97
Figura 4.19 – Variabilidade no acabamento superficial e na quantidade de pó no depositador para fabricação de peças sem/com FGM .....	97
Figura 4.20 – Variabilidade causada pelo reduzido espaço de operação para o operador e o carregamento do pó no depositador.....	98
Figura 4.21 – Árvore de falha para a variabilidade no subprocesso de carregamento de pó no depositador .....	99
Figura 4.22 – Carta de controle evidenciando um parâmetro dentro e fora das especificações de projeto .....	101
Figura 4.23 – Curvas de potências do Laser geradas através do <i>software</i> Alpha para diferentes valores de velocidade do feixe.....	103
Figura 4.24 – Curva da potência do feixe do Laser.....	104
Figura 4.25 – Curva da potência gerada pelo Laser em relação a sua temperatura de operação .....	105
Figura 4.26 – Curva de erro entre a potência medida e a potência comandada pelo <i>software</i> Alpha.....	105
Figura 4.27 – Determinação da curva teórica da potência do Laser.....	106
Figura 4.28 – Diferenças entre um sistema de sinterização tradicional e um sistema de marcação a Laser.....	107
Figura 4.29 – Variabilidade no tempo médio de gravação para um mesmo desenho. ....	109

Figura 4.30 – Variabilidade na velocidade informada no software Alpha para um mesmo desenho .....	109
Figura 4.31 – Mecanismo de deslocamento da PC.....	110
Figura 4.32 – Curva de deslocamento da mesa elevadora em relação ao deslocamento do parafuso.....	111
Figura 4.33 – Erro entre a curva linear e a curva da altura da mesa elevadora medida em relação à distância da lente focal.....	113
Figura 4.34 – Localização dos sensores de temperatura no EP .....	115
Figura 4.35 – Curva da temperatura sobre a superfície da camada causada pela resistência elétrica .....	115
Figura 4.36 – Curva da temperatura sobre a camada de pó causada pelas lâmpadas IR .....	117
Figura 5.1 – Ilustração de problemas no deslocamento do depositador .....	131
Figura 5.2 – Ilustração da deposição da camada de pó.....	133
Figura 5.3 – Ilustração de problemas na geração da camada de pó.....	134
Figura 5.4 – Ilustração da localização dos sensores de temperatura no interior da câmara de fabricação .....	136
Figura 5.5 – Ilustração dos componentes do subsistema de aquecimento ...	136
Figura 5.6 – Ilustração dos problemas no subsistema de sinterização.....	139
Figura 5.7 – Ilustração dos problemas para fabricar peças com FGM no subprocesso de sinterização .....	140
Figura 5.8 – Ilustração de problemas de nivelamento da PC.....	142
Figura 5.9 – Ilustração de problemas no subprocesso de deslocamento da PC durante o modo de avanço e modo de retrocesso .....	143
Figura 5.10 – Resumo da variabilidade do subprocesso de carregamento de pó no depositador .....	145
Figura 5.11 – Resumo da variabilidade do subprocesso de deslocamento do depositador.....	147
Figura 5.12 – Resumo da variabilidade do subprocesso de geração da camada de pó .....	149

Figura 5.13 – Resumo da variabilidade do subprocesso de aquecimento no interior da câmara de fabricação .....	150
Figura 5.14 – Resumo da variabilidade do subprocesso de sinterização da camada de pó .....	152
Figura B3.1 - Procedimento para geração de desenhos centrados na PC.....	193
Figura B3.2 - Procedimento para geração de desenhos em um mesmo eixo..	193
Figura B4.1 – Módulo de planejamento da trajetória do <i>software</i> Alpha64 ..	194
Figura B5.1 – Módulo de planejamento da trajetória do <i>software</i> Alpha66. ..	195
Figura B6.1 – Módulo de sinterização a Laser do <i>software</i> Alpha64. ....	196
Figura B7.1 – Modulo de fabricação e controle dos parâmetros do Processo do <i>software</i> Alpha66. ....	197
Figura C1.1 – Princípio de funcionamento do EP .....	201
Figura C1.2 – Sinal de controle da potência do Laser .....	203
Figura C2.1 – Ilustração de um feixe de Laser normal ao plano da superfície de uma camada.....	204

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre dois equipamentos comerciais.....	15
Tabela 2.2 – Sumário do processo de melhoria incremental do PDP .....	21
Tabela 2.3 – Sumário do ciclo PDCA para melhoria da qualidade.....	23
Tabela 2.4 – Sumário do ciclo de análise e melhoria de processos.....	25
Tabela 2.5 – Comparação entre metodologias de análise e melhoria de processos de fabricação.....	27
Tabela 2.6 – Conhecimento do processo da MAMP.....	28
Tabela 2.7 – Técnicas para mapeamento do processo .....	29
Tabela 2.8 – Fase de definição do processo.....	29
Tabela 3.1 – Ferramenta de qualidade – 5W1H.....	36
Tabela 4.1 – Características do produto final do EP.....	60
Tabela 4.2 – Matérias-primas utilizadas no EP.....	61
Tabela 4.3 – Compósitos utilizados para FGM no EP.....	61
Tabela 4.4 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de carregamento de pó.....	63
Tabela 4.5 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de geração da camada.....	64
Tabela 4.6 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de aquecimento da camada.....	64
Tabela 4.7 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de sinterização seletiva a Laser .....	65
Tabela 4.8 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de deslocamento da PC .....	65
Tabela 4.9 – Mapeamento dos subprocessos críticos.....	66
Tabela 4.10 – Listagem com os problemas reportados do EP .....	78
Tabela 4.11 – Listagem com os problemas relatados por usuários do EP em entrevistas .....	80

Tabela 4.12 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de carregamento de pó.....	83
Tabela 4.13 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de deslocamento do depositador.....	83
Tabela 4.14 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de geração da camada.....	83
Tabela 4.15 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de aquecimento da camada.....	84
Tabela 4.16 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de sinterização da camada.....	84
Tabela 4.17 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de deslocamento da PC.....	85
Tabela 4.18 – Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso computacional.....	85
Tabela 4.19 – Priorização dos subprocessos segundo a frequência dos problemas citados.....	86
Tabela 4.20 – Formato para resumo da análise dos 51 problemas.....	88
Tabela 4.21 – Aplicação da MAMP para o problema prioritário do subprocesso computacional do EP.....	90
Tabela 4.22 – Cálculo da altura da mesa elevadora em função do deslocamento do parafuso.....	112
Tabela 4.23 – Planejamento dos experimentos para outros parâmetros de fabricação.....	118
Tabela 4.24 – Parâmetros de máquina e de processo aplicáveis ao EP.....	121
Tabela 4.25 – Propostas de soluções às causas raízes de variabilidade.....	124
Tabela 4.26 – Listagem dos procedimentos desenvolvidos para o EP.....	127
Tabela 5.1 – Propostas de melhoria para o subprocesso de carregamento do pó.....	130
Tabela 5.2 – Propostas de melhoria para o subprocesso de deslocamento do depositador.....	132



Tabela 5.3 –	Propostas de melhoria para o subprocesso de geração da camada de pó .....	135
Tabela 5.4 –	Propostas de melhoria para o subprocesso de aquecimento ....	138
Tabela 5.5 –	Propostas de melhoria para o subprocesso de sinterização .....	141
Tabela 5.6 –	Propostas de melhoria para o subprocesso de deslocamento da PC.....	144
Tabela A1 –	Resumo da evolução do equipamento-protótipo do laboratório Cimject .....	174
Tabela A2 –	Ferramenta 5W1H – Subprocessos que acontecem no EP .....	176
Tabela B1 –	Listagem dos experimentos desenvolvidos na etapa 2 da metodologia .....	189
Tabela B2 –	Características do sistema de monitoramento e aquisição de dados .....	198
Tabela C1 –	Determinação do valor de $T_3$ a partir da informação de velocidade do Laser selecionada no software Alpha.....	206
Tabela C2 –	Resumo das especificações do Equipamento-Portótipo melhoria de processos de fabricação .....	210



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS EM PORTUGUÊS**

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCQ	-	Círculo de Controle da Qualidade
CEP	-	Controle Estatístico dos Processos
DE	-	Densidade de Energia
EP	-	Equipamento Protótipo
EVFL	-	Estratégia de Varredura do Feixe do Laser
FE	-	Função Elementar
FP	-	Função Parcial
GUT	-	Gravidade, Urgência e Tendência
GQT	-	Gestão pela Qualidade Total
IBQN	-	Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear
INMETRO	-	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LabMat	-	Laboratório de Materiais
MAMP	-	Metodologia de Análise e Melhoria de Processos
MP	-	Máquina-Protótipo
PC	-	Plataforma de Construção
PF	-	Plataforma Fixa
REP	-	Relatório do Equipamento-Protótipo
RF	-	Rádio Frequência
SC	-	Sistema Computacional
STJ	-	Supremo Tribunal de Justiça
TEFL	-	Tempo de Exposição ao Feixe do Laser
VR	-	Valor de um Registro Interno no computador
VVFL	-	Velocidade de Varredura do Feixe do Laser

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS EM INGLÊS

2D	- <i>Two-Dimensional</i>	- Bidimensional
3D	- <i>Three-Dimensional</i>	- Tridimensional
BMP	- <i>Windows Bit Map</i>	- Mapa de Bits
CAD	- <i>Computer-Aided Design</i>	- Projeto Auxiliado por Computador
CAM	- <i>Computer-Aided Manufacturing</i>	- Fabricação Auxiliada por Computador
Cinject	- <i>Computer Integrated Manufacturing of inJECTed plastic components</i>	- Laboratório de projeto e fabricação de componentes de plástico injetados
CW	- <i>Continuous Wave</i>	- Onda Contínua
DOE	- <i>Design Of Experiments</i>	- Planejamento de Experimentos
FGM	- <i>Functionally Graded Material</i>	- Material com Gradação Funcional
HDPE	- <i>High Density PolyEthylene</i>	- Polietileno de Alta Densidade
IR	- <i>Infra Red</i>	- Infravermelho
Laser	- <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>	- Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
LM	- <i>Layered Manufacturing</i>	- Manufatura por Camadas
LPD	- <i>Laser Powder Deposition</i>	- Deposição de pó Direta por Laser
MMLM	- <i>Múlti-Material Layered Manufacturing</i>	- Manufatura Múlti material por Camadas
PDCA	- <i>Plan-Do-Check-Act</i>	- Planejar-Executar-Verificar-Agir
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i>	- Modulação por Largura do Pulso
RM	- <i>Rapid Manufacturing</i>	- Manufatura Rápida
RP	- <i>Rapid Prototyping</i>	- Prototipagem Rápida
RT	- <i>Rapid Tooling</i>	- Ferramental Rápida
SFF	- <i>Solid Freeform Fabrication</i>	- Fabricação de Sólidos em Forma Livre.
SLS	- <i>Selective Laser Sintering</i>	- Sinterização Seletiva a Laser
STL	- <i>STereoLithography file</i>	- arquivo de eSTereoLitografia
TQC	- <i>Total Quality Control</i>	- Controle de Qualidade Total
TXT	- <i>TeXT file</i>	- arquivo de TeXTo
VB	- <i>Visual Basic</i>	

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivo Geral.....	3
1.1.2	Objetivos específicos .....	3
1.2	Estrutura do trabalho.....	4
2	Revisão bibliográfica .....	5
2.1	Manufatura aditiva.....	5
2.1.1	Processos aditivos de fabricação.....	5
2.1.2	Prototipagem rápida .....	7
2.1.2.1	Princípios básicos de um processo de RP .....	7
2.1.2.2	Fluxo de informação e trabalho em um processo de RP .....	8
2.1.3	Sinterização seletiva a Laser.....	9
2.1.3.1	Processo de SLS.....	11
2.1.3.2	Equipamentos comerciais de SLS .....	14
2.1.4	Material com gradação funcional.....	15
2.1.5	Equipamento sob análise.....	17
2.1.6	Variabilidade.....	19
2.2	Metodologias para análise e melhoria de processos de fabricação .....	20
2.2.1	Processo de melhoria incremental do processo de desenvolvimento de produtos.....	21
2.2.2	Ciclo PDCA para melhoria da qualidade .....	22
2.2.3	Metodologia de análise e melhoria de processos .....	24
2.2.4	Comparação entre metodologias de análise e melhoria de processos de fabricação.....	25
2.2.5	Metodologia para o levantamento de conhecimento de um processo de fabricação .....	28
2.3	Resumo do capítulo .....	30
3	Descrição geral da metodologia utilizada .....	31
3.1	Considerações iniciais.....	31





5.2 Discussões .....	154
5.2.1 Discussões em relação aos parâmetros de fabricação .....	154
5.2.2 Discussões em relação à melhoria do EP .....	156
6 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros .....	157
6.1 Conclusões finais .....	157
6.2 Recomendações para trabalhos futuros.....	160
7 Referências .....	161
Apêndice A - Documentos gerados pela aplicação da metodologia	
na etapa 1 .....	169
Apêndice B - Documentos gerados pela aplicação da metodologia	
na etapa 2 .....	187
Apêndice C – Princípio de funcionamento do EP e determinação do cálculo	
da densidade de energia .....	199



## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, novos processos e técnicas de fabricação têm permitido o desenvolvimento de materiais com novas estruturas e propriedades, tanto físicas quanto mecânicas, com o objetivo de melhorar o desempenho em alguma aplicação específica. Dentre esses novos tipos de materiais encontram-se os denominados Materiais com Gradação Funcional (FGM), nos quais, durante o processo de fabricação se impõe uma variação gradual projetada da composição e/ou estrutura ao longo da sua geometria.

Dentre os processos de fabricação desses novos materiais encontra-se a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), que corresponde a um tipo de processo de fabricação aditiva, denominada de Prototipagem Rápida (RP), que permite fabricar peças a partir de matéria-prima em pó, camada por camada, com características definidas por seus parâmetros de fabricação.

Equipamentos de SLS existem comercialmente desde 1992, que têm permitido fabricar peças em metal, cerâmica e polímeros, mas ainda não existem equipamentos de SLS comerciais para fabricar peças com FGM.

Em função de sua importância e pela inexistência desse tipo de equipamentos, o seu desenvolvimento tem merecido a atenção de instituições brasileiras e estrangeiras.

Neste contexto, o Laboratório Cimject em parceria com o laboratório LabMat, ambos da UFSC, vem desenvolvendo e adaptando, desde 2003, um Equipamento-Protótipo (EP) de SLS para fabricar peças com FGM, visando atender às exigências na pesquisa de novos materiais e técnicas de fabricação.

A principal função do EP tem sido a fabricação de corpos de prova que permita avaliar a processabilidade de materiais poliméricos em pó obtidos no próprio laboratório, através do processo de SLS utilizando a técnica de FGM. Os corpos de prova gerados por esse processo têm sido caracterizados física e mecanicamente para as mais diversas aplicações (engenharia tecidual, componentes antifricção, componentes no setor aeroespacial, implantes para liberação de fármacos, etc.), contribuindo para o conhecimento nessa área através de trabalhos de dissertação, teses e artigos científicos tanto nacionais quanto internacionais.

No entanto, diversos problemas têm sido reportados em relação ao processo de fabricação no EP, entre eles: (i) elevadas dispersões nas medições obtidas em ensaios mecânicos, (ii) diferenças dimensionais em relação aos valores do modelo computacional, e (iii) incapacidade de

variar a potência do Laser durante a sinterização sobre a composição de diferentes misturas de material em uma mesma camada, limitando os materiais a serem misturados através da técnica de FGM.

Na situação atual, o EP não permite garantir a fabricação de dois ou mais corpos de prova iguais, em outras palavras, o EP não consegue fabricar com repetitividade geométrica e microestrutural (composição e/ou estrutura).

Por outro lado, a falta de repetitividade nos corpos de prova, devida a falhas ou alterações geométricas ou microestruturais, decorrentes do processo ou do equipamento de fabricação, pode influenciar até mesmo alterar drasticamente o seu comportamento mecânico. Dessa forma, assegurar a repetitividade durante o processo de fabricação pode contribuir a uma adequada avaliação das propriedades mecânicas dos corpos de prova através de ensaios de repetitividade mecânica. Um aumento da repetitividade na fabricação de corpos de prova pode ser atingido por meio da redução ou eliminação da variabilidade de seu processo de fabricação.

Dessa forma a presente dissertação procura analisar o EP visando determinar as causas que geram variabilidade no processo e nos parâmetros de fabricação dos corpos de prova sem/com FGM que possam influenciar a sua repetitividade geométrica e microestrutural.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar um equipamento de sinterização seletiva a Laser para a fabricação de peças com gradação funcional de material visando garantir a repetitividade de seu processo de fabricação através da redução da variabilidade de seu processo de fabricação, mediante o emprego de uma metodologia de análise e melhoria de processos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar e analisar os problemas apresentados no equipamento de sinterização seletiva a Laser e as causas que os originam, propondo soluções de melhoria.
- Identificar e analisar as causas que possam estar influenciando na variabilidade do processo de fabricação, propondo soluções para sua redução ou eliminação.
- Identificar e analisar as limitações do equipamento para fabricar peças com gradação funcional de material.
- Propor ou adaptar uma metodologia de análises para o processo de fabricação.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. O capítulo I apresenta uma introdução geral e os objetivos geral e específicos a serem atingidos. O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica dos principais conceitos envolvidos com o presente estudo, divididos em duas seções: Manufatura Aditiva e Metodologias Para Análise e Melhoria de Processos de Fabricação. O capítulo III descreve a metodologia a ser aplicada, adaptada dos modelos de referência descritos no capítulo II, a qual foi dividida em 3 etapas: (i) conhecimento do processo, (ii) análise e melhoria do processo e (iii) análise da variabilidade do processo. O capítulo IV apresenta os resultados da aplicação da metodologia descrita no capítulo III. O capítulo V descreve os resultados e discussões obtidos para cada uma das etapas 2 e 3 do capítulo IV. Finalmente o capítulo VI apresenta as conclusões da aplicação da metodologia e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo será apresentado uma análise da informação bibliográfica pesquisada, que foi dividida em informação do processo de fabricação e informação sobre metodologias de análise para processos de fabricação.

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

#### 2.1.1 Processos aditivos de fabricação

Os processos de fabricação mecânicos para geração de objetos<sup>1</sup> tridimensionais podem ser classificados em: (i) conservativos, no qual a forma do objeto é obtida pela deformação do material por meio da aplicação de forças; (ii) subtrativos, no qual a forma do objeto é obtida pela remoção de material a partir de um bloco maciço; e (iii) aditivos, no qual a forma do objeto é obtida pelo incremento sucessivo de material (VENUVINOD; MA, 2004). É precisamente através de processos aditivos que se baseiam as tecnologias de fabricação denominadas de Prototipagem Rápida (RP - *Rapid Prototyping*), desenvolvidas na década de 80 devido ao progresso alcançado em fotopolímeros, em tecnologias de Laser e em *software* de modelagem CAD, entre outras, sendo o primeiro equipamento comercializado em 1987 pela 3D Systems sob a sigla SLS (StereoLitography Apparatus) (LÜ; FUH; WONG, 2001; VENUVINOD, 2004; LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003; VOLPATO e tal, 2007).

Após três décadas de descobertas, desenvolvimentos e adaptações de novos métodos e tecnologias para a produção de objetos por adição de material, diversas denominações e classificações têm sido usados para se referir a esse grupo de tecnologias, como foi constatado na diversa literatura técnica pesquisada. Uma primeira, originada segundo a função (ou aplicação) que as novas tecnologias forneceram para o auxílio no desenvolvimento rápido de produtos, deu origem aos termos: prototipagem rápida (RP), ferramental rápido (RT) e manufatura rápida (RM) (KAPARATIS; GRIETHUYSEN; GLARDON, 1998; GEBHARDT, 2003; VOLPATO, 2007; LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003). Uma segunda, originada pela forma em que os objetos são

---

<sup>1</sup> Os termos objeto, modelo e peça, são usados indistintamente pelos autores para se referir ao produto final de um processo de manufatura. Contudo, os termos corpo de prova (nos testes de avaliação) e peça (no produto final), serão usados no percurso da dissertação para se referir aos produtos fabricados pelo equipamento sob estudo.

construídos, deu origem aos termos: fabricação de sólidos em forma livre (SFF) (WU et al, 1996; SEARS, 1999; EVANS; YANG, 2004, 2007, 2009), manufatura por camadas (LM- Layered Manufacturing) (KRUTH e tal, 2007) e deposição de pó direta por Laser (LPD-Laser Powder Deposition) (COSTA; VILAR, 2009).

Outras classificações para agrupar esses novos métodos baseiam-se no princípio de funcionamento, nas tecnologias aplicadas no seu desenvolvimento (ex.: Laser<sup>2</sup>, jato de tinta, etc.) ou no estado inicial da matéria-prima (líquido, sólido ou em pó) propostas por Gebhardt (2003), Chua, Leong e Lim (2004) e Volpato et al (2007). A descrição detalhada dos principais processos aditivos é amplamente tratada por vários autores (GEBHARDT, 2003; VENUVINOD; MA, 2004; CHUA; LEONG; LIM, 2004; VOLPATO et al, 2007).

Observa-se também, que alguns autores propuseram denominações com base na composição espacial tridimensional (EVANS; YANG, 2004; LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003), o que deu origem a novos termos de fabricação, como as denominadas de material com gradação funcional e fabricação de forma livre de sólidos multimateriais (KUMAR et al, 2004). Uma definição mais abrangente para se referir a esses novos métodos é apresentada por Wohlers (2009, p.10, tradução nossa<sup>3</sup>):

A manufatura aditiva refere-se a um grupo de tecnologias usadas para construir modelos físicos, moldes, componentes de ferramentas e peças de produção – a partir de dados CAD 3D, sistemas de escaneamento 3D, scanner médicos, ou jogos de vídeo. Diferente dos processos de usinagem, que são de natureza subtrativas, os sistemas de manufatura aditiva unem líquido, pó, ou camadas de material para formar objetos. [...] Baseado em finas camadas, fatias de seções horizontais tomadas de modelos 3D em computador, os sistemas de manufatura aditiva produzem peças em plástico, metal, cerâmica, ou compósitos, camada sobre camada.

---

<sup>2</sup> O termo Laser, sendo o acrônimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, será grafado apenas com a letra inicial em maiúscula, de acordo com o manual de padronização de textos do Superior Tribunal de Justiça (STJ), dada a inexistência de convenção pela ABNT ou pelos responsáveis pela política da língua portuguesa.

<sup>3</sup> A expressão “tradução nossa”, após da chamada da citação, é utilizada quando a citação inclui texto traduzido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, p.3).

Neste trabalho, o termo prototipagem rápida será utilizado para se referir a essa tecnologia de fabricação, por ser o tipo de objeto que o equipamento sob estudo é capaz de fabricar.

### **2.1.2 Prototipagem rápida**

A Prototipagem Rápida (RP), segundo Lü, Fuh e Wong (2001), refere-se a um grupo genérico de tecnologias emergentes que permitem a fabricação rápida de componentes de engenharia visando aplicações de prototipagem, cujas peças são produzidas por um processo aditivo, através da criação gradual ou adição de material sólido.

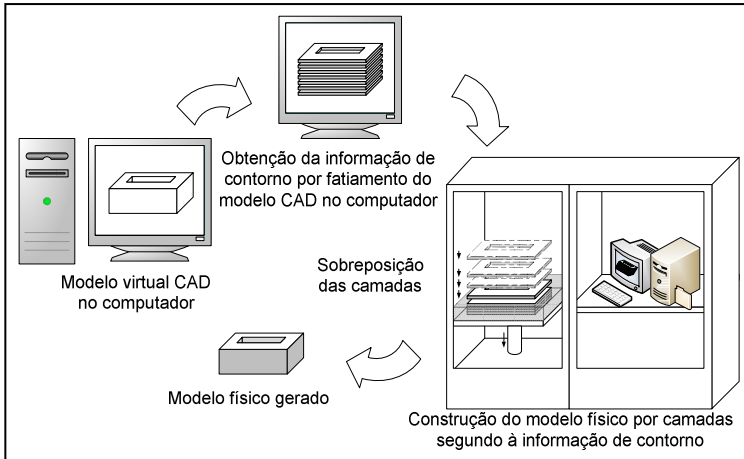
Já Groover (2010, p. 787) define RP como uma família de métodos de fabricação para fazer protótipos de engenharia no menor tempo possível baseado no projeto auxiliado por computador (CAD) do modelo da peça.

A RP combina tecnologias (ex.: Laser, fotoquímica, entre outros) e computação gráfica para fabricar direta e rapidamente objetos 3D complexos desde arquivos CAD, tomografias computadorizadas, imagens de ressonância magnética e outras fontes de dados.

#### **2.1.2.1 Princípios básicos de um processo de RP**

Segundo Venuvinod (2004, p.15), o desenvolvimento comercial da RP só foi possível pelo progresso de modelos computadorizados 3D, assim como pela acessibilidade a novas tecnologias, novos materiais e computadores cada vez mais poderosos. Contudo, a RP é um campo multidisciplinar da engenharia, sendo as suas máquinas de natureza mecatrônica.

Conforme sustenta Gebhardt (2003, p.29), todos os processos de RP relevantes industrialmente, trabalham produzindo simples camadas e unindo-as para formar uma peça. Dessa forma os processos de RP podem ser considerados processos 2½ D, isso é, contornos 2D acrescidos de espessura constante. Então, a camada é formada em um plano bidimensional x-y e a terceira dimensão resulta de uma simples camada sendo adicionada uma por sobre a anterior, mas não como uma coordenada z contínua. A figura 2.1 ilustra o princípio de geração do modelo físico gerado a partir de um modelo virtual em um arquivo CAD.



**Figura 2.1 – Princípio de geração do objeto por prototipagem rápida**

Fonte: Adaptado de Gebhardt (2003)

### 2.1.2.2 Fluxo de informação e trabalho em um processo de RP

O fluxo de informação em um processo de RP é definido pela cadeia de informações requeridas pelo processo para atingir o objetivo de fabricação, sendo a cadeia de trabalho as atividades requeridas para o processamento e sua adequação.

A Society of Manufacturing Engineers (2004, p.50) identificou cinco passos comuns nos processos de RP: (i) geração do arquivo STL; (ii) verificação e reparação do arquivo; (iii) criação do arquivo de construção; (iv) construção da peça; e (v) limpeza e acabamento da peça. No mesmo sentido, Chua, Leong e Lim (2004, p.11) descrevem o mesmo processo em três passos: (i) modelagem da peça em um sistema CAD/CAM; (ii) conversão do arquivo CAD no formato STL; e (iii) análise do arquivo STL, fatiamento do modelo digital e fabricação sistemática de cada fatia.

Uma descrição mais detalhada é fornecida por Gebhardt (2003, p. 30), que identificou dois passos fundamentais no processo de RP:

- geração da informação matemática das camadas, que inclui: (i) descrição da geometria da peça em arquivos de dados 3D, por meio de sistemas CAD 3D; (ii) geração da informação geométrica de cada camada, obtida pelo fatiamento e pela identificação dos contornos; e (iii)



projeção da informação geométrica de uma camada em função da espessura desejada; e

- geração do modelo físico por camadas, que inclui: (i) a geração física de cada camada no plano x-y; e (ii) a união da camada gerada com a precedente, na direção z.

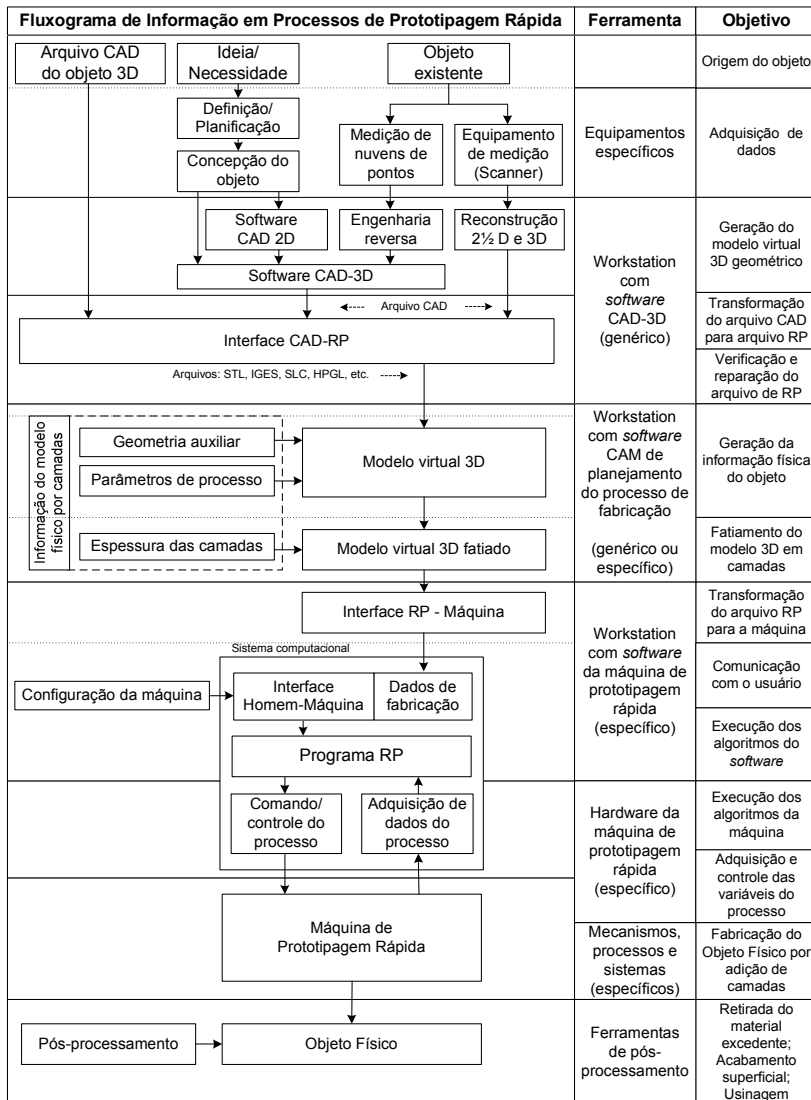
Na figura 2.2 é apresentado o fluxo de informação em processos de RP, baseado nos trabalhos da Society of Manufacturing Engineers (2004), Chua, Leong e Lim (2004) e Gebhardt (2003).

O fluxograma de informação inicia-se com a ideia ou necessidade do produto, com o objeto existente a ser reproduzido ou com o arquivo digital do objeto modelado em um arquivo CAD. Cada origem diferente para um objeto, irá requerer um pré-processamento específico para gerar o arquivo digital com o modelo virtual da geometria desejada. A seguir, um *software* CAD 3D transformará esse arquivo em um arquivo compatível com o *software* de planejamento do processo de RP, através do qual serão adicionadas as informações do processo (geometria auxiliar e parâmetros do processo de RP), para seu fatiamento após indicada a espessura de cada camada.

O *software* da máquina de RP utilizará o arquivo digital resultante do *software* de planejamento do próprio processo de RP, além das informações da configuração da máquina para executar a sequência de fabricação até obter o objeto físico. Segundo a tecnologia empregada e o uso que terá o objeto final, pode ser necessário realizar trabalhos de pós-processamento (ex.: retirada do material excedente, acabamento superficial, usinagem, entre outros).

### 2.1.3 Sinterização seletiva a Laser

O processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS – *Selective Laser Sintering*) é uma técnica de fabricação de RP que utiliza matéria-prima em pó (metálico, cerâmico, polimérico e recentemente biomateriais) para fabricar peças 3D, camada por camada, utilizando a energia de um **Laser** para fundir (completa ou parcialmente), amolecer ou unir as partículas de pó de forma **seletiva**, segundo uma trajetória percorrida por um feixe de Laser contida em um arquivo digital gerado previamente em um sistema CAD, conforme mencionado anteriormente. De acordo com Kang (2005, p.3) a **sinterização** é uma técnica de processamento usada para produzir peças com densidade controlada de material, pela aplicação da energia térmica nas partículas de pó, o que



**Figura 2.2 – Fluxograma de informação em processos de RP**

Fonte: Criado a partir dos diagramas Society of Manufacturing Engineers (2004), Chua, Leong e Lim (2004) e Gebhardt (2003)

permite gerar peças com microestruturas desejadas. Para Das (2008, p.229) o processo de sinterização é caracterizado pela coalescência<sup>4</sup> das partículas na região escaneada da camada de pó, resultante da aplicação de um feixe de Laser e uma fonte de energia térmica.

Tomando como exemplo a sinterização de materiais metálicos, Venuvinod (2004, p. 245) divide o processo de SLS em dois tipos: (i) SLS direta, em que um material em pó metálico é diretamente aquecido pela elevada energia fornecida pelo feixe de um Laser; e (ii) SLS indireta, em que o material em pó (metálicos) é revestido com um material termoplástico, o qual flui a uma temperatura acima de sua temperatura de transição vítrea pela exposição ao Laser, unindo as partículas de pó através da união polímero-polímero.

Das (2008) e Venuvinod (2004) também descrevem o efeito de duas partículas de pó em contato durante o processo de sinterização e a sua evolução dimensional.

### 2.1.3.1 Processo de SLS

O processo de SLS pode ser dividido em 4 etapas: (i) pré-processamento da peça a ser construída, (ii) preparação do processo de fabricação, (iii) fabricação da peça desejada; e (iv) pós-processamento (LÜ; FUH; WONG, 2001, p.92) (CHUA; LEONG; LIM, 2004, p.176).

O pré-processamento da peça inclui a informação geométrica e estrutural da peça.

A preparação do processo de fabricação inclui a adição das matérias-primas ou misturas no depósito de pó no interior da câmara de alimentação, e o aquecimento da câmara de construção, cuja temperatura deversa ser menor à temperatura requerida pelo processo de sinterização, o qual dependerá do material a ser processado. Segundo Hornsby e Maxwell (1992) e Bellehumeur e Vlachopoulos, apud Leite (2007), para polímeros amorfos a temperatura do processo de sinterização é acima da temperatura de transição vítrea, enquanto para polímeros semicristalinos é acima da temperatura de fusão.

A fabricação da peça desejada é iniciada com a deposição de uma fina camada de pó no interior da câmara de construção e com o nivelamento do pó por meio do deslocamento de um rolo sobre a camada de pó. Posteriormente um feixe de Laser é direcionado por um

---

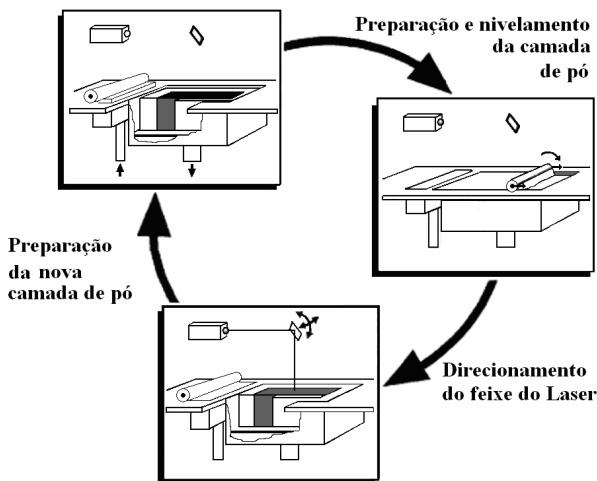
<sup>4</sup> A coalescência é um mecanismo de densificação e de engrossamento envolvendo contato entre grãos durante a sinterização em fase líquida, contribuindo ao incremento no tamanho médio dos grãos e à redução no seu número, em forma contínua (GERMAN, 1985).

conjunto de espelhos sobre a camada, percorrendo uma trajetória predefinida no computador, conferindo a energia termal requerida para o processo de sinterização. A seguir, o rolo espalha e nivela uma nova camada de pó, repetindo todo o processo nas camadas subsequentes, até completar a fabricação da peça. A figura 2.3 ilustra esse processo.

O pós-processamento da peça inclui a retirada do pó não sinterizado, o acabamento superficial e/ou a infiltração de líquidos na peça final para melhoramento de suas propriedades mecânicas.

### Elementos principais de um processo SLS

Segundo descrito por Lü, Fuh e Wong, (2001, p.91), Venuvinod (2004, p.245), Society of Manufacturing Engineers (2004, p.166) e Chua, Leong e Lim, (2004, p.176), os principais elementos identificáveis no processo de SLS são: um computador, que contém o arquivo 3D da peça desejada e o *software* do sistema de RP, uma câmara e uma plataforma de construção, uma câmara de alimentação de pó, um elemento de deposição de pó em camadas, um elemento para espalhamento e nivelamento da camada de pó, um aquecedor de radiação infravermelha, um Laser de CO<sub>2</sub> ou Nd-YAG, um conjunto de espelhos para escaneamento do feixe do Laser, e um elemento de deslocamento da plataforma de construção.



**Figura 2.3 - Princípio do processo de sinterização seletiva por Laser**

Fonte: Adaptado de Gebhardt (2003)

### Parâmetros do processo de SLS

Segundo Kang (2005, p.3, 7), o propósito da SLS é produzir peças sinterizadas reproduzíveis e, se possível, com microestrutura desejada, através do controle das variáveis da sinterização, que podem ser divididas em duas categorias: (i) variáveis do material, que inclui a composição química, o tamanho, a forma, a distribuição e o grau da aglomeração do pó, entre outras; e (ii) variáveis do processo, tais como a temperatura da camada, o tempo de exposição ao feixe do Laser, a atmosfera de trabalho, o grau de compactação e a velocidade de aquecimento e resfriamento da camada. Por sua vez, Gibson e Shi (1997) descrevem alguns parâmetros do processo que estão diretamente relacionados às propriedades do pó, entre eles: (i) a temperatura da camada, (ii) a potência do feixe do Laser, (iii) a velocidade do feixe do Laser, com o Laser ligado, (iv) a distância entre linhas paralelas sinterizadas, e (v) a espessura da camada.

Por outro lado, para Lü, Fuh e Wong (2001), os parâmetros que afetam a qualidade da peça sinterizada são: (i) a densidade de energia<sup>5</sup> do Laser; e (ii) a absorvância<sup>6</sup> do material.

### Vantagens e desvantagens do processo de SLS

De acordo com Lü, Fuh e Wong (2001), a SLS é a mais promissora entre as técnicas de RP, principalmente por permitir o processamento de uma grande variedade de materiais e de misturas, possibilitando produzir ferramentas de moldagem (ferramental rápido) e manufaturar produtos especializados e funcionais (manufatura rápida).

De acordo com Steen e Mazumder (2010, p.360) entre as vantagens do processo de SLS encontram-se: (i) a variedade de materiais usados, já que qualquer pó que possa ser sinterizado ou ligado sem fundir, pode ser utilizado; (ii) a não toxicidade dos materiais comumente disponíveis, (iii) não uso de estruturas de suporte adicional, (iv) a precisão alcançada, em torno de  $0,25 \pm 0,05$  mm; (v) a elevada velocidades de fabricação, na faixa de 12 a 25 mm/h; e (vi) a completa automação de seus processos de fabricação.

Entre as desvantagens os autores citam: (i) a dependência do tamanho e da complexidade da peça fabricada; (ii) a rugosidade no acabamento superficial, se comparado com o obtido por estereolitografia; (iii) a baixa resistência mecânica, devido à porosidade das peças fabricadas; (iv) o custo elevado do equipamento; (v) a

<sup>5</sup> definida em função da potência, da velocidade da varredura e do diâmetro do feixe de Laser.

<sup>6</sup> definida como a proporção de radiação absorvida da radiação incidente.

dificuldade da limpeza da peça fabricada, devido à aderência de pó em regiões confinadas; (vi) o encolhimento da peça, que pode criar tensões residuais causando distorção e fissuras; e (vii) o requerimento de uma atmosfera inerte para evitar oxidação, combustão ou explosão, dependendo do material utilizado.

Chua, Leong e Lim, (2004, p.174) acrescentam entre as desvantagens: (vii) as elevadas dimensões do sistema de fabricação; e (viii) o grande consumo de energia requerido pelo Laser durante a sinterização e o aquecimento da câmara de construção.

### 2.1.3.2 Equipamentos comerciais de SLS

Gebhardt (2003), Society of Manufacturing Engineers (2004) e CHUA, LEONG e LIM (2004) têm descrito equipamentos comerciais de SLS, fornecendo uma ampla informação de suas características e de seus processos básicos de fabricação. Dentre as empresas fornecedoras desses equipamentos encontram-se: (i) 3D Systems Corporation, com as famílias de equipamentos Sinterstation e Vanguard; e (ii) EOS GmbH, com a família de equipamento EOSINT.

Com o intuito de fornecer informação das características dos equipamentos atualmente comercializados por ambos fornecedores, foi realizada a tabela 2.1.

Dentre as considerações que têm que ser levadas em conta para garantir um adequado processo de SLS encontram-se as seguintes:

- o processo de temperatura deve ser mantido tão estável como possível e dentro de uma tolerância de alguns graus, garantindo uma adequada distribuição no interior da câmara de construção, evitando, de essa forma, empenamentos ou falta de sinterização na camada de pó GEBHARDT (2003);
- a temperatura sobre a camada de pó e o aquecimento na área das paredes da plataforma de construção também devem ser mantido tão estável como possível, além de um controle rápido e constante de temperatura (Ibid);
- a peça construída só deve ser retirada depois que a câmara seja completamente resfriada, garantindo um adequado resfriamento (Ibid);
- a primeira camada pode requerer uma camada base para reduzir os efeitos térmicos tais como o empenamento (VENUVINOD; MA, 2004);
- a precisão dimensional pode variar com a geometria da peça, o tamanho dos grãos de pó e as condições operacionais (SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, 2004);

**Tabela 2.1 – Comparação entre dois equipamentos comerciais**Fonte: *Web site* de EOS e 3DSsystems

Características	Equipamentos comerciais	
	EOSINT 800P	Sinterstation SPRO 230
Número de Laser	2	1
Tipo de Laser	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Potência do Laser [W]	50	200
Tipo de sistema de marcação	Sistema de escaneado óptico	( - )
Número de sistemas de marcação	2	1
Resolução X-Y [mm]	( - )	0,178
Tamanho spot [mm]	( - )	0,47
Velocidade de escaneado do Laser [m/s]	( - )	15
Sistema de deposição	( - )	Rolo
Dimensão da câmara de construção [mm]	700x380x560	550x550x750
Volume médio construído [L/H]	( - )	5
Espessura da camada [mm]	0,12	0,08 – 0,15
Temperatura de operação [°C]	385	
Web site	www.eos.info.com	www.3dsystems.com

- os materiais podem apresentar contração de 3 até 4% (Ibid);
- o processo de sinterização gera superfícies que apresentam rugosidade e porosidade (Ibid).

### 2.1.4 Material com gradação funcional

O termo Material com Gradação Funcional (FGM - *Functionally Graded Material*) se refere a um tipo de material compósito que pode ser fabricado pela tecnologia de RP (KIM, 2008).

Segundo Parameswaran e Shukla (2000) FGMs<sup>7</sup> “são compostos nos quais **a composição do material é variada** espacialmente para otimizar o desempenho do material para uma aplicação específica” (tradução nossa, grifo nosso<sup>8</sup>), baseado no trabalho de Nino, Hirai e

<sup>7</sup> Termo utilizado por vários autores como sendo o plural de FGM.

<sup>8</sup> A expressão “grifo nosso”, após a chamada da citação, é utilizada para indicar a ênfase a trechos da citação, diferenciando-lho do “grifo do autor” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, p.3).

Watanabe (1987). Já para Miyamoto et al. (1999) e Kieback, Neubrand, e Riedel (2003), FGM é um material no qual a **composição e estrutura variam gradualmente** sobre o volume, resultando em uma correspondente alteração nas propriedades do material (composição química, microestrutura ou arranjo atômico).

Observa-se nessas definições uma evolução do termo e da forma em que uma peça era fabricada, já que inicialmente só se importava com a composição do material constituinte e posteriormente com a estrutura microestrutural do material.

Alem disso, foi observada uma mudança do termo FGM desde seus inícios<sup>9</sup>. Segundo foi definido por Parameswaran e Shukla (2000) e Chen, Lin e Wang (2010), o termo FGM vem do acrônimo *Functionally Gradient Material*, traduzido ao português como “Material com Gradiente Funcional”, ambas definições baseadas no trabalho de Nino, Hirai e Watanabe (1987). Por outro lado para Miyamoto et al. (1999), Kieback, Neubrand e Riedel (2003), Wing e Halloran (2006), Chiu e Yu (2008) e Kim et al. (2008) entre outros<sup>10</sup>, o termo FGM vem do acrônimo *Functionally Graded Material*, traduzido ao português como “Material com Gradação Funcional” (tradução nossa). Essa mudança do termo FGM acontece em 1995 como consequência de uma discussão no terceiro simpósio internacional sobre FGM realizado em Lausanne em 1994 (MIYAMOTO et al, 1999).

Miyamoto et al (1999) acrescentam que a forma mais simples de FGM acontece quando dois diferentes materiais variam gradualmente desde um até o outro, aceitando também que tanto as alterações descontínuas dos componentes, quanto a **gradação escalonada**, podem ser considerados FGM.

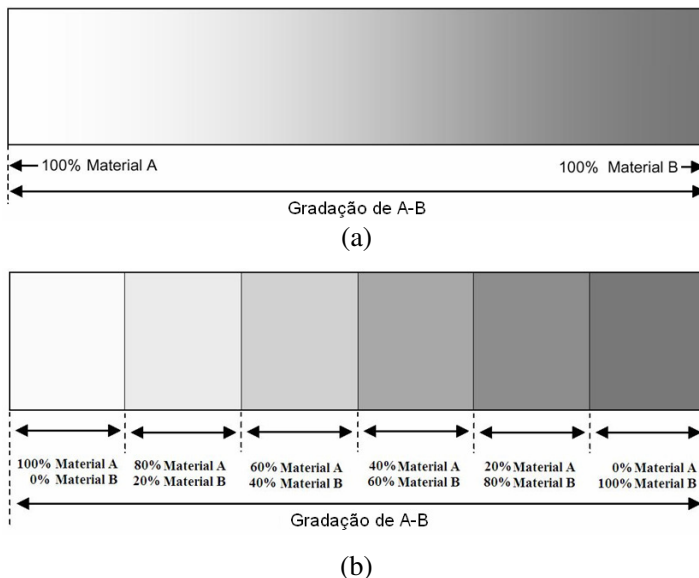
Esse conceito também é considerado por Kim, Chu e Ahn (2008) ao definir FGMs como materiais compósitos que possuem **variação contínua ou escalonada** na sua composição e/ou microestrutura. Ambos conceitos, FGM contínuo e FGM escalonado são ilustrados na figura 2.4.

---

<sup>9</sup> Os primeiros conceitos de FGM foram introduzidos por Bever e Duwez (1972) e Shen e Bever (1972) apud Kieback, Neubrand e Riedel (2003).

<sup>10</sup> Trabalhos pesquisados relativos à determinação do significado do acrônimo FGM, em língua inglesa, e que formam parte das referências bibliográficas.





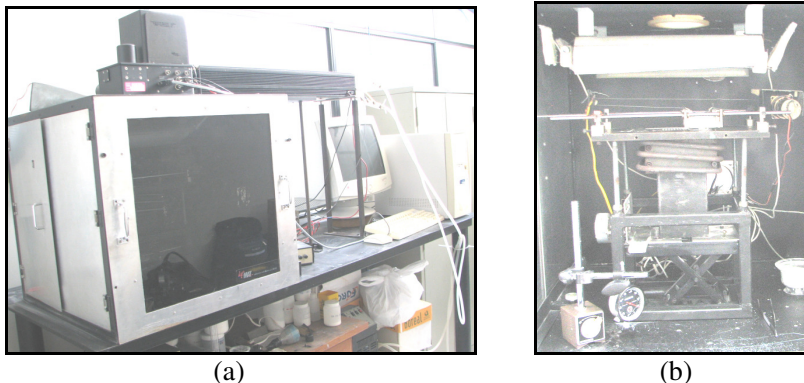
**Figura 2.4 – FGM com variação a) contínua, e b) descontínua**

Fonte: adaptada de Miyamoto et al (1999)

### 2.1.5 Equipamento sob análise

O objeto sob análise desta dissertação corresponde a um equipamento de sinterização seletiva a Laser para a obtenção de peças poliméricas com graduação funcional (KULMAN, 2006), utilizado exclusivamente para o desenvolvimento de pesquisas e conhecimento na área de RP (CIMJECT, 2010), ilustrado na figura 2.5.

Entre as informações relacionadas ao equipamento encontram-se: (i) um relatório interno do laboratório Cimject que descreve a placa controladora dos motores, seu funcionamento e sua programação (PEREIRA, 2003); (ii) o projeto mecânico do sistema de deposição de pó utilizando a técnica de graduação de material (KULMAN, 2006, p.4,6,38, 39); (iii) um sistema de aquecimento por condução, utilizando uma resistência elétrica e por radiação, utilizando lâmpadas IR (DABBAS, 2006, p. 48-52); e (iv) o desenvolvimento de um componente divisor adaptado ao sistema de deposição (Ibid, p. 52, 53).



**Figura 2.5 – Fotografia do EP a) vista geral, e b) vista interior**  
Cortesia do laboratório Cimject/EMC/UFSC

O *software* do equipamento, denominado Alpha, foi desenvolvido por Alcântara (2004, apud KULMAN, 2006) para comandar as funções do equipamento. Esse *software* ainda encontra-se em fase de teste, como enunciado na própria tela de início.

No EP têm sido desenvolvidas pesquisas visando a processabilidade de diferentes compósitos com gradação funcional (grafite/PA2200, HAP/PA2200, HAP/PEAD, PA12/PEAD, PA6/PA12, PMMA/PS, MWCNTs/PA12) para diversas aplicações (engenharia de tecidos, componentes antifricção, setor aeroespacial e implantes para liberação de fármacos) através da fabricação e caracterização de corpos de prova em diferentes geometrias (retangulares, em formato de bucha circular, de mancal e de reservatório) (KULMAN, 2006, DABBAS, 2006; LEITE, 2007; PAGGI, 2008; KLAUSS, 2010). Também tem-se fabricado corpos de prova de Polietileno de Alta Densidade (HDPE) com variação controlada de porosidade através da variação do tamanho do grão (SALMORIA et al, 2007).

Entre os parâmetros de fabricação descritos nas teses e nas dissertações que utilizaram o equipamento, encontram-se: (a) a potência do feixe do Laser, (b) a velocidade do Laser, (c) a temperatura da plataforma, (d) a temperatura da câmara, e (e) a espessura da camada. Alguns trabalhos têm utilizado a densidade da energia como parâmetro de fabricação, calculado a partir dos parâmetros (a), (b) e do diâmetro do feixe do Laser.

Entre os principais problemas reportados em relação ao equipamento encontram-se: (i) problemas na deposição e distribuição

cuidadosa do material particulado (KULMAN, 2006, p.73); (ii) variações dimensionais em relação ao modelo computacional (LEITE, 2007, p.149); KLAUSS, 2010, p.142); e (iii) elevada dispersão dos resultados das medições e elevada porosidade nas peças fabricadas (PAGGI, 2008, p.127).

Entre as principais recomendações reportadas em relação ao equipamento encontram-se: (i) avaliar outras alternativas de deposição de pós e implementar o sistema de controle atmosférico (KULMAN, 2006, p.74); (ii) melhorar o sistema de controle da espessura das camadas (KULMAN, 2006, p.74; PAGGI, 2008, p.129; KLAUSS, 2010, p.143); (iii) desenvolver um controle automatizado da variação de potência de Laser na mesma camada (DABBAS, 2006, p.89; LEITE, 2007, p.150); (iv) promover melhorias no equipamento em relação à exatidão dimensional das peças fabricadas (LEITE, 2007, p.150); e (v) promover melhorias no equipamento em relação ao controle da temperatura e ao controle de sua deposição (PAGGI, 2008, p.129).

Paggi (2008, p.127) atribui a elevada dispersão dos resultados obtidos nas suas medições ao processo de fabricação. Contudo, não tem-se constatado pesquisas avaliando a repetitividade de alguma propriedade específica nos corpos de prova.

Em relação ao mecanismo de deposição, a fabricação de seus componentes não comerciais foi baseada na facilidade da construção, na pouca experiência da equipe responsável e no baixo custo das soluções (KULMAN, 2006, p.47, 52), sendo avaliado em função da capacidade de obter peças finais a partir de pó polimérico ou misturas de diferentes pós e não em função dos requisitos do projeto (Ibid, p.36).

## **2.1.6 Variabilidade**

Werkema (1995, p.2, 3) define o termo variabilidade (também denominada variação ou dispersão), como “o resultado de alterações nas condições sob as quais as observações são tomadas”, sendo também decorrente do sistema de medição empregado. Essas alterações podem refletir diferenças entre as matérias-primas, as condições dos equipamentos, os métodos de trabalho, as condições ambientais e os operadores envolvidos no processo, sendo estas denominadas também como fontes de variabilidade.

Em um processo de fabricação de produtos, atuam diversos fatores que afetam suas características de qualidade, pelo que um processo pode ser considerado como um conjunto de causas de

variações que dão origem a produtos que satisfazem, ou não, a uma determinada especificação. Dessa forma, a fabricação de produtos defeituosos é provocada por variações nas condições de operação do processo que provoca, por sua vez, variações em alguma característica de interesse do produto, afastados de um valor alvo desejado e fora dos limites das especificações estabelecidas. Contudo, mesmo que os produtos fabricados satisfaçam às especificações, não significa que eles sejam exatamente idênticos (Ibid, p.4). Exemplos de causas de variação são: desgaste nas ferramentas, matérias-primas fora das especificações, métodos ou procedimentos de trabalho incorretos, erros humanos, entre outros.

Werkema (1995, p.5) destaca que existem dois tipos de causas para a variabilidade de um processo: (1) as causas comuns ou aleatórias, também conhecidas como variabilidade natural, que são inerentes ao processo; e (2) causas especiais ou assinaláveis, que surgem esporadicamente devido a uma situação particular que faz com que o processo se comporte de um modo diferente do usual.

Segundo Júnior (2003, p.90), as causas podem ser agrupadas por categorias e semelhanças previamente estabelecidas, o que permite atuar de um modo mais específico e direcionado no detalhamento das causas possíveis. Contudo, nesta dissertação será utilizado o conceito de fontes de variabilidade para agrupar essas causas possíveis.

Para Montgomery (2001, p.3), a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade, pelo que melhorar a qualidade significa reduzir as causas de variabilidade nos processos e nos produtos. Em outras palavras, menor variabilidade no processo implica em maior qualidade no produto final.

## 2.2 METODOLOGIAS PARA ANÁLISE E MELHORIA DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Com a finalidade de determinar a metodologia mais adequada para analisar as causas de variabilidade no processo de fabricação, visando atingir os objetivos propostos, além de organizar e estruturar a presente dissertação, foram pesquisadas as seguintes metodologias de análise e melhoria de processos de fabricação: (i) processo de melhoria incremental do processo de desenvolvimento de produto, (ii) ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) para melhoria da qualidade, e (iii) metodologia de análise e melhoria de processos da IBNQ (Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear).

### 2.2.1 Processo de melhoria incremental do processo de desenvolvimento de produtos

Segundo descrito por Amaral et al (2006, p.470), o processo de melhoria incremental é um processo de apoio ao Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), no qual um conjunto amplo de pequenas melhorias pode causar sensíveis melhorias no processo como um todo.

O processo de melhoria incremental e contínua pode estar relacionado com qualquer uma das fases do PDP. Assim, cada vez que surge um problema ou uma oportunidade de melhoria, deve-se analisar se o problema ou a melhoria está relacionada com o produto e seu processo de fabricação ou com o processo de desenvolvimento.

Segundo Amaral et al (2006), a melhoria incremental do PDP segue a filosofia mais conhecida no meio industrial, a filosofia KAIZEN, conhecida também como ciclo PDCA, ciclo de Shewhart e ciclo de Deming (JÚNIOR, 2003), ampliando sua visão de raciocínio.

Na tabela 2.2 é apresentado o sumário do processo de melhoria incremental do PDP com suas 4 fases principais, sendo o processo de natureza repetitiva e cíclica.

**Tabela 2.2 – Sumario do processo de melhoria incremental do PDP**

Fonte: Criado a partir dos dados fornecidos por Amaral et al (2006, p.470-475)

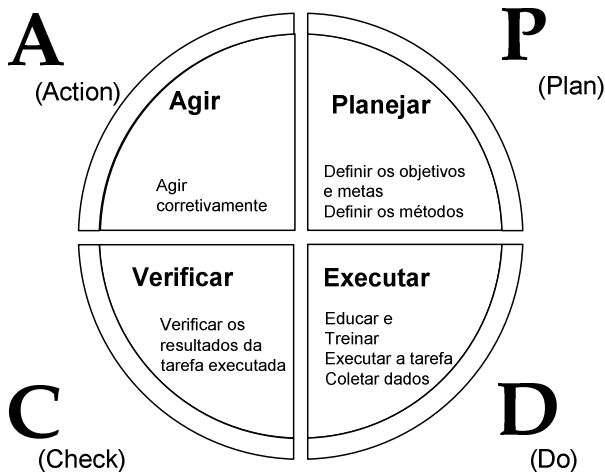
Fase	Objetivo	Atividades
Entender motivação das melhorias	Entendimento dos problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantar problemas e oportunidades</li> <li>• Coletar e filtrar propostas de melhoria</li> <li>• Consolidar propostas de melhoria, problemas e oportunidades</li> </ul>
Analisar situação	Identificação das causas dos problemas, viabilidade, propostas de solução e os impactos da solução	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar causas dos problemas</li> <li>• Avaliar a viabilidade das oportunidades</li> <li>• Avaliar eficiência e eficácia das propostas</li> <li>• Avaliar impacto da melhoria nas áreas do conhecimento e outros processos</li> </ul>
Definir ações	Avaliação das alternativas de solução	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovar proposta de melhoria</li> <li>• Identificar soluções alternativas</li> <li>• Definir conjunto de ações para a melhoria</li> <li>• Priorizar ações de melhoria</li> <li>• Avaliar viabilidade das ações</li> </ul>
Implantar soluções	Implementação das soluções	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planejar o projeto</li> <li>• Definir requisitos</li> <li>• Desenhar solução</li> <li>• Executar melhoria</li> <li>• Liberar solução</li> </ul>

## 2.2.2 Ciclo PDCA para melhoria da qualidade

O ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Action) é um método gerencial para a promoção da melhoria contínua (JÚNIOR et al, 2003, p.78). Segundo Galvão e Mendonça (1996, p.23),

A essência deste ciclo de gestão é o fato de que para cada processo é necessário definir-se uma meta, isto é, uma quantidade e um prazo para que seja alcançada, e um método que possibilite a realização dessa meta.

O ciclo PDCA, ilustrado na figura 2.6, divide-se em quatro fases: (i) planejar (P), na qual são definidos os objetivos e metas, baseado nos requisitos do cliente ou nas características do produto ou processo, a partir dos quais são desenvolvidos os métodos, procedimentos e padrões; (ii) executar (D), na qual é fornecida a educação e o treinamento às pessoas responsáveis pela execução dos métodos desenvolvidos e pela coleta dos dados; (iii) verificar (C), na qual são verificados os resultados da tarefa executada em relação ao planejado; e (iv) agir corretivamente (A), caso as metas planejadas não tenham sido alcançadas (JUNIOR *et al.* 2003).



**Figura 2.6 – As quatro fases do ciclo PDCA**

Fonte: Adaptado de Junior *et al.* (2003)

Conforme sustenta Aguiar (2002, p.24), o giro do PDCA assume características diferentes “de acordo com o tipo do gerenciamento a ser realizado”. Os três tipos de gerenciamento da qualidade, conhecidos como “trilogia de Juran”, são: (i) o planejamento da qualidade, (ii) o controle da qualidade, e (iii) a melhoria da qualidade.

O planejamento da qualidade “é um conjunto de atividades que visam desenvolver os produtos e processos necessários para atender às necessidades dos clientes”, o que permite definir os objetivos de qualidade. O controle da qualidade “é o processo para assegurar o cumprimento dos objetivos da qualidade durante as operações”. A melhoria da qualidade “é o processo para produzir com níveis superiores e inéditos de execução” elevando a qualidade dos bens e serviços, por meio da melhoria contínua ou radical (JÚNIOR et al, 2003. p.75).

Na tabela 2.3 é apresentado o sumário do ciclo PDCA para melhoria da qualidade, também denominado método de solução de problemas (WERKEMA, 1995, p.35) ou Método de Análise e Solução de Problemas (MASP) (JÚNIOR et al, 2003. p.82). As 4 fases principais do ciclo PDCA são de natureza repetitiva e cíclica.

**Tabela 2.3 – Sumario do ciclo PDCA para a melhoria da qualidade**

Fonte: Criado a partir dos dados fornecidos por Aguiar (2002, p.64-75)

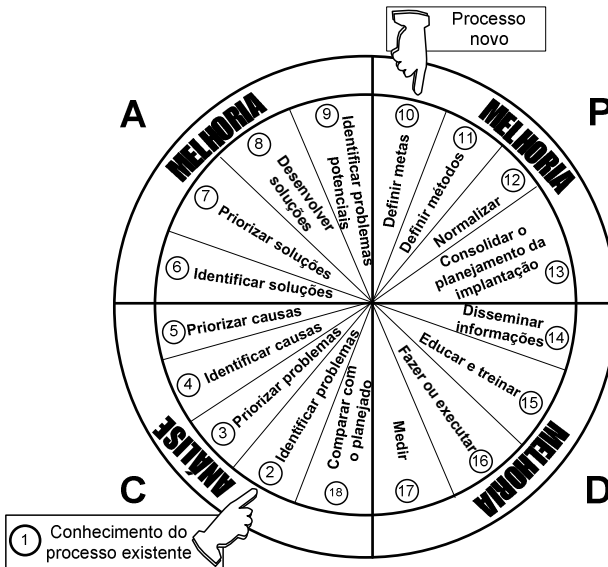
Fase	Objetivo	Atividades
Planejar (P)	Estabelecer as metas Definir claramente o problema, procurar as causas geradoras do problema e definir os meios para atacar as causas identificadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar o problema</li> <li>• Reconhecer as características do problema</li> <li>• Descobrir as causas principais</li> <li>• Planejar as contramedidas às causas principais</li> </ul>
Executar (D)	Implementar os planos de ação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atuar de acordo com o plano de ação</li> </ul>
Verificar (C)	Avaliar o alcance da meta por meio das medidas propostas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirmar a efetividade da ação</li> </ul>
Agir (A)	Estabelecer os meios de manutenção dos bons resultados atingidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminar definitiva as causas</li> <li>• Revisar as atividades e planejamento para trabalhos futuros</li> </ul>

### 2.2.3 Metodologia de análise e melhoria de processos

A Metodologia de Análise e Melhoria de Processos (MAMP), ilustrada na figura 2.7, é um processo gerencial baseado no ciclo PDCA, constituído de 18 passos “que, devidamente seguidos, proporcionarão condições seguras e consistentes de efetivo sucesso na implantação das melhorias propostas” (GALVÃO; MENDONÇA, 1996, p.29). A MAMP é baseado nos trabalhos de Deming, Ishikawa e Juran e é parte integrante da metodologia de Gestão pela Qualidade Total (GQT) desenvolvida pelo IBQN (Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear).

Na tabela 2.4 é apresentado o sumário do ciclo de análise e melhoria de processos com suas 4 fases principais, sendo o processo de análise de natureza repetitiva e cíclica.

No caso do EP, por ser um processo de fabricação já existente, o ciclo começa pela fase de verificação do ciclo PDCA, com o conhecimento do processo. A MAMP propõe um conjunto de técnicas denominadas ferramentas de qualidade “as quais facilitam [...] os trabalhos desenvolvidos, bem como asseguram maior eficiência dos resultados obtidos” (Ibid. p.31).



**Figura 2.7 - Ciclo de análise e melhoria de processos**  
Fonte: Galvão e Mendonça (1996)



**Tabela 2.4 – Sumário do ciclo de análise e melhoria de processos**  
 Fonte: Criado a partir dos dados fornecidos por Galvão e Mendonça (1996)

	Fase	Objetivo	Passos
Análise do processo	Início	Conhecimento do Processo	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Passo 1: Conhecer os clientes, fornecedores e o produto</li> <li>● Analisar as normas e os procedimentos existentes</li> <li>● Representar graficamente o processo</li> </ul>
	Análise do processo (C)	Identificar e priorizar os problemas Identificar as possíveis causas do problema prioritário Ordenar as causas mais prováveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Passo 2: Identificar problemas</li> <li>● Passo 3: Priorizar problemas</li> <li>● Passo 4: Identificar as possíveis causas do problema prioritário</li> <li>● Passo 5: Priorizar as causas</li> </ul>
Melhoria do processo	Soluções (A)	Identificar e ordenar as alternativas de solução para as possíveis causas Desenvolver as soluções	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Passo 6: Identificar as alternativas de solução</li> <li>● Passo 7: Priorizar as alternativas de solução</li> <li>● Passo 8: Desenvolver soluções</li> <li>● Passo 9: Identificar problemas potenciais</li> </ul>
	Planejamento da implementação (P)	Planejar da implantação das melhorias de um processo ou de um processo novo	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Passo 10: Definir metas</li> <li>● Passo 11: Definir métodos de execução</li> <li>● Passo 12: Normalizar</li> <li>● Passo 13: Consolidar o planejado</li> </ul>
	Implantação (D)	Implementar as melhorias propostas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Passo 14: Disseminar informações</li> <li>● Passo 15: Educar e treinar</li> <li>● Passo 16: Fazer ou executar</li> <li>● Passo 17: Medir</li> <li>● Passo 18: Comparar</li> </ul>

## 2.2.4 Comparação entre metodologias de análise e melhoria de processos de fabricação

Na presente seção são comparadas as três metodologias para análise e melhoria de processo de fabricação, apresentadas nas seções 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3, visando definir a metodologia a ser utilizada como modelo de referência para a análise da variabilidade do processo de fabricação no EP.

Segundo Amaral et al (2006, p.167) “ um modelo de referência pode ser utilizado como base para a criação de outros modelos ou para a definição de projetos”, adaptando-se conforme às próprias necessidades.

Dentre as principais semelhanças observadas entre essas três metodologias, encontram-se:

- (i) todas elas correspondem a metodologias ou processos de gestão que visam a melhoria dos problemas sob análise;
- (ii) todas elas são baseadas no ciclo PDCA, e apresentam atividades similares distribuídas em fases diferentes, como evidenciado na tabela 2.5.

(iii) o ciclo PDCA, para a melhoria da qualidade, e a MAMP utilizam ferramentas de qualidade, as que exercem o papel de “instrumentos para a coleta de dados, a disposição e o processamento das informações necessárias à manutenção e à melhoria dos resultados dos processos” (WERKEMA, 1995, p.40). O processo de melhoria incremental do PDP também utiliza ferramentas denominadas “técnicas de diagnóstico”, algumas das quais são as mesmas que as utilizadas nas outras duas metodologias.

Dentre as principais diferenças observadas, encontram-se:

- (i) o processo de melhoria incremental do PDP não considera uma metodologia para o levantamento das informações ou de conhecimento do processo, já que essa metodologia é de apoio ao PDP e é ativada em qualquer das suas fases “toda vez que surgir um problema ou uma oportunidade de melhoria” (AMARAL et al, 2006, p.454), pelo que o processo sob análise e/ou o projeto do processo ou produto é conhecido e encontra-se devidamente documentado; e
- (ii) o processo de melhoria incremental do PDP não é iniciado com a identificação dos problemas, já que são os problemas a serem resolvidos ou as oportunidades de melhoria, que surgem em qualquer fase do ciclo de desenvolvimento de produto, que acionam o ciclo de melhoria (AMARAL et al, 2006, p.471, 472).

Considerando que: i) o EP não foi projetado usando de uma metodologia de desenvolvimento de produto, ii) as fases do processo de melhoria incremental do PDP encontram-se atreladas ao desenvolvimento do produto, e iii) as três metodologias apresentadas são baseadas no ciclo PDCA de melhoria, é que a MAMP e o ciclo PDCA para a melhoria da qualidade serão considerados modelos de referência para a análise e melhoria do processo sob análise.

**Tabela 2.5 – Comparação entre metodologias de análise e melhoria de processos de fabricação**

Fonte: Criado a partir dos dados apresentados nas tabelas 2.1 até 2.3

Processo de melhoria incremental do PDP		Metodologia de Análise e Melhoria de Processos		Ciclo PDCA para melhoria da qualidade	
Fase	Atividades	Fase	Passos	Fase	Atividades
Inicial	<ul style="list-style-type: none"> <li>Levantar problemas a serem resolvidos originados em qualquer fase do PDP</li> </ul>	Inicial	<ul style="list-style-type: none"> <li>Passo 1: Conhecimento do processo</li> </ul>	Inicial	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estabelecer a meta de melhoria</li> </ul>
Entender motivação das melhorias	<ul style="list-style-type: none"> <li>Levantar problemas e oportunidades</li> <li>Coletar e filtrar propostas de melhoria</li> <li>Consolidar propostas de melhoria, problemas e oportunidades</li> </ul>	Análise do processo (C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Passo 2: Identificar problemas</li> <li>Passo 3: Priorizar problemas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar o problema</li> <li>Reconhecer as características do problema</li> </ul>	
Analisar situação	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar causas dos problemas</li> <li>Avaliar a viabilidade das oportunidades</li> <li>Avaliar eficiência e eficácia das propostas</li> <li>Avaliar impacto da melhoria nas áreas do conhecimento e outros processos</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Passo 4: Identificar as possíveis causas do problema prioritário</li> <li>Passo 5: Priorizar as causas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Descobrir as causas principais</li> </ul>	
Definir ações	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aprovar proposta de melhoria</li> <li>Identificar soluções alternativas</li> <li>Definir conjunto de ações para a melhoria</li> <li>Priorizar ações de melhoria</li> <li>Avaliar viabilidade das ações</li> </ul>	Soluções (A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Passo 6: Identificar as alternativas de solução</li> <li>Passo 7: Priorizar as alternativas de solução</li> <li>Passo 8: Desenvolver soluções</li> <li>Passo 9: Identificar problemas potenciais</li> </ul>	Planejar (P)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planejar as contramedidas às causas principais</li> </ul>
Implantar soluções	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planejar o projeto</li> <li>Definir requisitos</li> <li>Desenhar solução</li> </ul>	Planejamento da implementação (P)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Passo 10: Definir metas</li> <li>Passo 11: Definir métodos de execução</li> <li>Passo 12: Normalizar</li> <li>Passo 13: Consolidar o planejado</li> </ul>	Executar (D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atuar de acordo com o plano de ação</li> </ul>
		Implantação (D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Passo 14: Disseminar informações</li> <li>Passo 15: Educar e treinar</li> <li>Passo 16: Fazer ou executar</li> <li>Passo 17: Medir</li> <li>Passo 18: Comparar</li> </ul>	Verificar (C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Confirmar a efetividade da ação</li> </ul>
				Agir (A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eliminar definitiva as causas</li> <li>Revisar as atividades e planejamento para trabalhos futuros</li> </ul>

## 2.2.5 Metodologia para o levantamento de conhecimento de um processo de fabricação

O ciclo PDCA, por se tratar de um método gerencial, não fornece de um método específico para o conhecimento do processo.

Por sua vez, a MAMP aplicada a um processo existente, mesmo sendo um método gerencial, considera que o primeiro passo é o conhecimento do processo, fornecendo as atividades apresentadas na tabela 2.6.

**Tabela 2.6 – Conhecimento do processo da MAMP**

Fonte: Criado a partir dos dados fornecidos por Galvão e Mendonça (1996)

Passo	Objetivo	Descrição do passo
Conhecimento do processo	Identificar os elementos, os passos, os resultados e os padrões a ele associados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar os clientes</li> <li>• Identificar os fornecedores</li> <li>• Identificar os produtos</li> <li>• Identificar as necessidades dos clientes</li> <li>• Analisar as normas e os procedimentos existentes</li> <li>• Representar graficamente o processo</li> </ul>
		Ferramentas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5W1H</li> <li>• Fluxogramas</li> </ul>

Como evidenciado por Galvão e Mendonça (1997, p. 33), o primeiro passo de conhecimento do processo contribui a uma análise mais consistente e a tornar as informações ainda mais claras para os envolvidos com essa análise, pelo que se conclui que o processo não é desconhecido pelo responsável de implementar a MAMP nem pelos grupos de trabalho participantes.

No caso de analistas externos ao processo, como ou caso de engenheiros de *software* e consultores implementando sistemas de gestão, precisam conhecer o processo para modelá-lo, requerendo de técnicas ou métodos que garantam um adequado conhecimento do processo sob estudo.

Baseada na informação anteriormente exposta, foi evidenciada a necessidade de estudo de metodologias ou sistemáticas que permitam padronizar o levantamento e a adequada documentação do processo sob análise, para ser utilizada nos estágios seguintes da MAMP.

De Mello (2008) utilizou a técnica de mapeamento de processos produtivos visando descrever o seu estado inicial, fornecendo uma visão geral do processo sob estudo, cujo resumo é apresentado na tabela 2.7.

**Tabela 2.7 – Técnicas para mapeamento do processo**

Fonte: Criado a partir dos dados fornecidos por De Mello (2008)

Fase	Objetivo	Passos
Mapeamento atual	Descrever o estado atual de um processo primário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar o produto</li> <li>• Identificar os clientes</li> <li>• Identificar os fornecedores</li> <li>• Identificar as entradas para o início do processo</li> <li>• Identificar as saídas esperadas</li> </ul>
		Ferramentas utilizadas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• SIPOC (Supply-Inputs-Process-Outputs-Customer)</li> </ul>
Identificação dos processos críticos	Identificar os processos críticos a serem analisados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descrever os processos sob análise</li> <li>• Identificar a conectividade entre os processos</li> <li>• Mensurar os tempos de entrega (tempo/homem)</li> <li>• Validar o fluxograma do processo</li> <li>• Identificar os processos críticos a partir da mensuração dos tempos de entrega</li> </ul>
		Ferramentas utilizadas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapeamento fluxograma</li> <li>• Diagrama homem-máquina</li> </ul>

Por sua parte Da Costa (1997) na sua proposta de modelo para uma metodologia de gerenciamento de processos, apresenta uma primeira fase chamada de definição do processo, que é dividida em 4 etapas, cujas atividades são resumidos na tabela 2.8.

A partir das tabelas 2.6, 2.7 e 2.8, evidenciam-se similitudes, mas também contribuições importantes para a documentação do processo que podem ser utilizadas durante o processo de análise.

**Tabela 2.8 – Fase de definição do processo**

Fonte: Criado a partir dos dados fornecidos por De Costa (1997)

Fase	Etapa	Atividades
Definição do processo	Comprometimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar os processos críticos</li> <li>• Estabelecer os responsáveis e grupos de trabalho</li> <li>• Elaborar um plano de coleta de dados</li> </ul>
	Caracterização dos clientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar os clientes</li> <li>• Identificar as necessidades dos clientes</li> </ul>
	Mapeamento dos processos críticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organizar as informações sobre o processo atual</li> <li>• Classificar e descrever as funções do processo</li> <li>• Documentar o processo de fabricação</li> <li>• Documentar a execução do processo</li> <li>• Dividir o processo em subprocessos</li> <li>• Identificar os tempos e fluxos de produção</li> <li>• Mapear os processos críticos</li> <li>• Elaborar fluxogramas, gráficos de medição e de controle</li> </ul>
	Urgência	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir o processo crítico</li> <li>• Definir as prioridades de melhoria do processo</li> </ul>

## 2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo têm-se apresentado os principais conceitos relacionados com o equipamento sob análise. As definições de manufatura aditiva, sinterização seletiva a Laser e materiais com gradação funcional foram introduzidas. Também foi introduzido o equipamento sob análise e os motivos de ser chamado de protótipo.

Neste capítulo também foi apresentado o conceito de variabilidade relacionado ao processo de fabricação. Finalmente foi apresentado uma revisão das metodologias pesquisadas para a análise e melhoria de processos e para o levantamento do conhecimento do processo de fabricação, para serem adaptadas ao processo de fabricação sob estudo.

No seguinte capítulo será descrita a metodologia de análise para as causas de variabilidade do processo de SLS na fabricação de peças com FGM, adaptada dos modelos de referência descritos neste capítulo.

### 3 DESCRIÇÃO GERAL DA METODOLOGIA UTILIZADA

O presente capítulo descreve a metodologia a ser aplicada na análise das causas de variabilidade do EP, adaptada dos modelos de referência, que foram apresentados no capítulo anterior, para atingir os objetivos propostos nesta dissertação.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

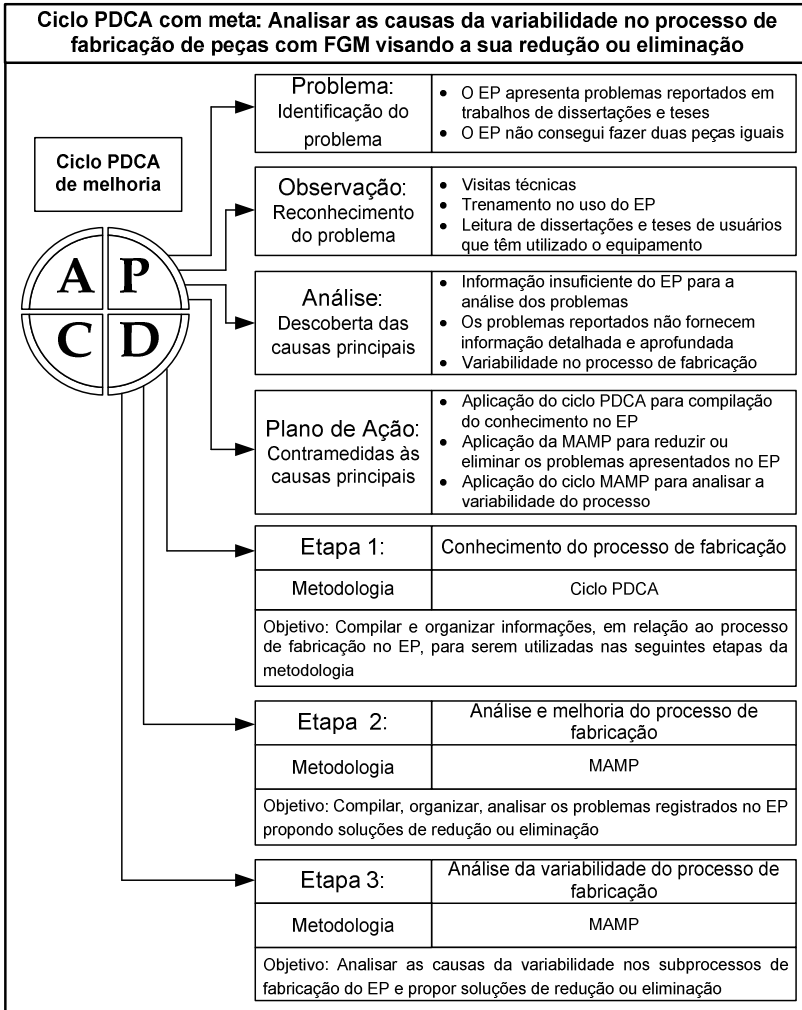
De acordo com Werkema (1995, p.27) e Aguiar (2002, p.24), o ciclo PDCA é utilizado para resolver qualquer problema ou realizar qualquer gerenciamento, por esse motivo a primeira decisão a ser tomada é estabelecer o tipo de meta/gerenciamento a ser atingida/realizado (ver seção 2.2.2 para tipos de metas/gerenciamentos). Com base no objetivo da presente dissertação, a meta é definida como: *Analisar as causas da variabilidade no processo de fabricação de peças com FGM, visando a sua redução ou eliminação.*

Com a meta definida foi aplicado o ciclo PDCA de melhoria, cujo resultado é exposto na figura 3.1.

A fase de planejamento (P) finalizou com um plano de ação dividido em 3 etapas. A etapa 1 foi denominada de “Conhecimento do processo de fabricação”, cujo objetivo é compilar, gerar e analisar informações referentes ao processo de fabricação. A etapa 2 corresponde a uma “Análise e melhoria do processo de fabricação”, sendo uma adaptação da MAMP para reduzir ou eliminar os problemas que o EP vem apresentando. A etapa 3 corresponde a uma “Análise da variabilidade do processo de fabricação”, sendo também uma adaptação da MAMP para analisar a variabilidade nos subprocessos envolvidos, visando sua redução ou eliminação.

Embora se tenha observado diferentes tipos de divisões em metodologias de projetos (ex. fases, etapas, atividades e tarefas) e em metodologias de qualidade (ex. ciclos, fases, etapas, atividades), na presente dissertação será utilizada a divisão proposta na própria MAMP na estruturação e padronização de cada uma das etapas. A figura 3.2 ilustra essa estrutura.

Em relação às tarefas, foi proposta uma codificação para manter a ordem e sequência de cada uma, segundo a regra a seguir: (i) o número da tarefa será composto de 3 números separados por ponto; (ii) o primeiro número indicará o número da etapa correspondente; (iii) o segundo número indicará o número do passo da correspondente etapa; e

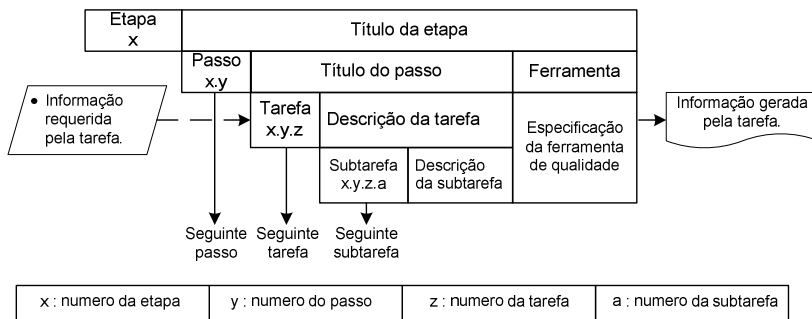


**Figura 3.1 – Aplicação do ciclo PDCA para a análise da variabilidade no EP**

(iv) o terceiro número indicará o número da tarefa, em ordem sequencial. Será adicionado um quarto número separado por ponto caso a tarefa apresente subtarefas.

Na figura 3.2, o termo “ferramenta” corresponde às ferramentas de qualidade propostas pelas metodologias de qualidade para auxiliar na execução das respectivas tarefas ou subtarefas.





**Figura 3.2 - Estrutura das etapas propostas na metodologia**

Para cada tarefa, a entrada de informação e a saída resultante da execução da tarefa será indicada com uma seta na direção do fluxo da informação. As informações de saída de cada tarefa poderão ser em forma de tabelas, diagramas, ilustrações, fluxogramas ou relatórios<sup>11</sup> de engenharia, entre outros. Visando organizar essa informação para posteriores consultas, recomenda-se utilizar um arquivo para conter os documentos em papel ou um sistema de armazenamento de dados para documentos em meio digital.

A seguir são descritas cada uma das 3 etapas que constituem a metodologia a ser aplicada.

### 3.2 DESCRIÇÃO DA ETAPA 1: CONHECIMENTO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Obter conhecimento do processo é a etapa mais importante em um processo de análise, e também a que toma mais tempo, sobretudo se as informações do processo forem insuficientes ou inexistentes.

Baseado nas metodologias para o levantamento de conhecimento de um processo de fabricação, apresentadas na seção 2.2.4, foi proposta a presente etapa, cujo diagrama de fluxo é apresentado na figura 3.3 e cujos passos e tarefas são descritas a seguir.

<sup>11</sup> Norton (2000) descreve os relatórios como uma “forma escrita de comunicação das ideias e resultados contendo normalmente desenhos ou esboços de engenharia, bem como tabelas e gráficos de dados”.



Figura 3.3 – Etapa 1: Conhecimento do processo

### 3.2.1 Passo 1.1 - Compilação das informações do processo

#### Tarefa 1.1.1: Compilar as informações disponíveis aos usuários

O objetivo desta tarefa é compilar todas as informações do processo disponíveis aos usuários. A aplicação de um questionário ou de uma entrevista aos usuários e responsáveis pelo processo pode auxiliar na coleta dessas informações. A informação compilada poderá ser organizada em uma tabela, indicando para cada documento o título, o autor, o ano e a versão, entre outros.

#### Tarefa 1.1.2: Compilar as informações dos componentes do processo

Nesta tarefa serão compiladas as informações dos componentes do processo. Inicialmente é preciso identificar os seus componentes principais, tanto comerciais quanto não comerciais, gerando uma listagem com as características mais importantes observadas. A seguir deverão ser procuradas as folhas de dados e especificações técnicas dos componentes comerciais e as informações dos componentes não comerciais. Com esse objetivo, esta tarefa foi dividida em: (i) identificação dos componentes do processo, (ii) compilação da informação dos componentes comerciais, e (iii) compilação da informação dos componentes não comerciais.

Entre os componentes do processo também devem ser identificados os sistemas de mando e/ou controle do processo de fabricação (CLP, placas eletrônicas padronizadas ou específicas, etc.). No caso de placas eletrônicas não comerciais e sem informação suficiente, poderá ser necessário levantar o leiaute da placa e das suas conexões elétricas para melhor compreensão do controle do processo.

Recomenda-se realizar um diagrama ilustrativo do processo com a indicação de todos os seus componentes.

#### Tarefa 1.1.3: Compilar as normas e os procedimentos de operação e fabricação

Para garantir um adequado processo de fabricação, é preciso operar corretamente os seus equipamentos, seguindo as suas normas estabelecidas e os seus procedimentos, desde a etapa de preparação da matéria-prima até o acabamento final do produto. Para isso, nesta tarefa deverão ser compiladas as normas e os procedimentos existentes para operação e fabricação, assim como os de manutenção, ajuste e calibração. Caso as informações não existirem ou forem insuficientes, os procedimentos poderão ser obtidos através de entrevistas aos operadores do processo.

#### Tarefa 1.1.4: Compilar as informações que deram origem ao processo de fabricação

Nesta tarefa serão compiladas as informações relacionadas ao projeto original do processo, as suas modificações e ao projeto atual.

Essas informações podem ser obtidas dos documentos do projeto original, dos relatórios com as modificações do processo e/ou por meio de entrevistas aos projetistas e/ou responsáveis do processo.

### 3.2.2 Passo 1.2 – Mapeamento do processo de fabricação

#### Tarefa 1.2.1: Descrever de modo geral o processo sob análise

Esta tarefa será iniciada com a identificação e descrição do princípio de funcionamento do processo, relacionado aos princípios físicos e tecnológicos nele utilizados. A seguir será descrita a forma como ele vem sendo executado, baseada nas informações obtidas do passo 1.1.

Quando não há suficiente informação disponível, recomenda-se utilizar a ferramenta de qualidade 5W1H. Para Galvão e Mendonça (1996), essa é a técnica mais indicada para conhecer um processo, formulando perguntas que, ao serem respondidas, auxiliarão no seu entendimento, embora ela seja utilizada principalmente na elaboração de planos de ação (JÚNIOR, 2003). A tabela 3.1 ilustra essa ferramenta.

**Tabela 3.1 - Ferramenta de qualidade – 5W1H**

<b>Que (What)</b>	<b>Quem (Who)</b>	<b>Quando (When)</b>	<b>Onde (Where)</b>	<b>Por Que (Why)</b>	<b>Como (How)</b>
Que ... ?	Quem ... ?	Quando ... ?	Onde ... ?	Por que ... ?	Como ... ?
Resposta:	Resposta:	Resposta:	Resposta:	Resposta:	Resposta:

#### Tarefa 1.2.2: Identificar a cadeia cliente-fornecedor externa

Em geral, um processo recebe insumos de fornecedores e os transforma em produtos destinados a seus clientes, os quais possuem exigências que devem ser atendidas em 100%. Por outro lado, para que o processo possa satisfazer esses requisitos e garantir a satisfação dos clientes, é preciso que seus fornecedores atendam também em 100% os seus requisitos. Dessa forma, o processo é um cliente para seus fornecedores e fornecedor para seus clientes, estabelecendo-se a denominada **cadeia cliente-fornecedor** (GALVÃO e MENDONÇA, 1996).

Com o objetivo de identificar a cadeia cliente-fornecedor externo do processo sob estudo, a tarefa 1.2.2 foi dividida em: (i) identificação dos clientes do processo, (ii) determinação das necessidades dos clientes, (iii) identificação dos produtos do processo, (iv) determinação das características do produto; (v) identificação dos fornecedores; (vi) determinação das exigências aos fornecedores; (vii) identificação das matérias-primas; e (viii) determinação das características das matérias-primas.

### **3.2.3 Passo 1.3 – Mapeamento dos processos críticos**

#### **Tarefa 1.3.1: Dividir o processo em subprocessos**

Os processos de fabricação geralmente envolvem múltiplos subprocessos que cumprem funções específicas e que podem agir de forma simultânea e/ou sequencial.

A identificação desses subprocessos de fabricação pode ser auxiliada com as informações dos procedimentos de operação e fabricação, e com a utilização da ferramenta 5W1H, através de perguntas que auxiliem nessa identificação. Recomenda-se elaborar um diagrama com a divisão proposta para o processo principal.

#### **Tarefa 1.3.2: Identificar os subprocessos críticos**

Na tarefa 1.3.2 serão identificados e descritos os subprocessos considerados críticos no processo de fabricação sob análise.

Para Dinsmore e Cabanis-Brewin (2009), os processos críticos são os processos operacionais fundamentais para entregar um produto ou serviço aos clientes externos. Nesta dissertação serão considerados críticos, para a análise das causas da variabilidade, todos os subprocessos relacionados diretamente ao processo de transformação da matéria-prima em peças finais. Todos os demais subprocessos serão considerados subprocessos de apoio.

#### **Tarefa 1.3.3: Identificar a cadeia cliente-fornecedor interna**

Da mesma forma que em um processo se pode estabelecer uma cadeia cliente-fornecedor, cada um dos seus subprocessos pode estabelecer uma cadeia cliente-fornecedor interna, a partir dos quais podem ser identificados os produtos internos e os seus requisitos.

A tarefa 1.3.3 inicia-se com a identificação dos clientes para cada subprocesso interno e a determinação das necessidades de cada cliente interno. A partir disto, serão determinadas as características de cada produto interno que atendam essas necessidades.

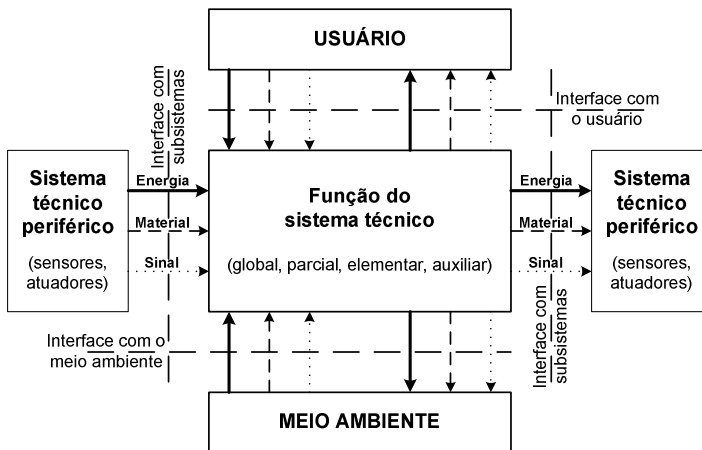
#### **Tarefa 1.3.4: Mapear os subprocessos críticos**

Nesta tarefa deve-se descrever e documentar os subprocessos críticos descritos na tarefa 1.1.3.

### Tarefa 1.3.5: Identificar e descrever as funções dos subprocessos críticos

A identificação e descrição das funções dos subprocessos críticos podem ser realizadas através da análise das funções que cada subprocesso realiza para transformar a matéria-prima em produto final.

Esse método é denominado análise funcional e compreende: (i) a identificação da função global e suas interfaces com os outros sistemas técnicos periféricos, com o usuário e com o meio ambiente; e (ii) o desdobramento sucessivo da função global em funções parciais de menor complexidade, até o nível das funções elementares, seguindo o fluxo de energia, de material e de informação do equipamento existente, ligando as entradas às saídas através das interfaces (FORCELINI, 2002; CAVALCANTI, 2007). Na figura 3.4 é apresentado um diagrama de blocos que pode ser utilizado para definir uma função global, parcial, elementar ou auxiliar e suas interfaces com outros subsistemas técnicos, com o usuário e com o meio ambiente.



**Figura 3.4 - Formulação das funções de um sistema**

Fonte: adaptado de Forcellini (2002)

### Tarefa 1.3.6: Identificar e descrever a sequência de fabricação

A identificação da sequência de fabricação do processo pode ser obtida a partir da descrição dos procedimentos de operação (tarefa 1.1.3), da identificação dos subprocessos críticos (tarefa 1.3.2) e da definição da estrutura funcional (tarefa 1.3.5) do processo, a qual pode ser representada por meio de um fluxograma.

#### Tarefa 1.3.7: Dividir o sistema de fabricação em subsistemas

Nesta tarefa, o processo será analisado como um sistema de fabricação, identificando e agrupando elementos que apresentem alguma relação.

Propõe-se duas classificações: (i) classificação por classes, na qual o processo é classificado por grupos de elementos semelhantes (ex.: mecânico, elétrico, eletrônico, computacional, etc.); e (ii) classificação funcional, na qual o processo é classificado pelas funções que os elementos cumprem (sistema de aquecimento, sistema de elevação, etc.).

Cada subsistema identificado deverá ser descrito e acompanhado de um desenho técnico ilustrativo.

#### Tarefa 1.3.8: Identificar o fluxo de informação do processo

Nesta tarefa será identificado o fluxo da informação necessária para transformar as necessidades do cliente a um produto final desejado.

A análise deve envolver os *softwares* utilizados na fase de planejamento e pré-processamento do modelo digital, além dos *softwares* do processo de fabricação.

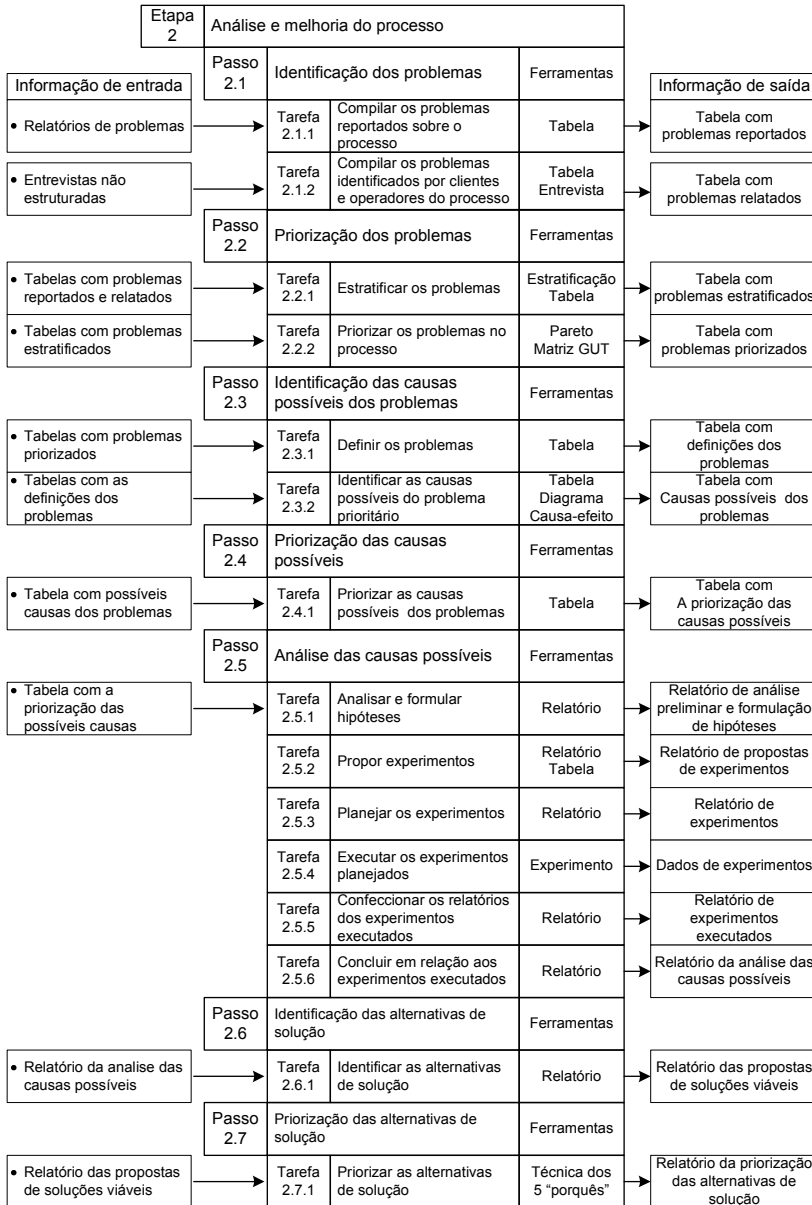
### 3.3 DESCRIÇÃO DA ETAPA 2: ANÁLISE E MELHORIA DO PROCESSO

A presente etapa corresponde à descrição da adaptação da MAMP descrita por Galvão e Mendonça (1996), para processos de fabricação de produtos, com o objetivo de determinar as causas dos problemas apresentados no processo sob análise, e procurar soluções a serem implementadas para reduzi-las ou eliminá-las.

A seguir são descritos os passos e as tarefas que constituem a etapa 2, cujo diagrama de fluxo é apresentado na figura 3.5.

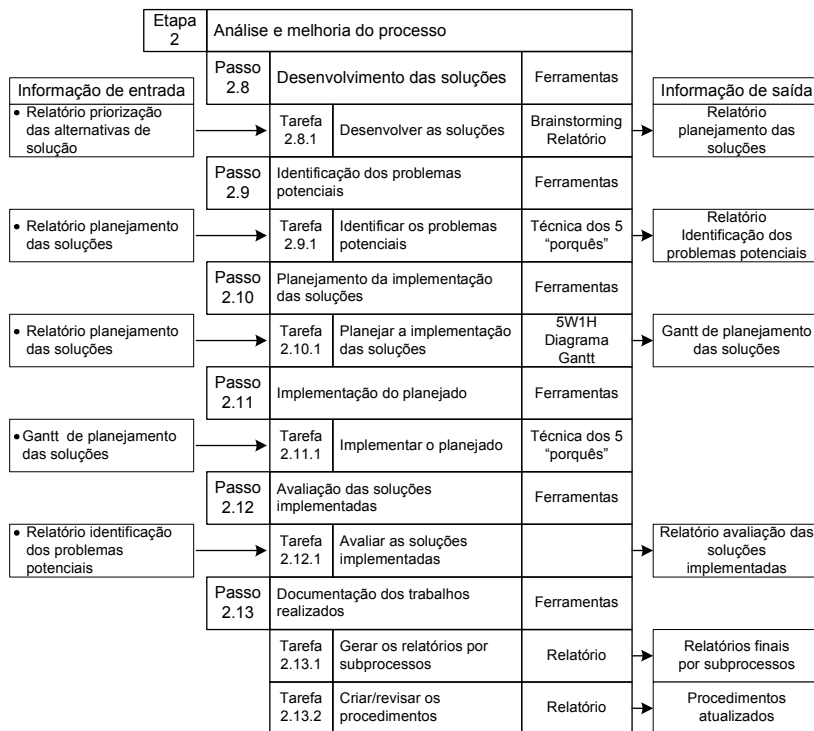
#### **3.3.1 Passo 2.1 – Identificação dos problemas**

Tanto para Werkema (1995) como para Galvão e Mendonça (1996), um problema é o resultado indesejado de um processo. A MAMP considera o erro como ponto de partida para a melhoria de um processo imperfeito.



**Figura 3.5 – Etapa 2: Análise e melhoria do EP (continua)**





**Figura 3.5 – Etapa 2: Análise e melhoria do EP (conclusão)**

Tarefa 2.1.1: Compilar os problemas reportados sobre o processo

Nesta tarefa serão compilados os problemas (ex. defeitos, falhas e erros) reportados em relatórios relativos a problemas no processo de fabricação e/ou nos produtos fabricados.

Tarefa 2.1.2: Compilar os problemas identificados por clientes e operadores do processo

Nesta tarefa serão compilados os problemas identificados ou percebidos por clientes, operadores e/ou usuários do processo. Os problemas podem ser identificados por meio de pesquisas de opinião e satisfação dos clientes, em relação aos produtos, e de opinião dos operadores em relação ao funcionamento do processo. As entrevistas também constituem uma importante fonte de informação.

Recomenda-se, no final deste passo, organizar as informações compiladas e geradas, constituindo uma lista de problemas do processo.

### **3.3.2 Passo 2.2 – Priorização dos problemas**

Nos casos em que o número de problemas seja elevado, sugere-se estratificá-los antes de priorizá-los, para uma melhor análise.

#### **Tarefa 2.2.1: Estratificar os problemas**

A estratificação é uma ferramenta de qualidade, que segundo Júnior (2003, p.93) “consiste no desdobramento de dados, a partir de um levantamento ocorrido, em categorias, grupos ou [...] estratos, para determinar sua composição”. No caso de processos de fabricação, os problemas podem ser estratificados segundo: (i) o lugar de origem do problema (ex. subprocessos, subsistemas); (ii) o tipo de falha (ex. falha elétrica, falha operacional); (iii) o tipo de defeito (ex. rugosidade superficial, rachadura); ou (iv) o tipo de erro (ex. erro de posicionamento, erro de regulagem); entre outras. A lista dos problemas elaborada no passo anterior deverá ser estratificada para uma adequada análise posterior.

#### **Tarefa 2.2.2: Priorizar os problemas no processo**

Segundo Galvão e Mendonça (1996, p.40), a priorização dos problemas procura determinar uma ordem de importância para os problemas a fim de começar a resolvê-los, pois “se tudo é prioritário, nada é prioritário”.

Algumas técnicas para a priorização dos problemas são: (i) a Folha de Verificação, obtida geralmente em pesquisas de satisfação; (ii) o Diagrama de Pareto, que permite mostrar graficamente a ordem de importância dos problemas; e (iii) a Matriz GUT, baseada nas três dimensões dos problemas - a gravidade, a urgência e a tendência.

A listagem dos problemas obtida na tarefa 2.2.1 deverá ser ordenada por prioridade, para cada estratificação realizada.

### **3.3.3 Passo 2.3 – Identificação das causas possíveis dos problemas**

Para Galvão e Mendonça (1996, p.44) “resolver um problema” significa resolver as causas do problema e melhorar o processo”. Aguiar (2002, p.70) recomenda fazer o estabelecimento do processo relacionado ao problema específico procurando obter um conhecimento do

funcionamento do processo que possibilite identificar as causas possíveis do problema. Por outro lado, de acordo com Masing (1994, apud. PAHL, 2005), “80% de todas as falhas são devidas ao desenvolvimento, projeto e planejamento deficientes”.

Caso os problemas reportados e/ou identificados no passo 2.1 estejam expressados na linguagem ou na visão da pessoa que o relatou ou não estejam bem formulados ou claramente entendíveis, deverão ser expressados de forma objetiva e em uma linguagem técnica para posteriormente defini-los.

Para atingir esses objetivos, o passo 2.3 foi dividido em duas tarefas, descritas a seguir.

#### Tarefa 2.3.1: Definir os problemas

Definir o problema visa explicá-lo com precisão, determinando os seus limites ou abrangência. A definição de cada problema deverá ser adicionada à lista dos problemas estratificados e priorizados da tarefa 2.2.2.

#### Tarefa 2.3.2: Identificar as causas possíveis do problema prioritário

Nesta tarefa podem ser utilizadas as seguintes ferramentas de qualidade: (i) *brainstorming* (tempestade de ideias), que permite gerar ideias de possíveis causas dos problemas; (ii) diagrama de causa e efeito, que permite representar graficamente as causas possíveis que levam a um determinado efeito, agrupadas por categorias; (iii) diagrama de árvore, que permite desdobrar o problema em suas causas de origem, em forma estruturada; (iv) técnica dos 5 “porquês”, que permite identificar a causa real de um problema através da resposta, em sequência de 5 perguntas que iniciam em “por que...”, para cada um dos problemas (GALVÃO e MENDONÇA, 1996; JÚNIOR, 2003); (v) planejamento e análise de experimentos, que permite identificar as suas causas e quantificar os seus efeitos; e (vi) análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA), que procura “identificar, quantificar e eliminar falhas conhecidas ou potenciais, erros e outros problemas [...] antes que elas aconteçam” (AGUIAR, 2002, p.103).

Recomenda-se elaborar uma tabela, com a listagem dos problemas estratificados e priorizados da tarefa 2.3.1, incluindo as causas possíveis identificadas para cada problema definido.

### **3.3.4 Passo 2.4 – Priorização das causas possíveis**

Segundo Galvão e Mendonça (1996, p.47), várias ferramentas podem ser utilizadas para priorizar as causas do problema sob análise, entre elas: (i) matriz de priorização das causas, técnica grupal que inclui a participação de pessoas com experiência no tema, caso exista um grande número de problemas, a fim de reduzi-los em 30%; e (ii) racionalização das causas, para uma maior objetividade no tratamento dos problemas do processo.

Recomenda-se ordenar, segundo a priorização obtida, as causas possíveis identificadas para cada problema da tabela da tarefa 2.3.2.

### **3.3.5 Passo 2.5 – Análise das causas possíveis**

Processos complexos, que utilizam tecnologias pouco conhecidas, precisam de: (i) uma análise técnica mais aprofundada, (ii) a participação de pessoas qualificadas nas áreas de análise, e (iii) o planejamento, a execução e a análise de experimentos adequados, para permitir uma apropriada identificação das causas do problema. Por esse motivo a MAMP foi ampliada com o passo 2.5, composto pelas tarefas descritas a seguir.

#### **Tarefa 2.5.1: Analisar e formular hipóteses**

Uma análise preliminar das causas possíveis, identificadas na tarefa 2.3.2, pode ser realizada com base na informação dos manuais e folhas de dados de peças e partes do processo, e na informação obtida na etapa 1, resultando em uma ou mais hipóteses, que terão que ser aprovadas ou rejeitadas por meio de experimentos planejados.

#### **Tarefa 2.5.2: Propor experimentos**

Para Montgomery (2001) um experimento planejado é “um teste, ou série de testes, no qual são realizadas mudanças propositais nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída”. A análise preliminar também requer fazer medições planejadas para aprovar ou rejeitar hipóteses, por isso, nesta dissertação, a definição de experimentos planejados será utilizada para se referir também às medições e aos testes planejados.

Uma abordagem estatística no planejamento e na análise dos experimentos requer clareza sobre o que será estudado e sobre a forma

em que os dados serão coletados. Com esse objetivo deverá ser elaborada uma tabela com as propostas dos experimentos planejados para cada causa dos problemas sob análise.

#### Tarefa 2.5.3: Planejar os experimentos

O planejamento de experimentos é um processo demorado, que requer um grande número de decisões em cada estágio para uma adequada análise. Dean e Voss (1999, p. 7-14) apresentam uma guia para o planejamento de experimentos. Outra técnica para o Planejamento de Experimentos (DOE-Design Of Experiments) ou método de projeto de experimentos, também é utilizada para planejar experimentos, coletar dados e analisá-los em forma estatisticamente

#### Tarefa 2.5.4: Executar os experimentos planejados

Os experimentos planejados na tarefa 2.5.3 devem ser executados procurando um adequado tratamento para a coleta dos dados. Recomenda-se descrever as condições sob as quais o experimento está sendo executado e que não foram consideradas no planejamento.

#### Tarefa 2.5.5: Confeccionar os relatórios dos experimentos executados

Os experimentos executados devem ser detalhados e registrados em relatório durante a tarefa de análise dos dados, visando servir de informação para futuras consultas e repetições.

#### Tarefa 2.5.6: Concluir em relação aos experimentos executados

A análise dos experimentos executados permitirá obter conclusões objetivas dos problemas sob estudo, baseadas em dados numéricos. Algumas vezes uma análise poderá não gerar uma conclusão direta e precisará de uma posterior análise para validar as conclusões preliminares. As conclusões obtidas nesta tarefa também servirão de subsídio para a identificação de soluções.

Cada tarefa deste passo dará origem a relatórios escritos para cada uma das causas sob análise.

### **3.3.6 Passo 2.6 – Identificação das alternativas de solução**

As soluções baseadas nas conclusões da análise de cada problema visam reduzir ou eliminar as causas básicas para esses problemas. Por isso, neste passo é importante registrar e não descartar qualquer solução, seja por custo, tempo de implementação, ou complexidade.

É preciso salientar que as soluções propostas neste passo serão dependentes do conhecimento do analista e dos responsáveis por sua identificação. Cabe lembrar que processos multidisciplinares exigem conhecimentos igualmente multidisciplinares e que as pessoas que tomam as decisões de financiamento das propostas de soluções não são as mesmas que analisam o processo, o que pode influir na prioridade de cada solução e na ordem em que serão implementadas.

Segundo Galvão e Mendonça (1996, p.52), as possíveis soluções podem ser de ação: (i) corretiva, eliminando o problema através da eliminação de sua causa originária; (ii) adaptativa, bloqueando ou atenuando os efeitos do problema, quando a causa originária não pode ser eliminada; e (iii) provisória, quando o processo não pode parar ou quando o problema apresenta uma condição insegura para o processo ou pessoas, dando tempo para uma solução do tipo (i) ou (ii).

Finalmente, as alternativas de solução podem perseguir objetivos tais como: simplificação do processo, redução do tempo de fabricação, padronização do processo ou procedimentos operacionais, e automação dos subprocessos ou do processo em geral.

### **3.3.7 Passo 2.7 – Priorização das alternativas de solução**

A priorização das alternativas de solução depende de vários fatores, tais como: custo e tempo para a implementação das soluções, redução do tempo de fabricação, segurança para os usuários, cumprimento das normas legais, aumento da produção, e aumento da qualidade do produto final. Galvão e Mendonça (1996, p.54) descrevem duas ferramentas que permitem priorizar as alternativas de solução: (i) a matriz de relacionamento soluções x causas e ii) a matriz BASICO (Benefícios para a empresa, Abrangência, Satisfação do cliente interno, Investimentos requeridos, Cliente externo satisfeito, Operacionalidade Simples).

### **3.3.8 Passo 2.8 – Desenvolvimento das soluções**

O desenvolvimento das alternativas de solução escolhidas significa buscar a maneira pela qual a solução pode ser implementada, considerando sua viabilidade, a necessidade de capacitação e treinamento dos operadores e a revisão dos procedimentos existentes.

### **3.3.9 Passo 2.9 – Identificação de problemas potenciais**

A identificação de problemas potenciais significa analisar os possíveis riscos envolvidos com a implementação das soluções propostas, as que podem entrar em conflito com outras soluções ou com outras partes do processo. Neste passo procura-se prever os possíveis problemas durante a sua implementação, tendo uma visão crítica que garanta sua correta implementação.

### **3.3.10 Passo 2.10 – Planejamento da implementação das soluções**

O planejamento da implementação, que constitui uma formalização do passo 2.8, deve ser realizado depois de identificados e solucionados os potenciais problemas determinados no passo 2.9. Um cronograma e a ferramenta 5W1H, para a elaboração dos planos de ação, podem ser utilizados com esse objetivo.

O planejamento também pode incluir: (i) capacitação da equipe envolvida; (ii) elaboração de planos, diagramas, procedimentos específicos e formulários a serem utilizados; e (iii) recursos materiais e econômicos, entre outros. A ferramenta diagrama de Gantt pode ser utilizada para administrar o tempo, os recursos e as pessoas.

### **3.3.11 Passo 2.11 – Implementação do planejado**

Neste passo é implementado ou executado o planejado no passo anterior. Este passo é o mais delicado de todo o processo da MAMP, pois “envolve sérios riscos de conflito com a estrutura formal, sendo fundamental bastante comprometimento das pessoas envolvidas com as melhorias propostas” (GALVÃO E MENDONÇA, 1996, p.67).

### **3.3.12 Passo 2.12 – Avaliação das soluções implementadas**

As avaliações das soluções implementadas podem ser realizadas por meio dos mesmos experimentos usados durante a análise das causas dos problemas, comparando-as com os resultados obtidos no passo 2.5. As divergências entre a situação atual e a desejada podem caracterizar outros problemas que deverão ser considerados no passo 2.1 desta etapa.

### 3.3.13 Passo 2.13 – Documentação dos trabalhos realizados

Documentar significa registrar em forma ordenada todas as atividades que foram realizadas durante a aplicação da metodologia. Para evitar a perda de informação que possa ser relevante para a aplicação e desenvolvimento da metodologia propõe-se a confecção dos relatórios logo após executadas as diferentes tarefas, as quais servirão de base na elaboração dos relatórios e informes finais.

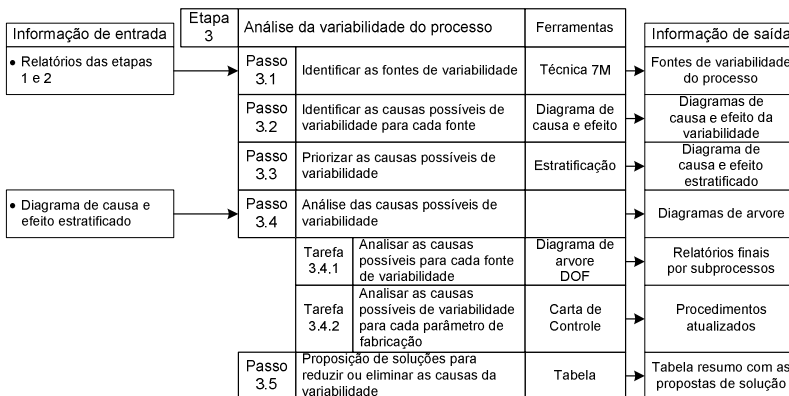
Entre as ferramentas que podem ser utilizadas durante a execução da metodologia, encontram-se: (i) o livro de registros, (ii) gravador de áudio/vídeo, (iii) câmara fotográfica e (iv) rascunhos de anotações, desenhos, planos e diagramas de fluxo.

## 3.4 DESCRIÇÃO DA ETAPA 3: ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO PROCESSO

A presente etapa corresponde à descrição da adaptação da MAMP, com o objetivo de analisar e determinar as causas da variabilidade apresentada no processo sob análise, em uma primeira instância, e propor soluções a serem implementadas, em um estágio avançado, para reduzi-las ou eliminá-las.

As definições de processo, variabilidade do processo, além do conceito fonte de variabilidade e da classificação das causas da variabilidade, foram apresentadas na seção 2.1.6.

A seguir são descritos os passos e as tarefas que constituem a etapa 3, cujo diagrama de fluxo é apresentado na figura 3.6.



**Figura 3.6 – Etapa 3: Análise da variabilidade do processo**



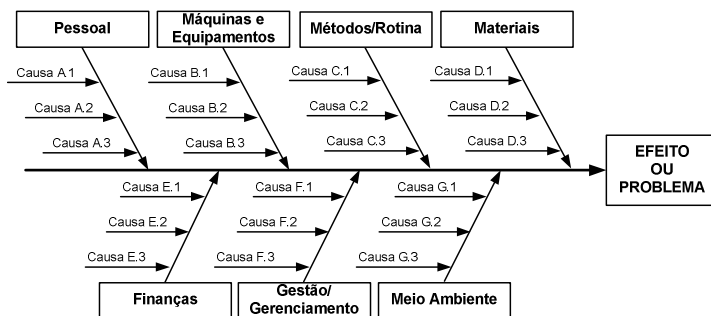
### 3.4.1 Passo 3.1 – Identificação das fontes de variabilidade

Para facilitar a classificação ou agrupamento das causas possíveis de variabilidade, Galvão e Mendonça (1996, p. 46) propõem a utilização da técnica conhecida como 7M. As primeiras 6M referem-se a considerar as fontes *Man* (pessoal), *Machine* (máquinas/equipamentos), *Method* (método/rotina), *Material* (materiais), *Money* (finanças), *Management* (gestão/gerenciamento), e o último M sendo uma adaptação ao português, para a fonte Meio Ambiente (Galvão e Mendonça, 1996).

### 3.4.2 Passo 3.2 - Identificação das causas possíveis de variabilidade para cada fonte

O passo 3.2 será iniciado com a elaboração de um Diagrama de Causa e Efeito. O uso do Diagrama de Causa e Efeito, também chamado diagrama de Ishikawa ou simplesmente Espinha-de-peixe, “torna possível a rápida identificação de todas as causas relacionadas a um determinado problema (efeito) e sua imediata correlação com um assunto global” (GALVÃO e MENDONÇA, 1996, p.46).

A figura 3.7 apresenta o Diagrama de Causa e Efeito, identificando as possíveis fontes de variabilidade (segundo proposto pela técnica 7M).



**Figura 3.7 – Diagrama de Causa e Efeito**  
Fonte: adaptado de Galvão e Mendonça (1996)

A seguir devem ser identificadas as causas possíveis de variabilidade com auxílio da ferramenta *brainstorming* (JUNIOR, 2003, p.88) e da técnica dos 5 “porquês” (GALVÃO e MENDONÇA, 1996, p.46) e classificadas segundo sua fonte de variabilidade.

Segundo Werkema (1995, p.5), “existem dois tipos de causas para a variação na qualidade dos produtos provenientes de um processo: Causas Comuns ou Aleatórias e Causas Especiais ou Assinaláveis”.

As Causas Comuns ou Aleatórias são inerentes ao processo de fabricação. Já as causas especiais ou assinaláveis surgem esporadicamente, devido a uma situação particular (falhas e defeitos nos componentes físicos, desvios nos procedimentos de manutenção, de operação e de fabricação de peças, entre outros).

### **3.4.3 Passo 3.3 – Priorização das causas possíveis de variabilidade**

A priorização das causas possíveis de variabilidade será realizada seguindo as sugestões realizadas no passo 2.2 da seção 3.3.2.

Cada causa poderá ser identificada de acordo com a sua fonte de variabilidade e com um número, em forma sequencial, segundo ilustrado na mesma figura 3.7.

### **3.4.4 Passo 3.4 - Análise das causas possíveis de variabilidade**

A análise das causas possíveis de variabilidade identificadas no passo 3.2 será realizada em duas tarefas: (i) análise das causas possíveis para cada fonte de variabilidade, e (ii) análise das causas possíveis de variabilidade dos parâmetros de fabricação.

#### Tarefa 3.4.1: Analisar as causas possíveis para cada fonte de variabilidade

A análise das causas possíveis será realizada, em um primeiro estágio, através de um diagrama de árvore, também conhecido como “Árvore de Falha” (JÚNIOR, 2003, p.88), com o desdobramento sistemático até suas causas-raízes. Em um segundo estágio, a análise das causas possíveis será realizada por meio de experimentos, testes e medições, conforme descrito no passo 2.5 da seção 3.3.5, visando determinar as suas causas reais.

#### Tarefa 3.4.2: Analisar as causas possíveis de variabilidade para cada parâmetro de fabricação

Os parâmetros de fabricação correspondem aos parâmetros definidos como necessários para uma especificação completa ou relevante na fabricação de um objeto, com características geométricas e microestruturais desejadas. Os parâmetros de fabricação podem-se dividir em: (i) parâmetros de máquina, dependentes das características

específicas do equipamento utilizado para a realização de um determinado processo de fabricação (ex.: velocidade do eixo, taxas de avanço da ferramenta, etc.) conhecidos pelo fabricante da máquina; e (ii) parâmetros de processo, independentes da máquina utilizada e próprios para cada tipo de processos de fabricação (ex.: SLS, estereolitografia, etc.), sendo dependentes das características da matéria-prima utilizada e das especificações desejadas para o produto final.

A análise das causas possíveis de variabilidade será iniciada com a compilação dos parâmetros de fabricação utilizados no processo, para posteriormente realizar a análise da variabilidade dos parâmetros de fabricação identificados.

### **3.4.5 Passo 3.5 – Proposição de soluções para reduzir ou eliminar as causas da variabilidade**

A proposição de soluções para reduzir ou eliminar as causas da variabilidade será realizada seguindo as sugestões realizadas no passo 2.6 da seção 3.3.6.

Do resultado deste passo serão obtidas propostas de soluções para a redução ou eliminação da variabilidade no processo de fabricação.

No capítulo a seguir serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia descrita.

## **3.5 RESUMO DO CAPÍTULO**

Neste capítulo foi descrita a metodologia adaptada dos modelos de referência apresentados no capítulo 2, para ser aplicada na análise da variabilidade no processo de fabricação do EP para a fabricação de peças com FGM.

Conforme mencionado, a metodologia descrita para ser aplicada na análise das causas de variabilidade do EP foi adaptada dos modelos de referência PDCA e MAMP apresentadas nas seções 2.2.2 e 2.2.3, respectivamente, dividida em 3 etapas.

A etapa 1 fornecerá o conhecimento do processo de fabricação requerido para as etapas subsequentes. A etapa 2 permitirá analisar os problemas apresentados no EP, visando melhorar o processo de fabricação atual por meio da sua eliminação ou redução. Finalmente, a etapa 3 permitirá analisar a variabilidade apresentada no seu processo de fabricação, visando sua eliminação ou redução.



## 4 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada da aplicação da metodologia descrita no capítulo 3 visando a análise da variabilidade no processo de fabricação de peças no equipamento-protótipo de SLS do laboratório Cimject.

### 4.1 ETAPA 1: CONHECIMENTO DO EQUIPAMENTO DE SLS

Conforme mencionado na seção 3.2, esta etapa fornecerá os subsídios para as etapas seguintes da metodologia, com base na realização de 3 passos.

#### 4.1.1 Passo 1.1 - Compilação das informações do processo

##### Tarefa 1.1.1: Compilar as informações disponíveis aos usuários

Informações relacionadas com a descrição do EP e as pesquisas desenvolvidas foram apresentadas na seção 2.1.3, com base nas informações colhidas das dissertações e teses. Entretanto, não foram encontradas informações relativas à regulagem, calibração ou manutenção do EP. Por esse motivo foi desenvolvido um questionário visando coletar informações sobre a documentação utilizada tanto durante o período de capacitação dos usuários como no período de uso do EP. O questionário, apresentado no apêndice A1, foi aplicado aos três únicos usuários do EP disponíveis no momento da pesquisa, o que permitiu evidenciar que:

- (i) as peças fabricadas eram de geometria simples, com/sem FGM e com/sem a utilização de preaquecimento da matéria-prima;
- (ii) dois entrevistados declararam não conhecer ou ter acessado algum documento fornecido pelo fabricante dos componentes do equipamento;
- (iii) a principal fonte de informação utilizada pelos usuários foram teses e dissertações relacionadas ao EP;
- (iv) dois usuários declararam ter recebido capacitação, por parte de alunos de pós-graduação, por tempo maior que 10 horas;
- (v) a forma de autocapacitação utilizada foi por meio da leitura de teses, dissertações, pesquisas pela internet e por prática adquirida pelo uso;
- (vi) dois dos três usuários se auto qualificaram como experientes no uso do EP.

## Tarefa 1.1.2: Compilar as informações dos componentes do processo

### *Subtarefa 1.1.2.1: Identificar os componentes do processo*

A identificação e registro de todos os componentes do processo de fabricação foi realizada, em uma primeira tentativa, sem considerar uma ordem ou agrupamento específico, apenas tentando seguir uma sequência ordenada, que garantisse que todos eles fizessem parte da lista de componentes. Informações tais como fornecedor, modelo, função e características gerais foram acrescentadas posteriormente. Em uma segunda tentativa, os componentes foram agrupados por sua localização e funcionalidade, para o qual o EP foi dividido em duas partes: Sistema Computacional (SC) e Máquina Protótipo (MP). A MP também foi dividida em duas partes: subsistema SLS e subsistema eletrônico (comando/controle), o que é ilustrado na figura 4.1.

### *Subtarefa 1.1.2.2: Compilar a informação dos componentes comerciais do processo*

Os principais componentes comerciais identificados no processo foram: (1) Laser de CO<sub>2</sub> de 25 W (instalado em 2011); (2) controlador do Laser; (3) cabeçote de marcação; (4) placa eletrônica digital/análogica digital/análogica (CIO-DDA06), localizada no interior do computador; (5) mesa elevadora; (6) controlador de temperatura; (7) relógio comparador; (8) motor de passo; (9) motor DC; (10) controlador do Laser (UC-1000); e (11) controlador de temperatura (MDH-K) da resistência elétrica.

No início desta etapa, não encontravam-se disponíveis informações desses componentes aos usuários do EP, motivo pelo qual foram procuradas as folhas de dados e os manuais de operação para cada componente comercial do EP, os que serão importantes fontes de consulta durante as seguintes etapas da metodologia.

Durante o andamento desta tarefa foi evidenciado que um mesmo componente era denominado de diferentes formas nos documentos identificados na tarefa 1.1.1. Com o intuito de padronizá-los, foram identificados e comparados com os nomes utilizados comercialmente, resultando nos termos usados na presente dissertação.

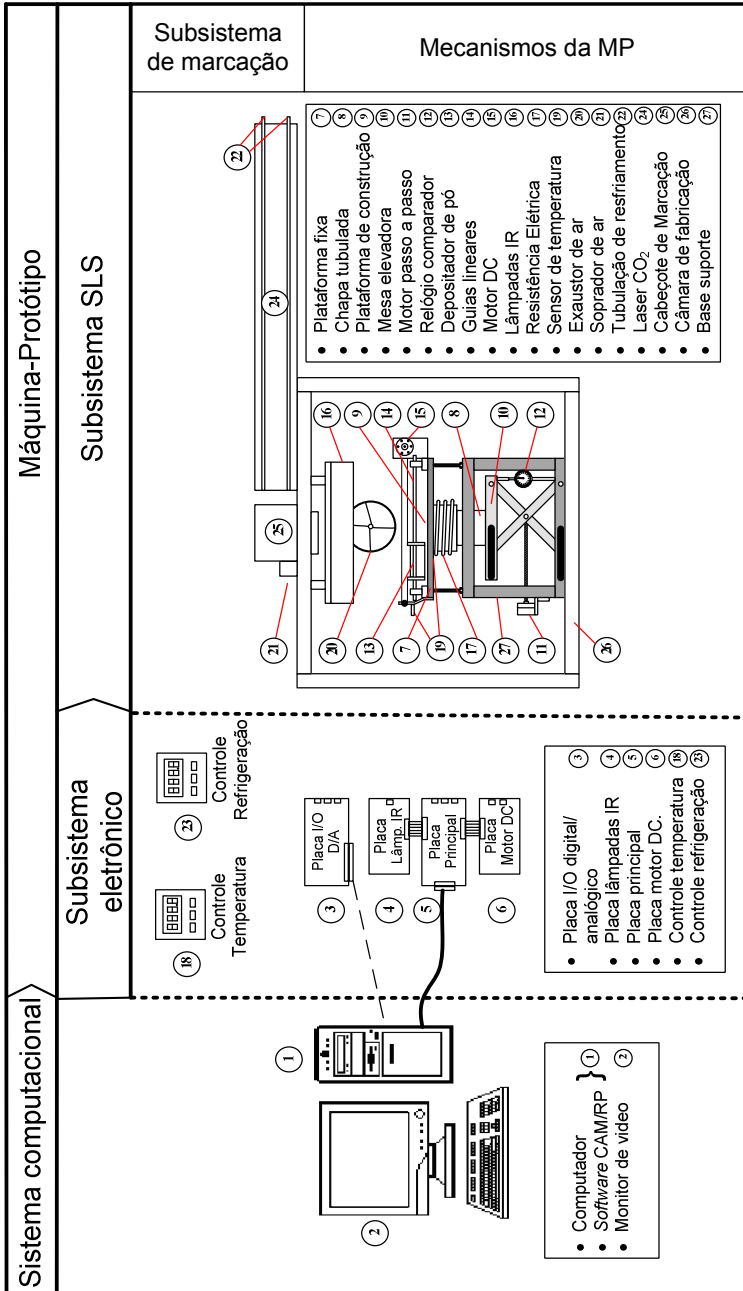


Figura 4.1 – Identificação dos componentes do EP

*Subtarefa 1.1.2.3: Compilar a informação dos componentes não comerciais do EP*

Os principais componentes não comerciais identificados no EP foram: (i) câmara de fabricação; (ii) mecanismo de deposição de pó; (iii) placa-protótipo<sup>12</sup> principal de comando da MP; (iv) placa-protótipo auxiliar de ativação do motor DC para deslocamento do depositador; e (v) placa-protótipo para o ligamento/desligamento das lâmpadas IR.

Informações em relação aos pontos (i), (ii), (iii), (iv) encontram-se em relatórios e trabalhos de dissertações apresentadas na seção 2.1.5.

Nesta subtarefa foram realizadas os leiautes dos circuitos eletrônicos das três placas-protótipo.

A listagem dos componentes comerciais e não comerciais do EP, além dos leiautes dos circuitos eletrônicos das três placas-protótipo encontram-se disponíveis no “Relatório de Componentes”, que forma parte do arquivador denominado Relatório do Equipamento-Protótipo (REP) de SLS, que constitui um documento complementar à presente dissertação.

Tarefa 1.1.3: Compilar as normas e os procedimentos de operação e fabricação

A primeira descrição do funcionamento e da sequência geral de fabricação encontra-se no trabalho de Kulman (2006, p.41,50,62,84,101), incluindo um resumo do *software* da máquina e um resumo do funcionamento da placa principal.

A primeira abordagem de procedimentos de operação e fabricação é apresentada por Dabbas (2006, p. 45-48), descrevendo as etapas gerais de fabricação. Santos (2009) descreve o processo sequencial de fabricação do ponto de vista do *software* da máquina.

Visando detalhar melhor a forma em que o EP é operado e os passos requeridos para a fabricação, foram realizadas entrevistas com dois usuários experientes no uso do equipamento, cujo resultado permitiu a elaboração de um “Relatório de procedimento de operação e fabricação”, parte integrante do REP.

---

<sup>12</sup> Placas eletrônicas cujos componentes se encontram montados em placas padronizadas.



O procedimento elaborado consta de 50 passos, estruturados em 5 secções: (a) pré-processamento do desenho digital, (b) preparação do EP, (c) construção de uma camada base, (d) construção da peça, e (e) retirada da peça da câmara e pós-processamento.

Posteriormente à elaboração desse relatório, foi encontrado um documento de duas folhas intitulado: "Guia para operação da máquina SLS" sem autoria nem data de elaboração, listando sequencialmente três modos de operação: (i) modo de operação da máquina SLS (8 passos), (ii) modo de operação do *software* CAM (3 passos), e (iii) modo de operação do *software* da máquina (10 passos).

Procedimentos para a preparação do material, a determinação da distribuição granulométrica e da morfologia das partículas têm sido descritos por Dabbas (2006, p. 40).

Outros procedimentos técnicos mais específicos encontram-se descritos nos próprios manuais de manutenção e operação dos componentes comerciais. Uma tabela com a localização de cada procedimento também se encontra no mesmo relatório.

Como já mencionado, não foram evidenciados procedimentos de manutenção, regulagem ou calibração no EP, nem trabalhos de pós-processamento das peças fabricadas.

#### Tarefa 1.1.4: Compilar as informações que deram origem ao processo de fabricação

A origem do EP encontra-se nos primeiros trabalhos desenvolvidos no LabMat para gravar desenhos 2D em uma superfície cerâmica, utilizando um feixe de Laser seguindo uma trajetória definida em um arquivo de computador.

Trabalhos posteriores testaram o equipamento com o objetivo de sinterizar uma camada de polímero em pó. O sucesso desses testes e o desenvolvimento de um *software* específico para SLS, permitiram iniciar os primeiros trabalhos de pesquisa em uma nova área do conhecimento, com a fabricação das primeiras peças poliméricas em 3D. Finalmente ao equipamento foi acrescentado um mecanismo de deposição para FGM e instalado um sistema de aquecimento para a camada de pó.

A tabela A2 do apêndice A2 apresenta um resumo da evolução do sistema de gravação até o equipamento atual, baseado nos trabalhos descritos, e informações colhidas em reuniões com os responsáveis do equipamento original.

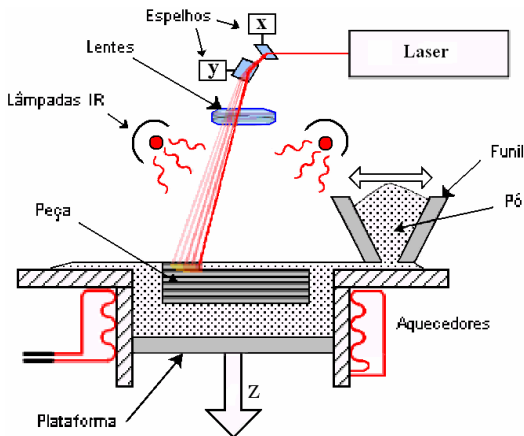
#### 4.1.2 Passo 1.2 – Mapeamento do processo de fabricação

##### Tarefa 1.2.1: Descrever de modo geral o processo sob análise

O EP apresenta os princípios básicos de um equipamento de SLS, como descrito na seção 2.1.3. Um equipamento de SLS comercial utiliza um rolo para espalhar, nivelar e compactar a camada de pó. Já o EP utiliza um mecanismo de deposição que além de depositar, espalha e nivela a camada, permite depositar diferentes materiais em faixas paralelas, mas sem compactar a camada.

Uma descrição geral do princípio de funcionamento do EP foi apresentada por Dabbas (2006, p.47). O material particulado é depositado sobre a PC, formando uma camada, que é sinterizada por meio de um feixe do Laser seguindo uma trajetória definida em um arquivo digital. Posteriormente a PC é deslocada para baixo a uma distância igual à espessura da próxima camada que novamente é sinterizada. Esse procedimento se repete até que a peça final seja fabricada. Durante todo esse processo a PC e o ambiente interno encontram-se aquecidos para minimizar a contração e o empenamento da peça.

Dabbas (2006) e Kulman (2006) fornecem a primeira ilustração do EP utilizada para descrever a localização dos seus principais componentes. Já Paggi (2008, p.23) fornece a primeira ilustração do processo de fabricação, acrescentando as fontes de aquecimento da PC e da superfície da camada, ilustrada na figura 4.2.



**Figura 4.2 – Esquema do processo de fabricação do EP**

Fonte: Paggi (2007, apud PAGGI (2008))

Baseado na informação compilada e no procedimento de fabricação, foi aplicada a ferramenta de qualidade 5W1H visando conhecer os processos que ocorrem no interior da MP. O apêndice A3 apresenta os resultados da aplicação dessa ferramenta.

#### Tarefa 1.2.2: Identificar a cadeia cliente-fornecedor externa

##### *Subtarefa 1.2.2.1: Identificar os clientes do processo*

Os clientes dos produtos fabricados pelo EP são pesquisadores da área de materiais (alunos de iniciação científica, mestrandos e doctorandos) e professores dos laboratórios LabMat e Cimject que atuam na pesquisa de novas técnicas e materiais para RP.

##### *Subtarefa 1.2.2.2: Determinar as necessidades dos clientes*

As necessidades dos clientes foram levantadas a partir dos trabalhos de dissertações e teses compilados na tarefa 1.1.1 e da aplicação de um questionário a um responsável do equipamento, e que podem ser resumidas em: (i) obtenção de peças poliméricas e seus parâmetros de processabilidade; (ii) obtenção de peças poliméricas com variação gradual de material em faixas paralelas; (iii) obtenção de peças poliméricas com geometrias baseadas em um único ou múltiplos desenhos 2D, segundo dimensões definidas em um arquivo digital; (iv) obtenção de peças poliméricas com controle espacial da mistura; e (v) obtenção de peças com repetitividade dimensional e microestrutural.

Neste ponto é preciso lembrar que o EP foi desenvolvido para testar a sinterização entre diferentes matérias-primas poliméricas (necessidades i e ii), e posteriormente testada para as necessidades (iii) e (iv), sendo a necessidade (v) uma nova necessidade para o EP decorrente dos trabalhos de pesquisas desenvolvidos.

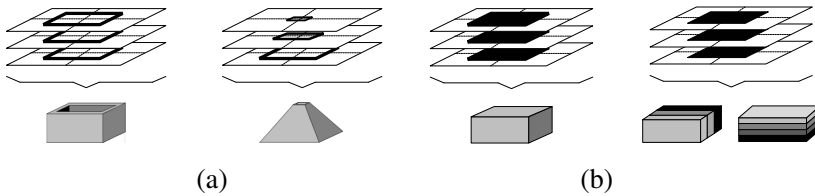
##### *Subtarefa 1.2.2.3: Identificar os produtos do processo*

No EP pode-se fabricar: (a) peças de pequeno porte a partir de um único ou múltiplos desenhos 2D; e (b) peças em um único material ou com gradação funcional nos eixos X ou Z.

A figura 4.3 apresenta os dois tipos de peças capazes de ser fabricadas pelo EP.

Com o objetivo de registrar e organizar a informação da peça a ser fabricada foi proposto um formulário para auxiliar a elaboração de um plano de fabricação (ver o apêndice A.4), contendo as especificações mínimas requeridas para fabricar uma peça, traduzindo as necessidades dos clientes em especificações de fabricação. O plano de fabricação,

além de padronizar os requerimentos, permitirá reproduzir as condições do processo de fabricação.



**Figura 4.3 – Peças fabricadas (a) a partir de um/vários desenhos 2D, e (b) sem/com FGM**

*Subtarefa 1.2.2.4: Determinar as características do produto final*

Com base nas necessidades dos clientes foram determinadas as seguintes características desejadas para os produtos, descritos na tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Características do produto final do EP**

Características de qualidade do produto final	
(a) Peças sem FGM	(b) Peças com FGM
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acabamento superficial uniforme.</li> <li>- Espessura da camada uniforme.</li> <li>- Mínima variação dimensional no plano x e y, em relação ao modelo computacional da camada.</li> <li>- Mínima variação dimensional da espessura da camada (eixo z) em relação ao modelo computacional da camada.</li> <li>- Camadas sem torção nem empenamentos.</li> <li>- Camadas corretamente sinterizadas e sem degradação do material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesmas características que as descritas para peças sem FGM.</li> <li>- Faixas de materiais corretamente sinterizadas e sem degradação do material.</li> <li>- Linhas divisórias longitudinais devem ser retas, paralelas e regulares em sua espessura.</li> <li>- O material e sua coloração no interior de cada faixa devem ser homogêneos.</li> </ul>

*Subtarefa 1.2.2.5: Identificar os fornecedores*

As matérias-primas utilizadas no EP provêm de duas fontes: (i) de fornecedores industriais de pós comerciais para equipamentos de SLS, e (ii) dos próprios usuários através da preparação de pós não comercial resultante das pesquisas desenvolvidas no laboratório Cimject e das misturas desses pós para obtenção de peças com FGM.

*Subtarefa 1.2.2.6: Determinar os requerimentos aos fornecedores*

Os requerimentos aos fornecedores de pós comerciais se resumem a fornecer pós conforme especificações fornecidas nas folhas de dados para cada matéria-prima. Já os requerimentos para os pós preparados pelos próprios usuários se resumem a obter pó com características similares aos pós comerciais, para aplicações em equipamentos de SLS.

*Subtarefa 1.2.2.7: Identificar as matérias-primas*

As matérias-primas e os diferentes compósitos para FGM utilizados até o momento são apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 - Matérias-primas utilizadas no EP

<b>Materias-primas</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Diâmetro do grão de pó</b>
Grafite	Sudebras	43-300 µm
Poliamida 6 (PA6-MAZMID B260)	Mazzafero	45-300 µm
Poliamida 12 (PA12-PA2200) Poliamida 12 (PA12-Duraform)	EOSINT 3D Systems	60 µm 58 µm
Polietileno (PEAD HD 7555 LS-L)	IPIRANGA	60-300 µm
Hidroxiapatita (HAP)	FLUKA	5 µm
Polimetilmetacrilato (PMMA DH ECL)	RESARBRAS	60-200 µm
Poliestireno (PS, LCP)	Laboratório Cimject	45-300 µm
Nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNTs)	MER Corp.	140 ± 30 nm x 7 ± 2 µm

Tabela 4.3 - Compósitos utilizados para FGM no EP

<b>Materias-primas</b>	<b>Composição</b>
Poliamida 12/ Grafite	0 / 2,5 / 5 / 10 / 20 [%]
Poliamida 12/Hidroxiapatita	5 / 10 / 20 [%]
Polietileno/Hidroxiapatita	5 / 10 / 20 [%]
Poliamida 12/Polietileno	0 / 20 / 50 / 80 / 100 [%]
Poliamida 6 /Poliamida 12	---
Polimetilmetacrilato/Poliestireno	---
Poliestireno (PS, LCP)	0,5 / 1 / 3 [%]

*Subtarefa 1.2.2.8: Determinar as características das matérias-primas*

Considerando que o objetivo do EP é avaliar a processabilidade de matérias-primas e compósitos através da técnica de SLS, essas são definidas pelo próprio usuário em decorrência da funcionalidade final da peça ser fabricada.

### **4.1.3 Passo 1.3 – Mapeamento dos processos críticos**

**Tarefa 1.3.1: Dividir o processo em subprocessos**

O EP é um equipamento de SLS, portanto apresenta subprocessos comuns a essa tecnologia. A identificação dos subprocessos foi realizada a partir da lista dos componentes, dos procedimentos de fabricação e da aplicação da ferramenta 5W1H desenvolvida na tarefa 1.2.1.

Posteriormente foi necessário definir o nome mais adequado para cada subprocesso, que represente a sua função. Os subprocessos identificados na máquina-protótipo são: (i) carregamento de pó no depositador, (ii) deslocamento do depositador de pó, (iii) geração da camada de pó sobre a PC, (iv) aquecimento da camada de pó, (v) sinterização da camada de pó, (vi) exaustão de gases e de pó em suspensão no interior da câmara de fabricação, (vii) sopro da lente focal do cabeçote de marcação, (viii) deslocamento da PC, (ix) resfriamento do Laser e (x) aspiração do pó remanescente uma vez finalizada a fabricação de uma peça.

Os subprocessos que formam parte do SC serão analisados de forma independente na tarefa 1.3.8, uma vez que se trata de processos de informação.

**Tarefa 1.3.2: Identificar os subprocessos críticos**

De todos os subprocessos identificados na tarefa anterior, foram considerados críticos, aqueles que estão diretamente relacionados com o processo de fabricação da peça, os que são apresentados na figura 4.4, identificando cada subprocesso crítico, mas não especificando a sua inter-relação, nem a sequência em que eles acontecem, o que será descrito nas tarefas 1.3.4 e 1.3.6 respectivamente.

**Tarefa 1.3.3: Identificar a cadeia cliente-fornecedor interna**

A cadeia cliente-fornecedor interna foi identificada a partir da cadeia cliente-fornecedor externa (tarefa 1.2.2). As subtarefas de identificação dos clientes internos, determinação das necessidades dos clientes, identificação dos produtos internos, e determinação das

características dos produtos intermediários, são apresentadas por subprocesso nas tabelas 4.4 a 4.8.

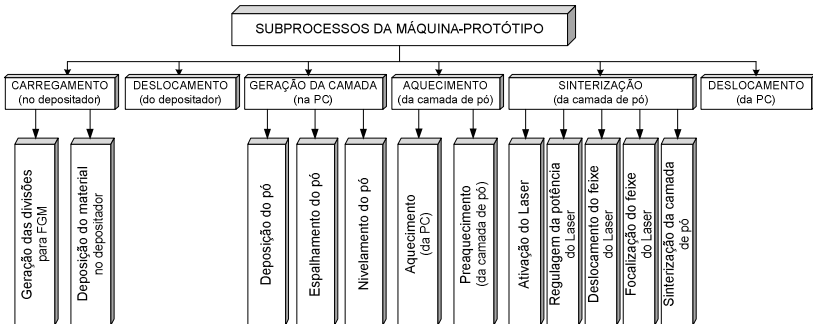
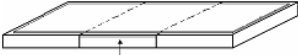
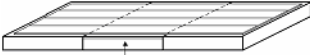


Figura 4.4 – Subprocessos da máquina-protótipo

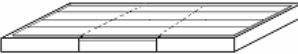
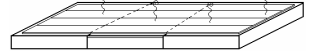
Tabela 4.4 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de carregamento de pó

Cliente interno	Subprocesso de geração da camada na plataforma de construção		
Necessidades do cliente interno	Depositador de pó com material adequado e em quantidade suficiente para construir uma camada de pó com ou sem FGM		
Identificação do produto interno			
	Depósito de pó sem divisores e com um único material	Depósito de pó com divisores e com um único material	Depósito de pó com divisores e com diferentes materiais
Características de qualidade do produto interno	Depositador com material polimérico em pó em quantidade suficiente para fabricar uma camada. Superfície depositada uniforme.	Depositador com material polimérico em pó em quantidade suficiente para fabricar uma camada, limitado por divisores separados a um comprimento $\geq$ à largura da peça final. Superfície depositada uniforme.	Depositador com mistura certa na subdivisão certa, em quantidade suficiente para fabricar uma camada. Cada subdivisão deve apresentar a dimensão predefinida no plano de fabricação. Superfície depositada uniforme.

**Tabela 4.5 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de geração da camada**

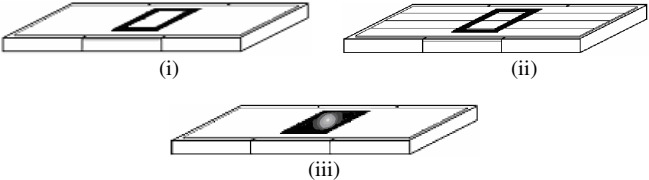
Cliente interno	Subprocesso de aquecimento da camada de pó	
Necessidades do cliente interno	Camada de pó polimérico com superfície uniforme e nivelada, apresentando o material com gradação discreta em faixas paralelas, quando corresponder, e de espessura especificada.	
Identificação do produto interno		
	Camada de pó com material homogêneo (sem FGM)	Camada de pó com material não homogêneo (com FGM)
Características de qualidade do produto interno	Camada de pó sem FGM, espalhada sobre a PC, com espessura constante, segundo o especificado no plano de fabricação e sem irregularidades na superfície, ou seja, sem apresentar ondulações, ranhuras ou vazios.	Camada de pó com FGM, espalhada sobre a PC, com espessura constante, segundo o especificado no plano de fabricação e sem irregularidades na superfície. A divisão entre as diferentes misturas deve resultar em linhas retas paralelas entre si, com largura especificada no plano de fabricação

**Tabela 4.6 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de aquecimento da camada**

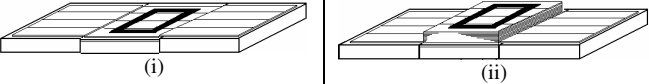
Cliente interno	Subprocesso de sinterização seletiva a Laser da camada de pó.	
Necessidades do cliente interno	Camada de pó tem que ser aquecida a um valor de 10 °C menor que a temperatura de fusão da matéria-prima ou mistura.	
Identificação do produto interno		
	Camada de pó não aquecida	Camada de pó aquecida
Características de qualidade do produto interno	Camada de pó com/sem FGM, sem aquecimento.	Camada de pó com/sem FGM, aquecida à temperatura predefinida no plano de fabricação. Temperatura uniforme sobre toda a superfície da camada.



**Tabela 4.7 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de sinterização seletiva a Laser**

Cliente interno	Subprocesso de deslocamento da plataforma de construção	
Necessidades do cliente interno	Camada do pó sinterizada, segundo o modelo 2D realizado no <i>software</i> CAD.	
Identificação do produto interno		
	<p>(i) Camada de pó sinterizada, com potência do Laser fixa                  (ii) Camada de pó sinterizada, com um valor de potência do Laser específica para cada material                  (iii) Camada de pó sinterizada, com um valor de potência do Laser variando segundo a escala de cor do desenho digital.</p>	
Características de qualidade do produto interno	<p>Para todos os produtos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mínima variação dimensional mínima nos eixos X, Y e Z da camada sinterizada.</li> <li>- Superfície da camada uniforme, sem empenamento nem torção.</li> <li>- Não apresentar material sem sinterizar ou degradado pelo excesso de energia fornecida pelo Laser.</li> </ul> <p>Produto (i): Mínima variação da potência fornecida pelo Laser.                  Produto (ii): Mínima variação da potência fornecida pelo Laser, para cada faixa de material diferente.                  Produto (iii): Mínima variação da potência fornecida pelo Laser, em relação ao valor da escala de cor do desenho digital.</p>	

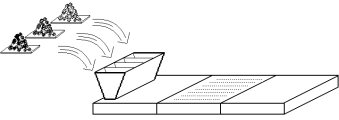
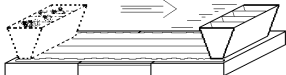
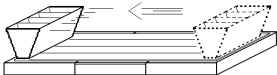
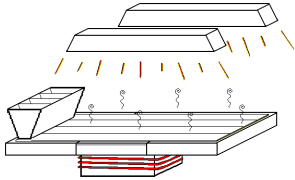
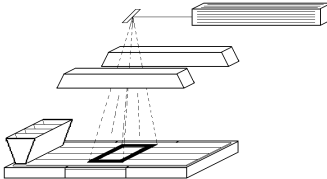
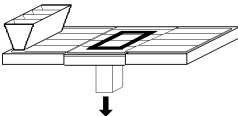
**Tabela 4.8 – Identificação do cliente interno e das características de qualidade do subprocesso de deslocamento da PC**

Cliente interno	Subprocesso de geração da camada na PC	Operador que retira a peça final
Necessidades do cliente interno	PC deslocada um valor igual à espessura da camada, segundo o plano de fabricação.	Objeto polimérico, de forma e dimensão predefinida em um modelo CAD com ou sem variação gradual em sua composição.
Identificação do produto interno		
	Camada de pó deslocada para baixo a um valor igual à espessura da próxima camada	Camada de pó deslocada para cima a um valor igual à espessura de todas as camadas construídas mais a espessura da PC
Características de qualidade do produto interno	- Mínima variação do deslocamento da PC mínima, em relação à espessura da camada especificada no plano de fabricação	- Mínima variação do deslocamento da PC mínima, em relação ao total deslocado.

### Tarefa 1.3.4: Mapear os subprocessos críticos

Na tabela 4.9 são descritos os subprocessos definidos como críticos para o processo de fabricação do EP.

**Tabela 4.9 – Mapeamento dos subprocessos críticos**

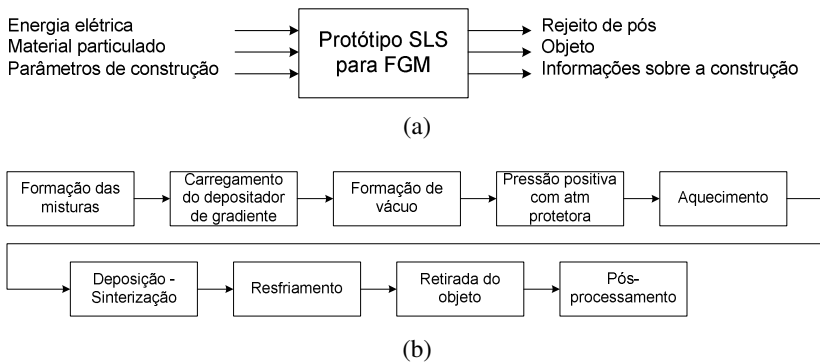
SUBPROCESSO	ILUSTRAÇÃO
<p><b>Carregamento do pó no depositador</b></p> <p>Depositar a matéria-prima ou misturas, no depositador, com ou sem subdivisões. O subprocesso, mesmo sendo manual, foi considerado um subprocesso essencial para a construção de uma peça na MP</p>	
<p><b>Deslocamento do depositador</b></p> <p>Desloca o depositador em ambos os sentidos, para depositar e espalhar o pó durante o deslocamento em avanço, e nivelar a camada de pó durante o deslocamento em retrocesso. O início e o sentido de avanço são comandados pelo operador, através do <i>software</i> do EP.</p>	 <p>Modo de avanço</p>
<p><b>Geração das camadas na PC</b></p> <p>(i) Deposita o material, pelo deslocamento do depositador e a ação da gravidade; (ii) espalha o pó, por meio de uma régua fixa ao depositador; e (iii) nivela a camada, por meio de uma segunda régua fixa ao depositador.</p>	 <p>Modo de retrocesso</p>
<p><b>Aquecimento da camada de pó</b></p> <p>Aquece a PC por meio da condução do calor gerado por uma resistência elétrica em espiral, ligada/desligada por um controlador liga/desliga e preaquece a camada de pó por meio da irradiação de duas lâmpadas IR ligadas/desligadas pelo usuário através do <i>software</i> do EP.</p>	
<p><b>Sinterização da camada de pó</b></p> <p>Sinteriza a camada de pó seguindo uma trajetória predefinida em um arquivo digital. A potência do Laser é selecionada pelo usuário através do <i>software</i> do EP. A trajetória do feixe do Laser é realizada por meio de um par de espelhos fixos, cada um unido a um servomotor galvanométrico</p>	
<p><b>Deslocamento da PC</b></p> <p>Desloca a PC a uma distância igual ao valor da espessura desejada para a camada, predefinida pelo usuário através do <i>software</i> do EP.</p>	

### Tarefa 1.3.5: Identificar e descrever as funções dos subprocessos críticos

A tarefa foi iniciada com a análise da estrutura funcional da MP descrita por Kulman (2006, p.40-42), ilustrada na figura 4.5. A partir da identificação dos componentes (tarefa 1.1.2) e da descrição dos procedimentos de fabricação (tarefa 1.1.3), concluiu-se que os blocos: formação de vácuo, pressão positiva com atmosfera protetora, e controle do resfriamento (no interior da câmara), não foram implementadas no EP, não existindo até hoje. Por outro lado, os blocos de: formação das misturas, retirada do objeto e pós-processamento, não fazem parte das funções da MP, sendo exercidas manualmente pelo operador.

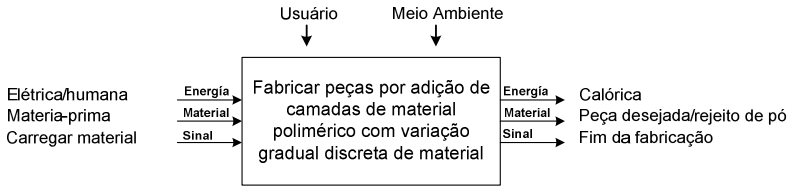
Em relação ao bloco “deposição-sinterização”, Kulman (2006) apresenta o seguinte desdobramento em funções elementares para o EP: (i) deposição dos diferentes materiais (no depositador); (ii) pré-compactação da camada; (iii) estocagem da matéria-prima; (iv) troca da matéria-prima; (v) controle da espessura da camada; e (vi) controle do gradiente de material (por divisores no depositador).

Das 6 funções elementares anteriormente definidas, a função (ii) não foi implementada. As funções (i) e (iv) são realizadas manualmente pelo usuário e fazem parte do procedimento de operação da MP. Só as funções (iii), (v) e (vi) formam parte da MP, sendo que a última corresponde a uma configuração inicial, de responsabilidade do usuário.



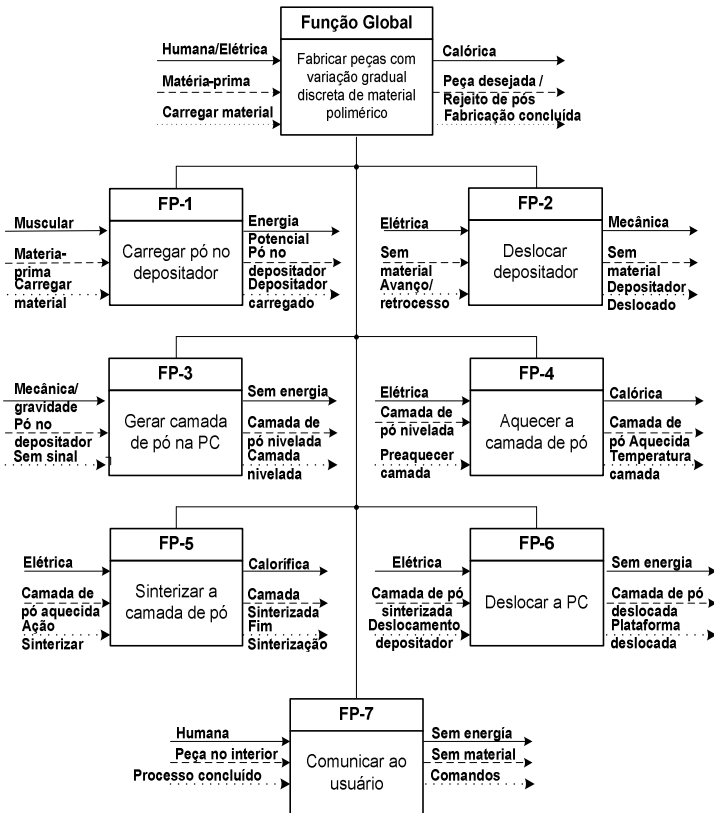
**Figura 4.5 - (a) Função global e (b) desdobramento da função global da MP**  
Fonte: Kulman (2006)

Considerando que a função global e seu desdobramento, não representam adequadamente a estrutura funcional da MP atual, a função global foi reformulada conforme ilustrado na figura 4.6.



**Figura 4.6 - Proposta de definição da função global do EP**

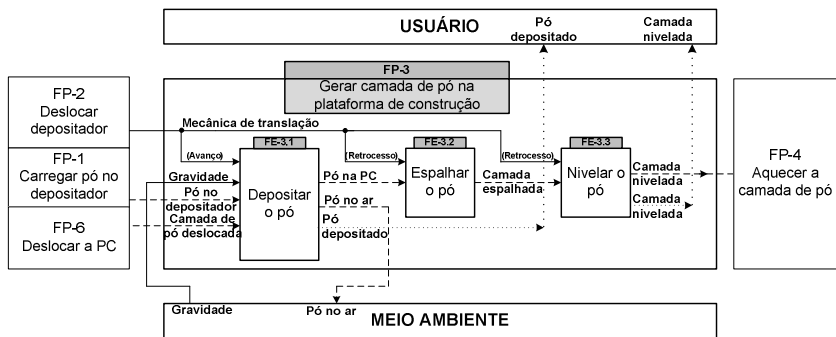
A seguir, a função global foi decomposta em Funções Parciais (FP) de menor complexidade, baseado nas funções principais dos subprocessos obtidos na subtarefa 1.3.1, identificando para cada FP as entradas e saídas de energia, material e sinal. A figura 4.7 ilustra esse desdobramento, incluindo a FP do sistema computacional.



**Figura 4.7 – Descomposição da função global em funções parciais**

Posteriormente, cada FP foi decomposta até suas Funções Elementares (FE). Os diagramas com a decomposição e uma breve descrição das FP encontram-se no “Diagrama da Síntese Funcional do EP”, que forma parte do REP.

A título de exemplo, é apresentada a decomposição da FP-3: “Gerar a camada de pó na PC”, a que foi decomposta em três funções elementares: (i) depositar o pó sobre a PC pelo deslocamento do depositador e pela ação da força de gravidade; (ii) espalhar o pó por meio de uma régua acoplada ao depositador; e (iii) nivelar a camada de pó espalhada por meio de uma segunda régua. O seu diagrama é ilustrado na figura 4.8.



**Figura 4.8 - Função parcial: “Gerar camada de pó na PC”**

**Tarefa 1.3.6: Identificar e descrever a sequência de fabricação**

A identificação da sequência de fabricação foi realizada a partir da descrição dos procedimentos de fabricação (tarefa 1.1.3), dos procedimentos da identificação dos subprocessos críticos (tarefa 1.3.2) e da definição da estrutura funcional (tarefa 1.3.5), e ilustrada na figura 4.9 através de um fluxograma de processos.

A MP apresenta duas etapas durante sua fabricação: (a) um ciclo de construção de camadas, e (b) uma sequência final de operação.

O ciclo de construção de camadas apresenta a seguinte sequência: (i) carregamento de pó, realizado manualmente pelo usuário, que também deve posicionar os divisores no componente divisor e encher o material certo e a quantidade certa de material em cada subdivisão; (ii) deslocamento do depositador, em modo de avanço, para permitir a deposição e espalhamento do material; (iii) deslocamento do depositador, em modo de retrocesso, para permitir o nivelamento da

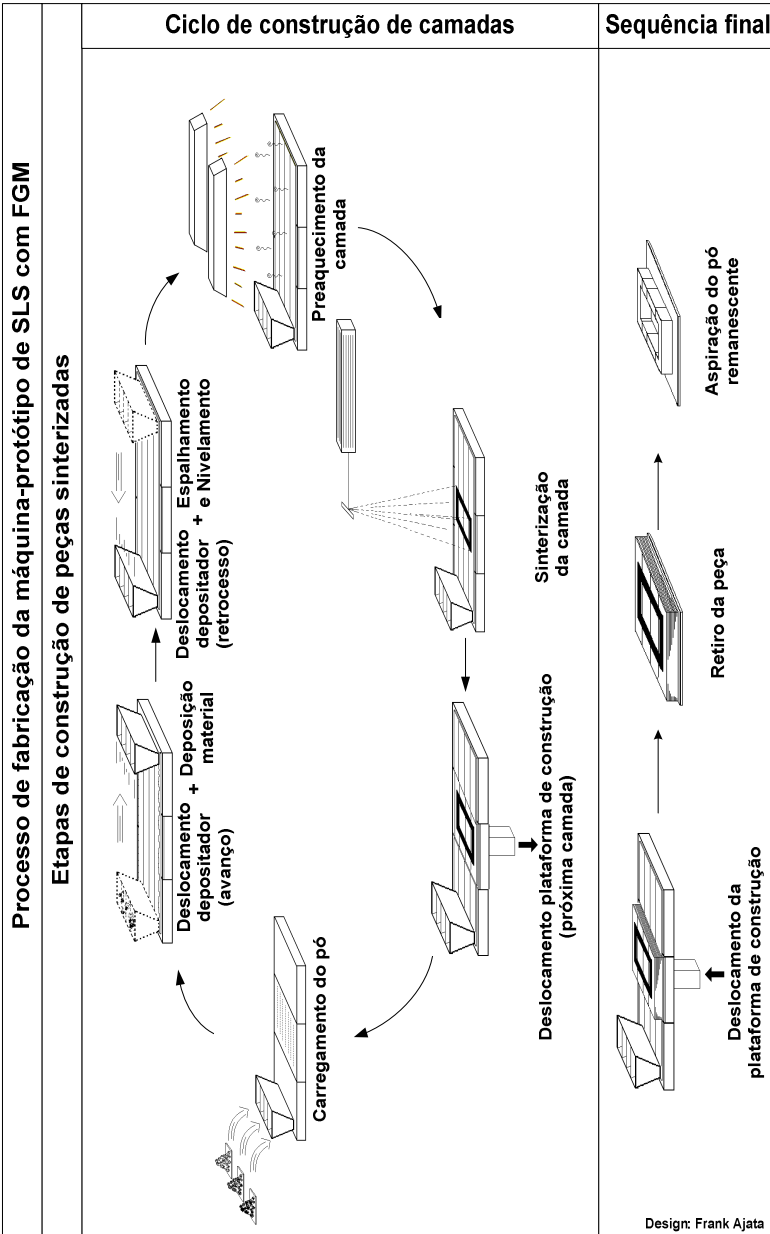


Figura 4.9 - Etapas da construção de peças sinterizadas

camada de pó; (iv) preaquecimento da camada, por meio de duas lâmpadas IR, até atingir a temperatura prévia à sinterização; (v) sinterização da camada, segundo o modelo digital; e (vi) deslocamento da PC a uma distância igual à espessura da próxima camada. O ciclo de construção se repete até construir a última camada.

Convém salientar que a sequência ii e iii define a função parcial “Gerar a camada de pó na PC”, da figura 4.8.

A sequência final da operação inicia-se após a última camada ter sido sinterizada, apresentando a seguinte sequência: (i) deslocamento da PC até o mesmo nível que a Plataforma Fixa (PF); (ii) retirada manual da PC com a peça sinterizada; e (iii) remoção do pó não sinterizado.

A sequência da operação, ilustrada na figura 4.10, representa o resultado final da análise dos subprocessos do EP. Nela, observa-se o início e o fim de cada subprocesso, que são executados sequencialmente, exceto o subprocesso de aquecimento da PC, que é executado durante todo o processo de fabricação.

Em relação ao procedimento de preaquecimento da camada, não foi encontrada informação documentada textualmente. Na figura 4.10 o preaquecimento da camada acontece após a geração da camada e antes da sinterização, conforme foi informado nas entrevistas pelos usuários (tarefa 1.1.3).

#### Tarefa 1.3.7: Dividir o sistema de fabricação em subsistemas

O sistema de fabricação do EP foi classificado por classes e por funções, como proposto na seção 3.2.3.

*a) Classificação por classe:* Composto pelos subsistemas: (i) computacional, (ii) suprimento de energia, (iii) mecânico, (iv) eletrônico de comando/controle, (v) térmico, (vi) acionamento dos motores e das lâmpadas IR, e (vii) medição.

*b) Classificação por função:* Composto pelos subsistemas: (i) deposição de pó, (ii) aquecimento, (iii) sinterização de pó, e (iv) deslocamento da PC. Cada subsistema foi devidamente ilustrado nos apêndices A5 a A8, descrevendo os seus componentes com a nomenclatura padronizada (ver a subtarefa 1.1.2.2).

Como uma forma de padronizar as ilustrações dos subsistemas, foi acrescentado um quadro com a data, o nome do projetista, e dos avaliadores, com o objetivo de manter atualizada esta informação, e registrar futuras alterações no equipamento.

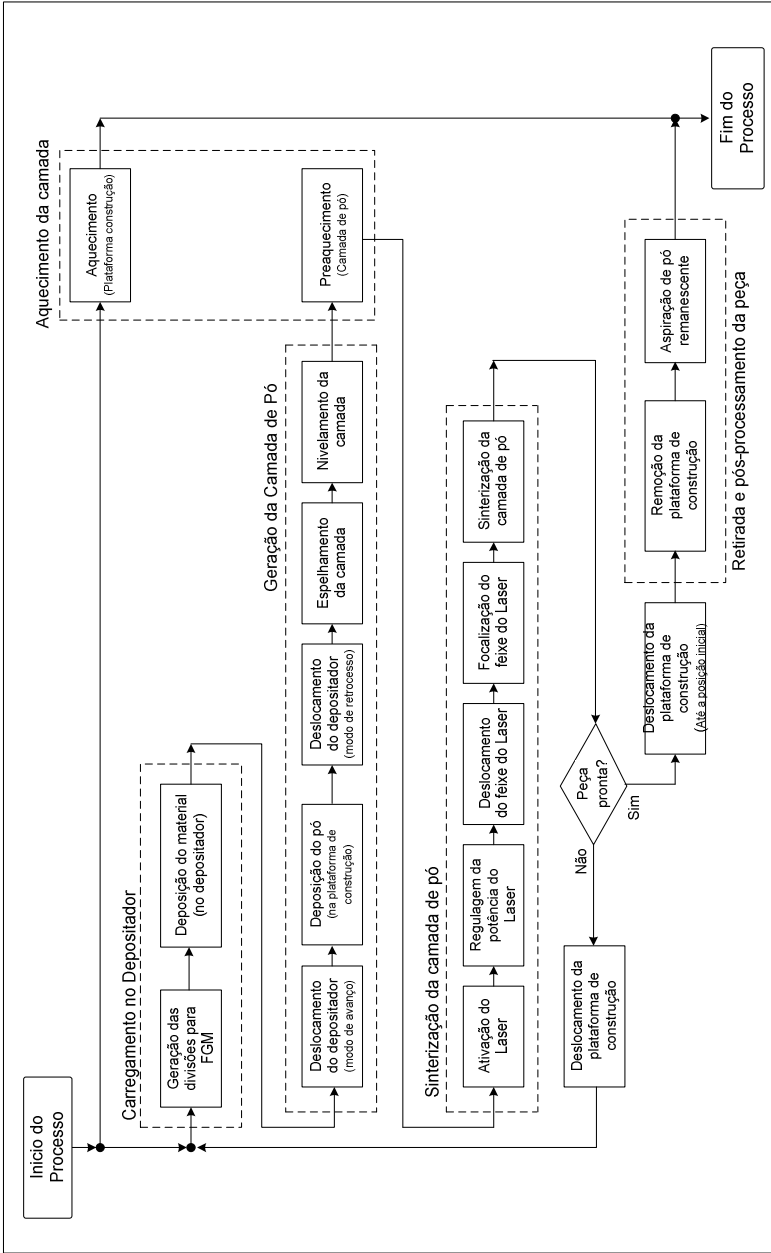


Figura 4.10 - Sequência da operação da máquina-protótipo



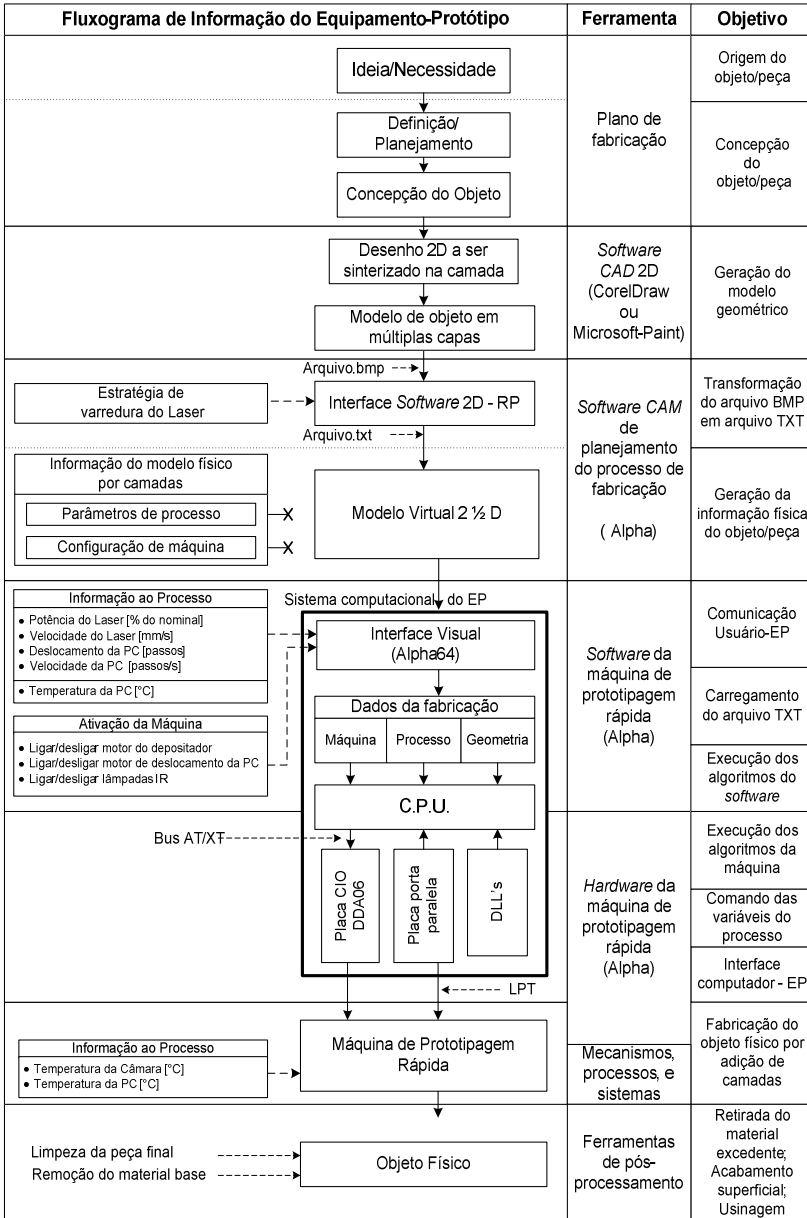
### Tarefa 1.3.8: Identificar o fluxo de informação do processo

O fluxo de informação no EP foi desenvolvido a partir da informação obtida na seção 2.1.2.2 (ver a figura 2.2) e é ilustrado na figura 4.11, sendo descrita a seguir:

- Concepção do objeto/peça: Inicia-se com uma ideia ou uma necessidade do usuário. Posteriormente são definidas as características das peças (ex.: geometria, matéria-prima, tipo de FGM, etc.) e a forma em que a peça será construída (ex.: orientação da peça, direção do FGM, espessura da camada, temperatura de preaquecimento, etc.).
- Geração do modelo geométrico: Cada desenho da camada é realizado em um *software* tipo CAD (ex.: CorelDraw), para ser posteriormente exportado no formato BMP.
- Transformação do arquivo do formato BMP para o formato TXT: Transforma cada desenho 2D (em formato BMP) para o formato TXT, segundo uma das 11 estratégias de varredura disponibilizadas.
- Geração da informação física do objeto/peça: As informações dimensionais e da EVFL já estão contidas no arquivo TXT. Os parâmetros de fabricação restantes como potência e velocidade do feixe do Laser, temperatura de aquecimento e espessura da camada, assim como as informações de configuração da máquina para cada camada, não são acrescentados à informação anterior.
- Comunicação usuário–equipamento: É realizada através da interface visual do *software* da máquina. Observa-se na fig. 4.11 que as informações dos parâmetros de fabricação são inseridas por meio da interface visual, no entanto outras são executadas diretamente no equipamento. A descrição detalhada da interface e do *software* são apresentadas em Kulman (2006) e Santos (2009).
- Carregamento do arquivo TXT com a informação da peça: Inclui o dimensionamento da peça/objeto e a EVFL a ser percorrida pelo feixe do Laser, durante a sinterização.
- Execução dos algoritmos da máquina: O computador executa os algoritmos de comando e de geração das sequências durante o processo de fabricação.

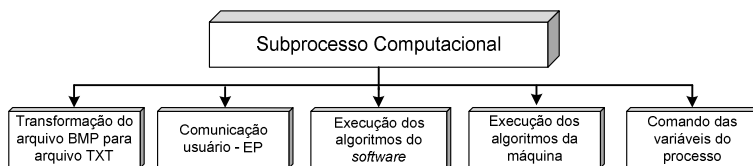
A partir da análise do fluxo de informação do *software* da máquina, foi proposto uma subdivisão do subprocesso computacional, ilustrada na figura 4.12.

Em relação as diferentes versões do *software* da máquina que têm sido desenvolvidas é importante diferenciar entre: (i) o nome do arquivo,



**Figura 4.11 – Fluxograma de informação do EP**

(ii) o número da versão, e (iii) o nome que surge na tela do computador quando este é carregado. No caso do *software* descrito em Kulman (2006), o nome do arquivo é “Alpha50.exe” (versão 1.0.46), criado em 2004, e o nome que surge na tela do computador é Alpha50. Já no *software* descrito por Santos (2009), o nome do arquivo é “Alpha64.exe” (versão 1.0.53), criado em 2006, e o nome que surge na tela do computador é também Alpha50, sendo essa a última versão existente e atualmente em uso no equipamento. No presente trabalho essa última versão será denominada “Alpha64”.



**Figura 4.12 – Subprocesso computacional do EP**

Com o objetivo de identificar o processamento dos sinais elétricos entre placas eletrônicas foi realizado o diagrama de blocos das conexões elétricas do EP (ver a figura 4.13) no qual se evidencia que os circuitos do subsistema de sinterização e do subsistema de acionamento dos motores e lâmpadas IR são independentes entre si.

Para um melhor detalhamento das conexões elétricas e dos sinais de comando/controle e de comunicação, entre o computador, as placas eletrônicas e os componentes atuadores, foram realizados os diagramas de conexões do subsistema de sinterização (apêndice A11) e do subsistema de acionamento dos motores e das lâmpadas IR (apêndice A12). Os diagramas foram baseados nos manuais do cabeçote de marcação, do controlador do Laser e da placa digital/analógica, e no leiaute dos circuitos eletrônicos das três placas-protótipo.

Durante a análise dos algoritmos do *software* Alpha64, foi constatado que houveram tentativas para tornar o EP ainda mais automático. O *software* apresenta os seguintes algoritmos: (i) função “passa\_recoater” que desloca o depositador em ambos sentidos, auxiliado através dos interruptores de fim de curso; (ii) gravação de uma sequência de desenhos pré-carregados, deslocando o depositador em avanço e em retrocesso, gravando o desenho carregado, e deslocando a PC, repetindo a sequência até o último desenho ser gravado; e (iii) gravação de uma peça retangular, utilizando faixas de potências diferentes em uma mesma camada.

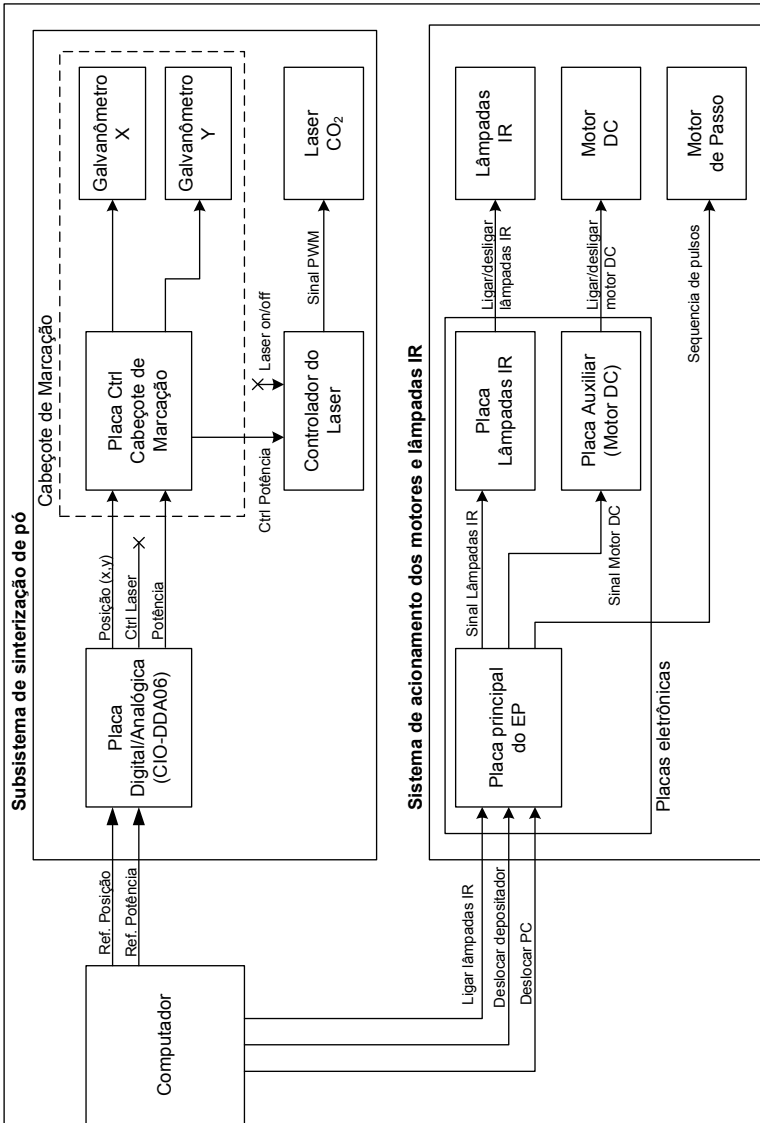


Figura 4.13 - Diagrama de blocos das conexões elétricas do EP

## 4.2 ETAPA 2: ANÁLISE E MELHORIA DO PROCESSO

A presente etapa descreve a aplicação da metodologia de análise descrita na seção 3.3 com o objetivo de identificar e analisar os problemas que vêm apresentando o EP e propor alternativas de melhoria a serem implementadas para reduzir ou eliminar esses problemas, fornecendo os subsídios para a etapa seguinte de análise.

### 4.2.1 Passo 2.1 - Identificação dos problemas

Por se tratar de um equipamento desenvolvido para testar a processabilidade de diferentes matérias-primas visando determinar os valores para os parâmetros de fabricação e não para fabricar peças em forma contínua ou seriada é que não existem registros ou estatísticas associadas a falhas ou defeitos na fabricação de corpos de prova que permitam identificar problemas baseados na fabricação das peças.

#### Tarefa 2.1.1: Compilar os problemas reportados sobre o processo

As principais fontes de informação dos problemas e limitações do processo de fabricação foram os trabalhos de teses e dissertações que utilizaram o EP, descritos na seção 2.1.3.

Para cumprir com o objetivo desta tarefa, foram identificados, nesses trabalhos, todas as **situações problemáticas reportadas**, além das **sugestões relativas ao EP**, obtendo um total de 24 parágrafos descrevendo problemas tanto gerais como específicos, que são apresentados na tabela 4.10. As sugestões dos trabalhos foram incluídas porque enfatizam os problemas mais importantes e evidenciam também as limitações do equipamento.

A seguir, cada um dos 24 parágrafos foi analisado, visando individualizar problemas e o número de vezes que ele era repetido, agrupando os problemas que apresentavam similaridade e reescrevendo-o em uma linguagem mais técnica, quando corresponder.

#### Tarefa 2.1.2: Compilar os problemas identificados por clientes e operadores do processo

Problemas identificados por operadores do EP foram identificados através de duas entrevistas realizadas a usuários experientes no uso do EP (KLAUSS e PAGGI, 2009; PAGGI, 2010), a partir das quais foram identificadas 36 informações contendo problemas tanto gerais como específicos, como evidenciado na tabela 4.11.

**Tabela 4.10 – Listagem com os problemas reportados do EP (continua)**

Fonte: [1] Kulman (2006), [2] Dabbas (2006), [3] Leite (2007), [4] Paggi (2008), [5] Dos Santos (2009), [6] Klaus (2010)

Nº	Descrição dos problemas	Fonte
01	“[...] o equipamento teve alguns problemas nos motores que faziam o deslocamento, principalmente pela fundição dos sensores expostos a esta temperatura.”	[1] (p. 69)
02	“Um dos problemas encontrados [...] foi o controle da deposição de material particulado, [...]”	[1] (p. 73)
03	“[...] o sistema depositador mostrou algumas dificuldades referentes à sua montagem, [...] o elemento móvel era preso por oito chapas, o que tornava difícil [...] o movimento do depositador.”	[1] (p. 73, 74)
04	“Problemas [...] para trabalhar a temperaturas em torno de 150°C [...] a queima de alguns motores que fazem o deslocamento do depositador.”	[1] (p. 74)
05	“Desenvolver um controle automatizado da variação da potência de laser na mesma camada [...]” (Sugestão)	[2] (p. 89)
06	“Os valores médios dos diâmetros interno e externo da peça final apresentou variação dimensional em relação aos valores do modelo computacional utilizado no software de 10,8% e 1,90%, respectivamente”.	[3] (p. 96)
07	“A variação dimensional da altura da peça final foi estimada em relação ao número de camadas depositadas “não-sinterizadas [...]. A altura da peça final apresentou uma variação de 34% [...] devido à contração durante a sinterização.”	[3] (p. 96)
08	“Promover melhorias no equipamento protótipo de SLS, tais como: maior controle sobre a exatidão dimensional das peças fabricadas, e controle automatizado da variação da potência do laser na mesma camada de construção durante o processo de SLS para fabricação de componentes com gradientes funcionais na direção Y.”	[3] (p. 150)
09	“[...] para potências inferiores a 1,35W, a placa controladora não comanda de forma plena o sistema de marcação.”	[4] (p. 82)
10	“Quando potências da ordem de 4,05W e velocidades de 36,3mm/s são selecionadas, ocorrem travamentos constantes do sistema de marcação, [...]. Para velocidades inferiores a esta, níveis mais baixos de potência podem também ocasionar travamento. Neste caso fica restrita a utilização dos níveis consecutivos superiores [...] 39,9; 44,5; 50,0 e 56,5mm/s [...]”	[4] (p.82)
11	“Sendo que o processo não possui compactação prévia do material depositado, a existência de poros se faz presente em todas as peças [...]”	[4] (p.104)
12	“O programa utilizado na máquina protótipo não comporta a modificação simultânea da potência do laser durante a construção de cada camada, [...]”	[4] (p.120)
13	“O grau de porosidade é bastante significativo [...]”	[4] (p. 127)
14	“[...] dificuldades encontradas para a obtenção da peça com gradiente funcional de composição ao longo do eixo Y, dentre elas, correto posicionamento sobre a plataforma e temperatura da câmara.”	[4] (p.120)

**Tabela 4.10 – Listagem com os problemas reportados do EP (conclusão)**

Fonte: [1] Kulman (2006), [2] Dabbas (2006), [3] Leite (2007), [4] Paggi (2008), [5] Dos Santos (2009), [6] Klauss (2010)

Nº	Descrição dos problemas	Fonte
15	“Outro fato relevante consiste nas limitações encontradas no equipamento [...] A utilização de um sistema de processamento onde os controles térmicos sejam mais precisos pode vir a modificar a realidade encontrada neste trabalho [...]”	[4] (p. 125)
16	“[...] as dimensões mensuradas apresentam valores maiores que as originais, [...]. As dimensões paralelas à direção de deslocamento do laser mostraram diferenças significativamente maiores (na ordem de 14%) se comparado ao valor perpendicular as passadas (apenas 3%).”	[4] (p. 123)
17	“A variação dimensional foi elevada, porem se mostrou maior paralelamente à passagem do laser. Certamente, grande parte deste desvio em relação as dimensões foi ocasionada pelo software utilizado no processamento da imagem, o qual necessita da inserção de fatores de aproximação dos pontos gerados [...]”.	[4] (p. 126)
18	“O processo de fabricação ainda necessita de melhorias com relação a exatidão dimensional e seletividade na potencia do laser para diferentes regiões e composições”	[4] (p. 128)
19	“Melhorar a máquina protótipo de SLS [...] fornecendo melhor controle de temperatura e de variáveis como espessura de camada, deposição, além de seu software de controle.”	[4] (p. 129)
20	“[...] o software não está plenamente funcional visto que alguns menus têm opções que nada executam, tal como as opções ‘Ferramentas > Setup’ e ‘Ajuda > Help’ [...]”.	[5] (p. 44)
21	“Com base na análise do software Alpha, pôde-se concluir que entre as limitações apresentadas pelo software estavam: • ausência de um módulo de fatiamento STL [...]; • impossibilidade de configurar previamente os parâmetros de fabricação para cada camada [...]; • impossibilidade de variar a estratégia de fabricação de uma camada para outra;”	[5] (p. 58)
22	“não foi possível desenhar peças com comprimentos superiores a 30 mm, devido a limitações do programa, optando-se em construir peças com 20 mm.”	[6] (p.130)
23	“Os reservatórios apresentaram diferenças dimensionais em relação ao projeto, sendo atribuído a transferência de calor entre as partículas e problemas referentes a parte mecânica do equipamento, como instabilidade no movimento da plataforma”.	[6] (p.142)
24	“Promover ajustes no equipamento de SLS utilizado, fornecendo melhor controle na espessura de camada e deposição.”	[6] (p.143)

**Tabela 4.11 – Listagem com os problemas relatados por usuários do EP em entrevistas (continua)**

Fonte: [1] Klauss e Paggi (2009), [2] Paggi (2010)

Nº	Descrição dos problemas	Fonte
01	O <i>software</i> do EP não faz a fatia da peça CAD.	[1]
02	Problemas na geometria da peça. Apresenta variação do tamanho.	[1]
03	Não há um controle da posição entre a peça a fabricar [vista na tela do computador] e a posição em que a nova peça vai ser fabricada.	[1]
04	Problemas ao tentar gravar desenhos diferentes em torno a um mesmo eixo [centradas]. Exemplo: construção de uma pirâmide.	[1]
05	O EP dificulta fazer peças com geometrias complexas, que requeiram utilizar desenhos diferentes para cada camada.	[1]
06	O <i>software</i> não apresenta referências dimensionais nem especifica os limites correspondentes à plataforma de construção.	[1]
07	A plataforma de construção não fica completamente nivelada com a plataforma fixa uma vez que a plataforma móvel volta para a posição inicial.	[1]
08	O extrator de ar, além de extrair o pó do ambiente da câmara de aquecimento, extrai calor do sistema, e a peça empena.	[1]
09	Dificuldade no carregamento para gerar FGM com aquecimento, pela elevada temperatura no interior da câmara.	[1]
10	O pó sobranete vai ficando sobre a plataforma fixa e vai se acumulando. O sistema depositador desperdiça muito material. O sistema acumula muito pó para o lado oposto da faca.	[1]
11	O equipamento não consegue variar a potência do Laser na mesma camada.	[1]
12	O usuário não consegue mexer a velocidade da varredura do Laser através do <i>software</i> .	[1]
13	Problemas com o controle da temperatura [no uso do multímetro].	[1]
14	Problemas com a deposição.	[1]
15	Problema com o controle do eixo Z [confiabilidade na espessura].	[1]
16	Problemas para manter a plataforma de construção em forma reta, nivelada.	[1]
17	Um carregamento no depositador só permite fazer uma camada. Não se pode assegurar, ele some. Uma passada e não dá para fazer outra camada. Por isso só se carrega o mínimo para conseguir uma camada. Para não perder pó.	[1]
18	Problemas com o controle da posição das divisões da fatia de material. O problema é encaixar as divisórias do depositador exatamente acima da plataforma de construção.	[1]
19	O <i>software</i> não acumula o número de passos deslocados, é o usuário que tem que contar o número de passos totais deslocados para baixo, para subir a mesma quantidade de passos para cima. A plataforma não volta sozinha.	[1]
20	Não pode colocar-se muito material no depositador, se não o depositador trava.	[2]



**Tabela 4.11 – Listagem com os problemas relatados por usuários do EP em entrevistas (conclusão)**

Fonte: [1] Klauss e Paggi (2009), [2] Paggi (2010)

Nº	Descrição dos problemas	Fonte
21	Cada vez que o depositador é carregado, as portas do EP são abertas, diminuindo a temperatura no interior da câmara de aquecimento.	[2]
22	O aquecimento da câmara demora muito.	[2]
23	O sensor de temperatura embaixo da PC não varia muito, mesmo que as portas sejam abertas.	[2]
24	A temperatura ambiente [sobre a plataforma fixa] é mais ou menos aproximada, não é a real da superfície da camada de pó.	[2]
25	É preciso, as vezes, repassar o carrinho para melhorar a superfície da camada.	[2]
26	A quantidade de pó colocada no depositador não é medida, é feita em uma tentativa e erro.	[2]
27	O depositador desperdiça muito material. Quando espalha, cai muito material.	[2]
28	O depositador acumula muito material sobre a plataforma fixa, no lado em que o depositador é carregado.	[2]
29	O exaustor extrai o pó da lente do Laser e também calor do sistema.	[2]
30	O exaustor maior, cuja função é extrair o pó do ambiente, não é usado porque extraía o calor, descendo muito a temperatura.	[2]
31	Problemas com o nivelamento da plataforma de construção.	[2]
32	Não há controle da potência das lâmpadas de preaquecimento.	[2]
33	O botão de desligar na interface do programa Alpha apaga o <i>software</i> e detém todo o sistema.	[2]
34	Para fazer um novo desenho para a camada, você precisa fechar a interface de fabricação e voltar a abri-la.	[2]
35	Dificuldade em centrar uma imagem em relação a outra.	[2]
36	Existem parâmetros ingressados na interface do <i>software</i> , durante o carregamento do desenho a gravar, que não têm influência no <i>software</i> .	[2]

O resultado das tarefas 2.1.1 e 2.1.2 finalizou com uma lista de 79 ocorrências de problemas, sendo individualizados 51 problemas diferentes, que serão apresentados de forma estratificada e priorizadas nas tarefas 2.2.1 e 2.2.2.

#### 4.2.2 Passo 2.2 - Priorização dos problemas

##### Tarefa 2.2.1: Estratificar os problemas

Com o intuito de classificar os problemas identificados, foi realizada uma estratificação por subprocessos.

Nesta tarefa foram identificados alguns problemas cuja origem pode ser atribuída a mais de um subprocesso. Logo, um mesmo

problema poderá aparecer na análise de dois ou mais subprocessos. Um exemplo é o problema identificado como “Variação dimensional da camada”, já que esse problema pode ser originado tanto no subprocesso computacional, no subprocesso de sinterização, quanto no subprocesso de deslocamento da PC. A tarefa finalizou com uma lista dos problemas estratificados por subprocesso, identificando o número de vezes que cada problema foi citado<sup>13</sup>, cuja priorização é apresentada na tarefa 2.2.2.

#### Tarefa 2.2.2: Priorizar os problemas no processo

Considerando que (i) nenhum dos pesquisadores citados atribuiu um grau de urgência ou importância aos problemas, (ii) nenhum dos problemas possui informação suficiente para atribuir-lhe um grau de urgência ou importância, (iii) nenhum dos problemas apresenta risco vital para os seus operadores, e que (iv) nenhum dos problemas corresponde a uma falha operacional capaz de parar o processo de fabricação, é que a priorização dos problemas identificados será realizada com intuito tão-somente de dar um ordenamento durante a realização da etapa de análise, em função do número de ocorrência de um mesmo problema em cada subprocesso. Com esse objetivo esta tarefa foi dividida em: (i) subtarefa 2.2.2.1, priorização dos problemas por subprocessos; e (ii) subtarefa 2.2.2.2, priorização dos subprocessos.

O resultado da subtarefa 2.2.2.1, realizada em função do número de citações de um mesmo problema (frequência) e estratificada por subprocessos, são apresentados nas tabelas 4.12 a 4.18. Para uma adequada identificação, cada problema foi numerado antepondo o número do subprocesso relacionado (segundo a ordem apresentada na figura 4.4 da subtarefa 1.3.1), seguido de um número em forma sequencial.

O resultado da subtarefa 2.2.2.2, realizada em função do número de problemas citados por subprocesso, é apresentado na tabela 4.19. Nesta subtarefa foi utilizada a ferramenta “gráfico de Pareto”, já que de acordo com Werkema (1995) e Werkema e Aguiar (1996), o gráfico de Pareto permite dispor a informação de modo a tornar evidente e visual a priorização dos problemas, permitindo concentrar os esforços para melhoria nos poucos problemas com maior índice de ocorrências. O gráfico de Pareto foi construído a partir da tabela 4.19.

---

<sup>13</sup> Termo utilizado para se referir tanto aos problemas reportados em teses e dissertações quanto aos problemas relatados em entrevistas.

**Tabela 4.12 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de carregamento de pó**

Nº	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
1.1	Dificuldade no carregamento do depositador para gerar FGM	0	0	1	1	1º
1.2	Falta de controle da quantidade de pó utilizada durante o processo de fabricação	0	0	1	1	1º
Total		0	0	2	2	

**Tabela 4.13 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de deslocamento do depositador**

Nº	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
2.1	Fundição dos sensores de fim de curso	1	0	0	1	1º
2.2	Dificuldade na montagem do depositador	1	0	0	1	1º
Total		0	0	2	2	

**Tabela 4.14 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de geração da camada**

Nº	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
3.1	Falta de controle na deposição de pó	1	1	0	2	1º
3.2	Elevado desperdício de material	0	0	2	2	1º
3.3	Acumulação excessiva de pó na PC	0	0	2	2	1º
3.4	Peças fabricadas apresentam muita porosidade	1	0	0	1	2º
3.5	Instabilidade do mecanismo depositador durante o deslocamento	1	0	0	1	2º
3.6	Problemas com a deposição	0	0	1	1	2º
3.7	O carregamento do depositador só permite fabricar 1 camada	0	0	1	1	2º
3.8	Falta de controle da posição das fatias de pó de diferente material	0	0	1	1	2º
3.9	Trancamento do pó no depositador quando é carregado com muito material	0	0	1	1	2º
3.10	Um único deslocamento do depositador nem sempre consegui nivelar a camada	0	0	1	1	2º
Total		3	1	9	13	

\* Baseada em 4 dissertações e 2 teses.

\*\* Baseada em entrevistas a 2 usuários.

**Tabela 4.15 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de aquecimento da camada**

N°	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
4.1	Falta de controle da temperatura	0	1	2	3	1°
4.2	Problemas no controle da temperatura de aquecimento	1	0	0	1	2°
4.3	Extrator de ar também extrai o ar quente	0	0	1	1	2°
4.4	Diminuição da temperatura pela abertura das portas para carregamento de pó	0	0	1	1	2°
4.5	Tempo de aquecimento elevado	0	0	1	1	2°
4.6	Pouca sensibilidade do sensor de temperatura com a abertura das portas	0	0	1	1	2°
4.7	Soprador de ar da lente focal reduz a temperatura no interior da câmara	0	0	1	1	2°
4.8	Queima de motores expostos a temperatura em torno dos 150 °C	1	0	0	1	2°
4.9	Falta de precisão no controle de preaquecimento	1	0	0	1	2°
4.10	A temperatura ambiente sobre a camada de pó não é real	0	0	1	1	2°
Total		3	1	8	12	

**Tabela 4.16 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de sinterização da camada**

N°	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
5.1	Variação dimensional da camada	3	3	1	7	1°
5.2	A potência do Laser não varia em uma mesma camada	2	3	1	6	2°
5.3	Problemas no posicionamento do desenho sobre a camada	1	0	0	1	3°
5.4	Limitações para fabricar peças superiores a 30 mm	1	0	0	1	3°
5.5	Potências inferiores do Laser não comandam o cabeçote de marcação	1	0	0	1	3°
5.6	Velocidades de varredura do Laser menores, geram travamentos constantes	1	0	0	1	3°
Total		9	6	2	17	

**Tabela 4.17 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso de deslocamento da PC**

Nº	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
6.1	Variação dimensional da camada	1	2	1	4	1º
6.2	Controle da espessura da camada	0	1	1	2	2º
6.3	Procedimento de nivelamento da PC	0	0	2	2	2º
6.4	Manter a PC nivelada	0	0	1	1	3º
6.5	Perda de material durante o espalhamento do pó	0	0	1	1	3º
Total		1	3	6	10	

**Tabela 4.18 - Priorização segundo a frequência dos problemas no subprocesso computacional**

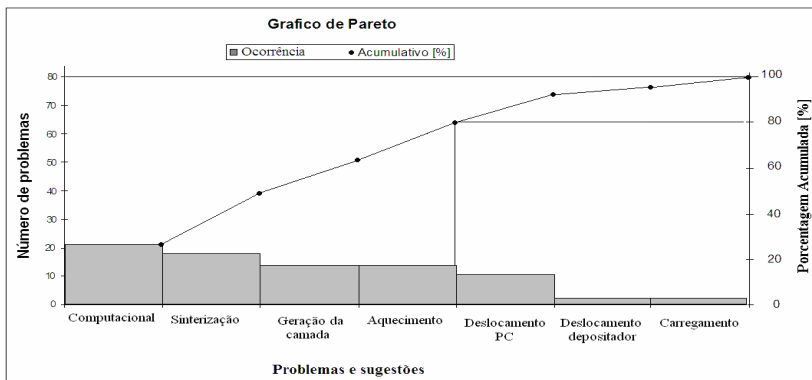
Nº	Problema	Frequência reportada *	Frequência sugerida *	Frequência relatada **	Frequência Total	Prioridade
7.1	Variação dimensional da camada	3	2	1	6	1º
7.2	O <i>software</i> não faz fatiamento de um modelo digital 3D	1	0	1	2	2º
7.3	Variação no centrado entre diferentes desenhos a gravar	0	0	2	2	2º
7.4	Menus no <i>software</i> com opções não funcionais	1	0	0	1	3º
7.5	O <i>software</i> não permite configurar previamente os parâmetros de fabricação	1	0	0	1	3º
7.6	O <i>software</i> não permite variar a estratégia de fabricação de uma camada para outra	1	0	0	1	3º
7.7	O <i>software</i> não tem apresentado melhorias	0	1	0	1	3º
7.8	O <i>software</i> não apresenta uma relação entre a tela da interface de usuário e a PC	0	0	1	1	3º
7.9	Dificuldade para fabricar peças com geometrias complexas	0	0	1	1	3º
7.10	O <i>software</i> não apresenta a dimensão da PC nem das peças a serem construídas	0	0	1	1	3º
7.11	O <i>software</i> não varia a potência do Laser durante a sinterização de uma camada	0	0	1	1	3º
7.12	O <i>software</i> não varia a velocidade da varredura do Laser na fabricação da camada	0	0	1	1	3º
7.13	No <i>software</i> , a opção desligar, para desligar o processo em andamento, desliga o <i>software</i>	0	0	1	1	3º
7.14	Para cada novo desenho a gravar, o <i>software</i> precisa que a interface de usuário seja reiniciada	0	0	1	1	3º
7.15	O <i>software</i> apresenta ao usuário parâmetros que não influem nos algoritmos	0	0	1	1	3º
7.16	O <i>software</i> não acumula o número de passos deslocados	0	0	1	1	3º
Total		7	3	13	23	

**Tabela 4.19 - Priorização dos subprocessos segundo a frequência dos problemas citados**

Nº	Subprocesso	Função	Nº problemas reportados *	Nº sugestões reportadas *	Nº problemas relatados **	Total Problemas	Prioridade
1.0	Carregamento (do depositador)	Geração da largura do separador de FGM	0	0	0	2	6°
		Deposição do material no depositador	0	0	2		
2.0	Deslocamento (do depositador)		2	0	0	2	6°
3.0	Geração da camada	Deposição de pó	3	1	5	13	3°
		Espelamento	0	0	3		
		Nivelamento	0	0	1		
4.0	Aquecimento	Aquecimento	1	0	6	12	4°
		Preaquecimento	2	1	2		
5.0	Sinterização	Regulagem da potência do Laser	2	3	1	17	2°
		Deslocamento do feixe do laser	5	3	1		
		Focalização do feixe do Laser	0	0	0		
		Sinterização da camada	2	0	0		
6.0	Deslocamento (PC)		1	3	6	10	5°
7.0	Computacional	Transformação do arquivo BMP para arquivo TXT	3	2	3	23	1°
		Comunicação usuário-EP	0	0	2		
		Execução dos algoritmos do software	4	1	6		
		Execução dos algoritmos de máquina	0	0	0		
		Comando das variáveis do processo	0	0	2		
Número total de problemas			25	14	41	79	
Número total de problemas individualizados			19	9	36	51	

O gráfico de Pareto, apresentado na figura 4.14, mostra que o subprocesso computacional apresenta o maior número de frequência de problemas (23 problemas), dessa forma será considerado como o subprocesso prioritário, sendo o primeiro subprocesso a ser analisado. A tabela 4.19 evidencia a contribuição das entrevistas no processo de coleta de informação, correspondendo ao 62,5% do total de frequências para o subprocesso prioritário.

É importante assinalar, em este estágio, que alguns dos problemas listados poderiam não constituir um problema propriamente dito. Só uma análise preliminar poderá aceitar ou rejeitar sua condição de problema. Também é importante assinalar que alguns dos problemas extraídos nas teses e dissertações não se encontravam claramente definidos nem descritos, pelo qual foi necessário defini-los (tarefa 2.3.1).



**Figura 4.14 – Gráfico de Pareto dos problemas do EP por subprocessos**

Os passos seguintes da metodologia fornecerão as ferramentas necessárias para avaliar e analisar cada um dos 51 problemas individualizados.

### 4.2.3 Passos 2.3 a 2.13

Para cada problema sob análise, foram repetidos sequencial e sistematicamente os passos 2.3 a 2.13 da etapa 2, iniciando com o problema prioritário (7.1) do subprocesso prioritário (computacional), e finalizando com o último problema (2.2) do subprocesso com a última prioridade (deslocamento do depositador), conforme ilustrado no fluxograma da figura 4.15.

Com o objetivo de apresentar de forma organizada e resumida as informações geradas durante a análise de cada um dos 51 problema, foi elaborada a tabela 4.20. Também foram criadas listas independentes com as descrições das medições, os testes e os experimentos executados, os quais também foram estratificados por subprocesso e por função. A listagem dos experimentos utilizados nesta etapa são apresentados na tabela B1 do apêndice B.1. A listagem dos testes e medições realizadas, encontram-se no “Relatório de propostas de experimentos” do REP.

Com o objetivo de exemplificar o resultado da aplicação da tabela 4.20 é apresentada a tabela 4.21 referente a análise do problema prioritário “Variação dimensional da camada” do subprocesso prioritário (subprocesso computacional).

**Tabela 4.20 – Formato para o resumo da análise dos 51 problemas**

<b>N° Problema</b>	<b>P.n<sup>1</sup></b>	<b>Nome do problema</b>
Definição do problema	[ Ver etapa 2, passo 2.3, tarefa 2.3.1 ]	
Causas possíveis	[ Ver etapa 2, passo 2.3, tarefa 2.3.2 ]	
Informação a analisar		
Análise preliminar	[ Ver etapa 2, passo 2.5, tarefa 2.5.1 ]	
Hipóteses	[ Ver etapa 2, passo 2.5, tarefa 2.5.1 ]	
Experimentos	N°	Nome-Objetivo
	P.f.n <sup>2</sup>	[ Ver etapa 2, passo 2.5, tarefa 2.5.2 ]
Conclusões dos experimentos	N°	Conclusões
	P.f.n	[ Ver etapa 2, passo 2.5, tarefa 2.5.6 ]
Propostas de soluções	[ Ver etapa 2, passo 2.6 ]	
Implementações	[ Ver etapa 2, passo 2.11 ]	

<sup>1</sup> P: n° de subprocesso. n: n° do problema.

<sup>2</sup> P: n° de subprocesso. f: n° do subprocesso. n: n° do experimento

A tabela 4.21 evidencia a grande quantidade de informação gerada como resultado da aplicação da metodologia, mesmo não incluindo a descrição detalhada dos experimentos executados nem dos seus resultados.

Com o intuito de apresentar as conclusões, as propostas de solução e as implementações realizadas para cada problema sob análise, por subprocesso, foi desenvolvido o relatório “Conclusões e propostas de soluções para os 51 problema agrupados por subprocessos”, que forma parte do REP.

Os resultados da análise dos problemas por subprocessos serão apresentados na seção 5.1.1 do capítulo 5.



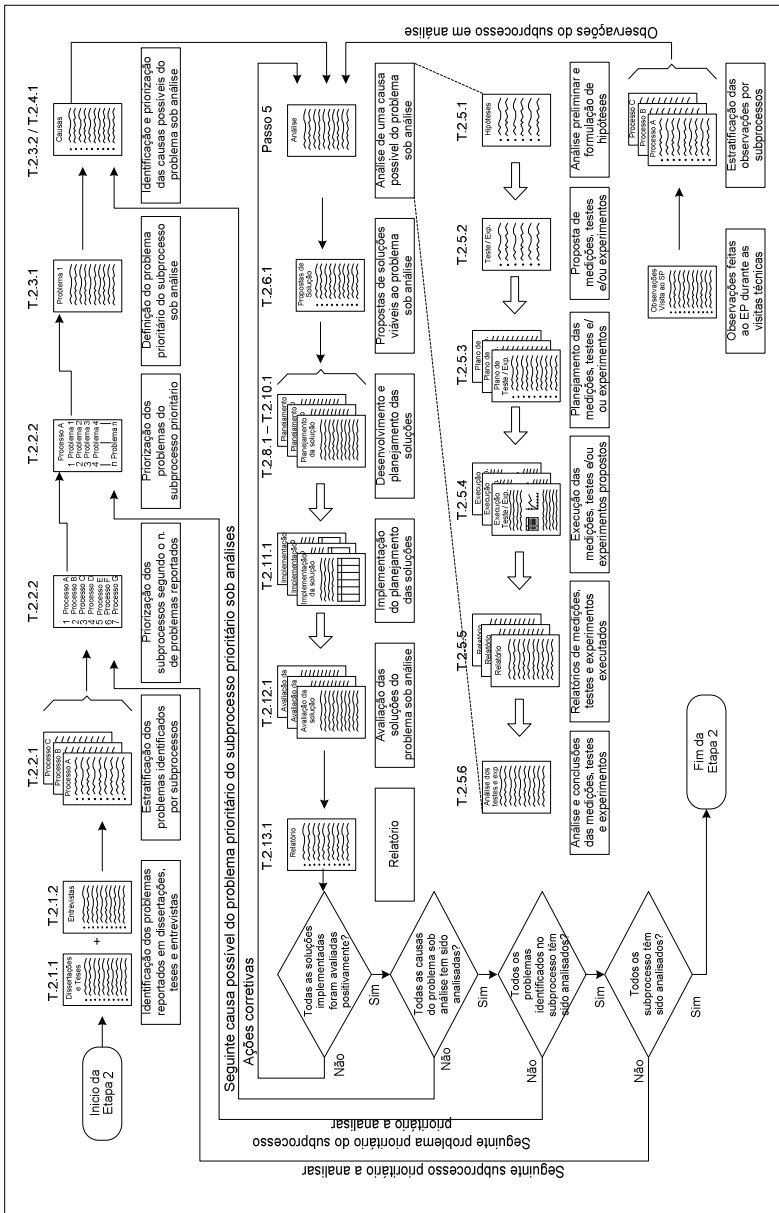


Figura 4.15 – Fluxograma da metodologia de análise e melhoria dos problemas do EP

Tabela 4.21 – Aplicação da MAMP para o problema prioritário do subprocesso computacional do EP (continua)

N° Problema	7.1	Variação dimensional da camada
Definição do problema		<p>1) Variação dimensional da peça gravada, nos eixos X e Y em relação aos projetados no modelo 2D, e variação da espessura da camada, em relação ao deslocamento ingressado através da interface do <i>software</i>.</p> <p>2) Variação dimensional maior no eixo X (direção de deslocamento do depositador para a EVFL horizontal), que no eixo Y.</p>
Observação		<p>Todos os problemas reportados associam a variação dimensional como sendo um erro entre o dimensionamento teórico do modelo 2D e o dimensionamento medido em uma única peça final construída. Não tem-se registrado provas de repetitividade dimensional na fabricação de peças.</p>
Causas possíveis		<p>Erro no pré-processamento do modelo 2D.</p> <p>Erro no algoritmo de geração do arquivo com a Estratégia de Varredura do Feixe do Laser (EVFL).</p> <p>Erro no algoritmo de leitura do arquivo com a EVFL.</p> <p>Erro no algoritmo de comando dos espelhos do cabeçote de marcação.</p> <p>Erro no fator: passos do motor de passo/deslocamento da Plataforma de Construção (PC) no eixo Z (analisado nos problemas 6.1 e 6.2).</p> <p>Perda do trem de pulsos desde o <i>software</i> Alpha ao motor de passo. (analisado nos problemas 6.1 e 6.2).</p>
Informação a analisar		<p>A.1. Procedimento utilizado pelos usuários para gerar o modelo 2D.</p> <p>A.2. Algoritmo de geração, leitura e comando da EVFL com o modelo 2D da camada.</p> <p>A.3 Variáveis e sinais utilizadas pelo <i>software</i> para a operação e ajuste do cabeçote de marcação.</p>
		<p>A.1. Não há, em dissertações ou teses, nem disponível aos usuários, procedimentos escritos sobre os passos requeridos no pré-processamento de um modelo 2D, nem referências ao <i>Software</i> (SW) em que os modelos 2D tem sido feitos. Por isso, não há evidência dos parâmetros de ajustes, nem a relação mm/bits considerados na avaliação dimensional das peças construídas. Entrevistas realizadas a usuários do EP, permitiram recolher informação dos SWs utilizados (CorelDraw, Paint).</p>
Análise preliminar		<p>A.2. O Algoritmo de geração da EVFL armazena no arquivo especificado: (i) o ângulo de rotação dos espelhos (em graus); (ii) o valor da % da potência com resolução 12 bits (proporcional ao padrão RGB) da posição armazenada; (iii) a posição do modelo a ser gravada (em pixels); e (iv) o correspondente valor da cor (no padrão RGB). Os valores (i) e (ii) correspondem a parâmetros do sistema Laser, e os valores (iii) e (iv) correspondem aos parâmetros do modelo 2D. O algoritmo de leitura lê os valores correspondentes a (i) e (ii). O algoritmo que comanda a posição dos espelhos do cabeçote de marcação, envia o valor lido em (i), diretamente à placa digital/análogica que gera os sinais de tensão requeridas pelo cabeçote de marcação.</p>
		<p>A.4 A lente focal do cabeçote de marcação, fornece a informação a seguir: (i) working distance: 246 mm; e (ii) square field size: 112 mm. Synrad (1996) informa que: (iii) a tensão de entrada máx. para ajuste dos espelhos é: +/- 10 Vdc. A partir desses dados, podem-se calcular as relações: tensão/posicionamento angular (dos espelhos), e distância linear. (percorrida pelo feixe do Laser)/tensão de referência dos espelhos.</p> <p>Conclui-se que: (i) o valor utilizado para comandar o posicionamento do feixe do Laser é o valor dos ângulos dos espelhos; (ii) o erro de dimensionamento não pode ser gerado durante a leitura do arquivo de dados nem durante o comando do sistema de espelhos; e (iii) o algoritmo não usa nenhum fator de relação (mm/passos) para o deslocamento da PC, sendo de responsabilidade do usuário definir e informar essa relação no SW (ingresso do n° de passos a ser dado pelo motor).</p>

Tabela 4.21 – Aplicação da MAMP para o problema prioritário do subprocesso computacional do EP (continuação)

Hipóteses	Erros no pré-processamento do modelo dimensionado, erro na distância de trabalho (distância focal) atualmente usada e falta de informação do equipamento poderiam ser as causas dos erros dimensionais.
	<p><b>Nome-objetivo do teste/experimento</b></p> <p>Gravação do contorno de uma figura quadrada de dimensões 100x100 pixels usando o SW Microsoft Paint 5.1.</p> <p>Determinação da relação da janela principal do módulo "controle alpha FGM" do SW Alpha, e da área de gravação na PC.</p> <p>Determinação da relação da janela especificada como "área de trabalho", do módulo "controle Alpha FGM" do SW Alpha, e da área de gravação na PC.</p> <p>Gravação do contorno de uma figura quadrada de dimensões 50x50 mm usando o SW CorelDRAW 9.</p> <p>Gravação consecutiva de um mesmo contorno dum quadrado de 50x50 mm (10 repetições).</p> <p>Determinação da precisão teórica dos modelos gravados, e do erro induzido pelo arredondamento da resolução.</p> <p>Determinação da distância de trabalho do cabeçote de marcação (distância focal).</p> <p>Determinação do efeito da variação da distância de trabalho no dimensionamento da peça do Teste - 5.2.2.</p>
	<p><b>Conclusões</b></p> <p>O desenho de 100x100 pixels gravou um quadrado de 20,5 mm (comprimento) x 20,73 mm (Largura). A revisão do algoritmo de SW evidenciou a multiplicação do fator=5,25/5,15 no eixo x, o que representa um 1,94% no comprimento em relação à largura. Por outro lado informação no algoritmo do SW informa da não gravação da última linha, que corresponde a uma redução de 0,2 mm. O desenho gravado foi com EVFL zig-zag vertical, pelo que a redução acontecerá no eixo x.</p> <p>A área máxima de gravação, em pixels, da janela principal é de: 488 pixels (comprimento) x 496 pixels (largura).</p> <p>A área máxima de gravação, em mm, da janela principal é de: 98,2 mm (comprimento) x 98,2 mm (largura).</p> <p>Determina-se a resolução horizontal = 126,22 DPI = 126 DPI e a resolução vertical = 128,29 DPI = 128 DPI</p> <p>A área de gravação, em pixels, da janela definida como "área de trabalho" é de: 440 pixels (comprimento) x 416 pixels (largura).</p> <p>A área de gravação, em mm, da janela definida como "área de trabalho" é de: 88,6 mm (comprimento) x 82,1 mm (largura).</p> <p>Usando a resolução obtida no exp.7.2.1. para um quadrado dimensionado de 50x50 mm (no CorelDraw), obtive-se as seguintes dimensões: comprimento: 50,32 mm; largura: 50,36 mm. O modelo gravado apresenta uma variação de 0,01% de seu comprimento em relação da sua largura (relação de aspecto), e um erro de 0,72% no caso da largura em relação a dimensão projetada.</p> <p>Não foi possível observar, visualmente, uma variação dimensional, nem um deslocamento dos desenhos gravados 10 vezes, um após o outro, em relação a um desenho gravado 1 vez. Só foi observado uma acentuação na cor, produto da maior densidade de energia fornecida.</p> <p>Considerando uma resolução horizontal de 126,22 DPI, e uma resolução vertical de 128,29 DPI, determinou-se: Precisão horizontal : (+/-) ½ pixel = +/- 0,1006 mm. Precisão vertical : (+/-) ½ pixel = +/- 0,0990 mm.</p> <p>Erro de arredondamento horizontal: +0,22 DPI/mm. Erro de arredondamento vertical : +0,29 DPI/mm.</p> <p>No caso do desenho de 50mm x 50mm gravado, tem-se que:                  Erro horizontal máx.: 50 [mm] x 0,22 [DPI/mm] = 11 [DPI] = 0,433 [mm]                  Erro vertical máx.: 50 [mm] x 0,29 [DPI/mm] = 14,5 [DPI] = 0,571 [mm]                  Então, a dimensão teórica dum desenho do teste 5.2.2 (50mm x 50mm) é:                  Largura: (50+0,433+/- 0,1006) [mm] = (50,433 +/- 0,1006) [mm], e Altura: (50+0,571 +/- 0,0990) [mm] = (50,571 +/- 0,0990) [mm]</p>
	<p><b>Conclusões</b></p> <p>O desenho de 100x100 pixels gravou um quadrado de 20,5 mm (comprimento) x 20,73 mm (Largura). A revisão do algoritmo de SW evidenciou a multiplicação do fator=5,25/5,15 no eixo x, o que representa um 1,94% no comprimento em relação à largura. Por outro lado informação no algoritmo do SW informa da não gravação da última linha, que corresponde a uma redução de 0,2 mm. O desenho gravado foi com EVFL zig-zag vertical, pelo que a redução acontecerá no eixo x.</p> <p>A área máxima de gravação, em pixels, da janela principal é de: 488 pixels (comprimento) x 496 pixels (largura).</p> <p>A área máxima de gravação, em mm, da janela principal é de: 98,2 mm (comprimento) x 98,2 mm (largura).</p> <p>Determina-se a resolução horizontal = 126,22 DPI = 126 DPI e a resolução vertical = 128,29 DPI = 128 DPI</p> <p>A área de gravação, em pixels, da janela definida como "área de trabalho" é de: 440 pixels (comprimento) x 416 pixels (largura).</p> <p>A área de gravação, em mm, da janela definida como "área de trabalho" é de: 88,6 mm (comprimento) x 82,1 mm (largura).</p> <p>Usando a resolução obtida no exp.7.2.1. para um quadrado dimensionado de 50x50 mm (no CorelDraw), obtive-se as seguintes dimensões: comprimento: 50,32 mm; largura: 50,36 mm. O modelo gravado apresenta uma variação de 0,01% de seu comprimento em relação da sua largura (relação de aspecto), e um erro de 0,72% no caso da largura em relação a dimensão projetada.</p> <p>Não foi possível observar, visualmente, uma variação dimensional, nem um deslocamento dos desenhos gravados 10 vezes, um após o outro, em relação a um desenho gravado 1 vez. Só foi observado uma acentuação na cor, produto da maior densidade de energia fornecida.</p> <p>Considerando uma resolução horizontal de 126,22 DPI, e uma resolução vertical de 128,29 DPI, determinou-se: Precisão horizontal : (+/-) ½ pixel = +/- 0,1006 mm. Precisão vertical : (+/-) ½ pixel = +/- 0,0990 mm.</p> <p>Erro de arredondamento horizontal: +0,22 DPI/mm. Erro de arredondamento vertical : +0,29 DPI/mm.</p> <p>No caso do desenho de 50mm x 50mm gravado, tem-se que:                  Erro horizontal máx.: 50 [mm] x 0,22 [DPI/mm] = 11 [DPI] = 0,433 [mm]                  Erro vertical máx.: 50 [mm] x 0,29 [DPI/mm] = 14,5 [DPI] = 0,571 [mm]                  Então, a dimensão teórica dum desenho do teste 5.2.2 (50mm x 50mm) é:                  Largura: (50+0,433+/- 0,1006) [mm] = (50,433 +/- 0,1006) [mm], e Altura: (50+0,571 +/- 0,0990) [mm] = (50,571 +/- 0,0990) [mm]</p>

Tabela 4.21 – Aplicação da MAMP para o problema prioritário do subprocesso computacional do EP (conclusão)

	N°	Conclusões (continuação)
	Exp - 5.3.1	A distância de trabalho indicada na lente do cabeçote de marcação é de 246 mm e a distância de trabalho atual medida, usando um paquímetro digital, foi de 239,52 mm, determinando-se uma diferença de 6,48 mm, o que representa um desvio de 2,6% em relação ao indicado na lente.
Conclusões med, testes e exp.	Exp - 5.3.2	<p>Da informação obtida em A.4, pode-se determinar a variação dimensional gerada pela variação da distância de trabalho.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) O deslocamento do feixe do Laser (0 - 112 mm) é comandado por um valor de registro (Vreg) (0 - 4095), gerando a relação: <math>36,5625 \text{ Vreg/mm}</math>.</li> <li>2) Por trigonometria, obtém-se que o comprimento linear (L), sobre a PC, é dado por: <math>L = \text{distância focal} \times \tan(\theta)</math>.</li> <li>3) Para a distância focal=239,52 mm, e L=50 mm, obtém-se: <math>\theta=11,7912^\circ</math>.</li> <li>4) Para a distância focal=246 mm, e <math>\theta=11,7912^\circ</math>, obtém-se: <math>L=51,35 \text{ mm}</math>, o que representa um erro de 2,71% no quadrado de 50mm x 50mm gravado.</li> </ol> <p>Conclui-se que: (i) a falta de um procedimento para o pré-processamento de um modelo 2D, tem contribuído para gerar erros dimensionais e de relação de aspecto (comprimento/largura); (ii) o erro na distância de trabalho, tem contribuído para gerar desenhos menores em relação aos que seriam gerados com a distância de trabalho especificada na lente; e (iii) a falta de análise do processo de conversão do modelo dimensionado até o modelo em mapa de bit, tem levado a considerar esses erros como sendo do EP. Uma análise posterior à execução dos experimentos, constatou um erro no algoritmo de geração da EVFL no SW Alpha, responsável pelo aumento dimensional no eixo X em relação do eixo Y, erro presente desde as primeiras versões do SW alpha. A correção desse erro é simples, mas requer uma revisão aprofundada dos algoritmos do SW, já que sua correção afetará os 11 algoritmos da EVFL, a janela de simulação da gravação e o dimensionamento da janela de processamento do modelo digital.</p>
Propostas de soluções		<p>Propor um procedimento para pré-processamento do modelo digital.</p> <p>Ajustar a PC à distância de trabalho especificada na lente.</p> <p>Desgastar a chapa de aço para reduzir o atrito.</p> <p>Reapertar os parafusos entre motor de passo e o suporte de motor.</p>
Implementação		<p>Procedimento para pré-processamento de um modelo digital (sem FGM) (Ver apêndice B10).</p> <p>Documento com os erros incorridos no pré-processamento de um modelo digital (Ver apêndice B11)</p> <p>A PC foi ajustada à distância de trabalho de 246 mm da lente focal do cabeçote de marcação.</p> <p>A chapa de aço foi desgastada.</p> <p>Os parafusos entre motor de passo e o suporte do motor foram reapertados.</p>

### 4.3 ETAPA 3: ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO PROCESSO

A presente etapa descreve a aplicação da metodologia de análise descrita na seção 3.4 com o objetivo de identificar as fontes de variabilidade, as causas da variabilidade para cada fonte e os parâmetros de fabricação utilizados no processo de fabricação.

#### **4.3.1 Passo 3.1 - Identificação das fontes de variabilidade**

Baseado na técnica 7M, descrita na seção 3.4.1, as fontes de variabilidade a serem consideradas no EP serão: (i) a matéria-prima, (ii) o próprio equipamento, (iii) os métodos ou procedimentos, (iv) o usuário, e (v) o meio ambiente. As fontes de variabilidade relacionadas a finanças e gestão/gerenciamento não serão consideradas por não ser o EP um processo de fabricação seriada nem com fins comerciais.

#### **4.3.2 Passo 3.2 - Identificação das causas possíveis de variabilidade para cada fonte**

Para uma completa análise, a variabilidade será considerada durante a fabricação de (i) uma mesma camada, (ii) duas camadas consecutivas em uma mesma peça, (iii) duas peças continuadas, e (iv) peças iguais fabricadas por operadores diferentes e em épocas distintas.

A análise da variabilidade dependerá também do tipo de peça fabricada (ver a subtarefa 1.2.2.3) e de seu processamento. Nesta análise será considerada a fabricação de uma peça a partir de múltiplos desenhos 2D, com gradação funcional no eixo X e com aquecimento prévio em cada camada.

A identificação das causas possíveis de variabilidade, para cada fonte identificada na tarefa anterior, é apresentada na figura 4.16, para as causas comuns ou aleatórias, e na figura 4.17, para as causas especiais ou assinaláveis, por meio do Diagrama de Causa e Efeito.

As causas de variabilidade relativas ao EP foram estratificadas em subprocessos para uma melhor análise da informação. Por outro lado, cada fonte de variabilidade foi identificada com uma letra (A-E) e cada causa possível de variabilidade, associada com uma fonte, numerada sequencialmente.

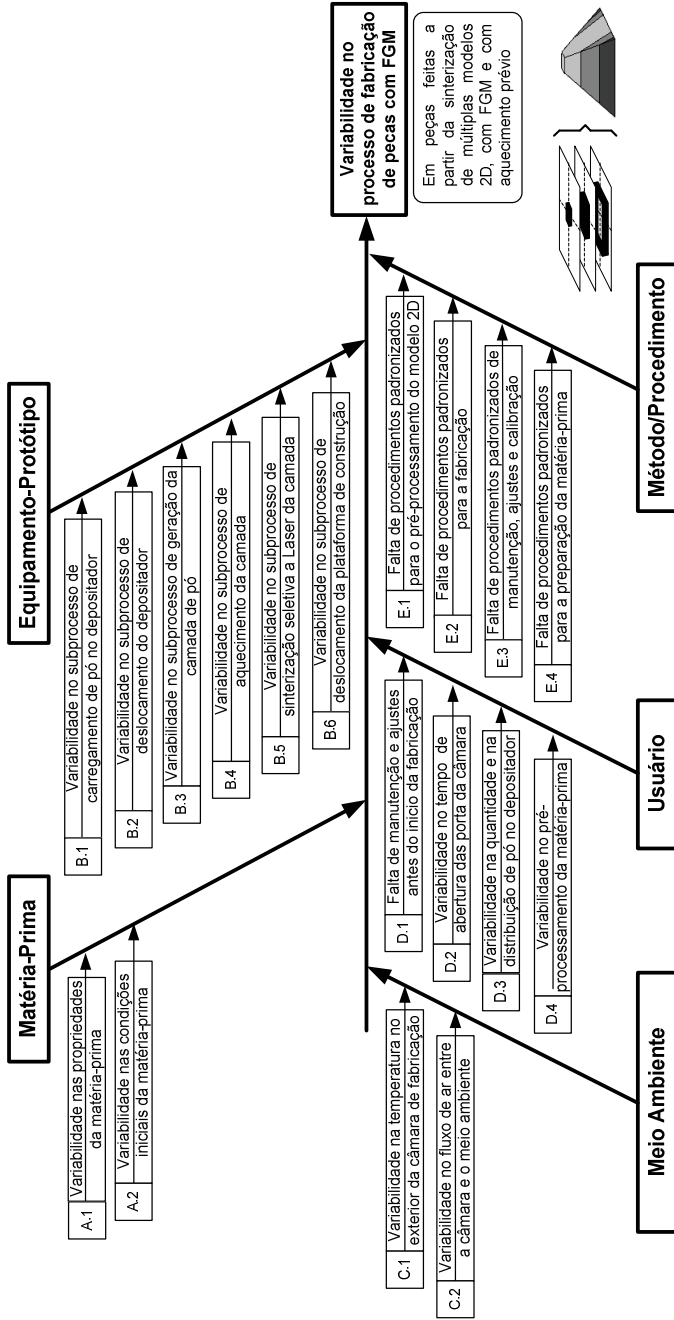


Figura 4.16 - Diagrama de Causa e Efeito para as causas comuns ou aleatórias de variabilidade do processo de fabricação

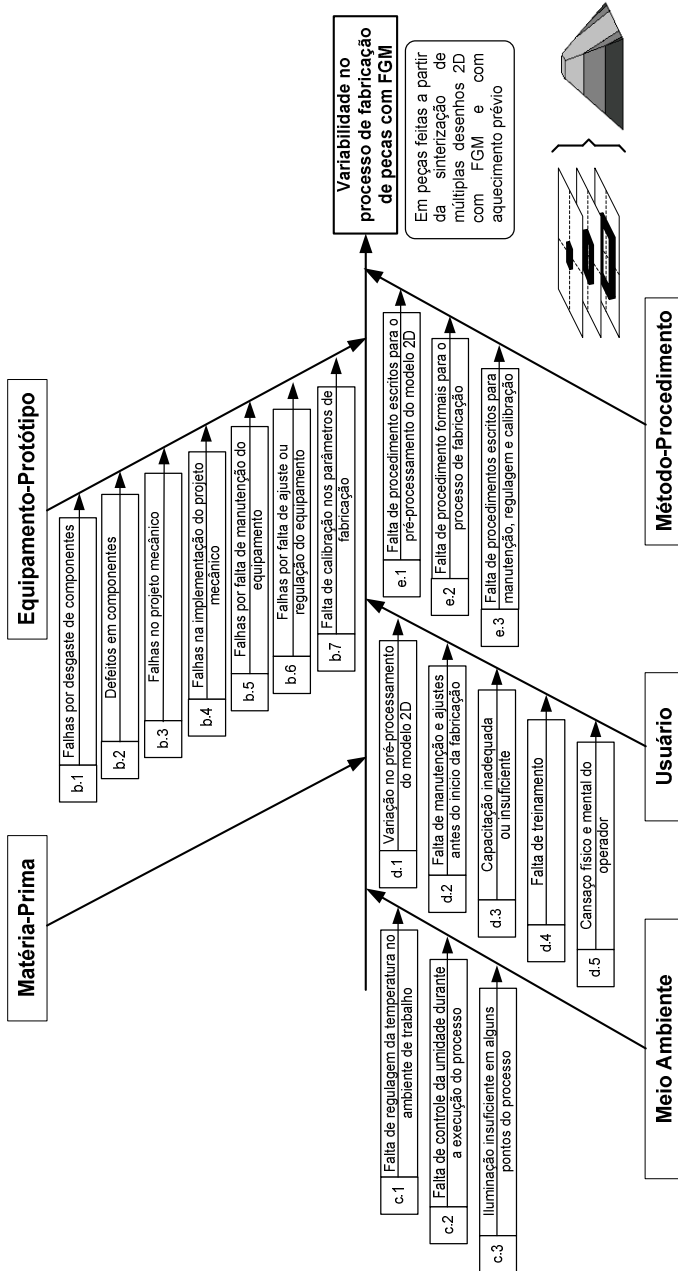


Figura 4.17 - Diagrama de Causa e Efeito para as causas especiais ou assinaláveis de variabilidade do processo de fabricação

### 4.3.3 Passo 3.3 – Priorização das causas possíveis de variabilidade

Considerando que não existem informações preliminares que permitam atribuir um grau de importância, uma gravidade, ou uma urgência a cada causa possível de variabilidade, nem trabalhos que tenham evidenciado ou quantificado alguma variabilidade atribuível ao processo, a análise das causas possíveis será realizada em ordem sequencial.

### 4.3.4 Passo 3.4 - Análise das causas possíveis de variabilidade

Tarefa 3.4.1: Analisar as causas possíveis para cada fonte de variabilidade

Nesta tarefa as causas possíveis foram decompostas até suas causas de origem, visando propor soluções de redução e/ou eliminação. A análise dessas causas baseou-se, principalmente, na identificação do produto interno, nas suas características de qualidade desejadas (ver a tarefa 1.3.3), na análise dos problemas (ver o passo 2.5) e na experiência obtida no conhecimento do processo.

A seguir são descritas as análises para cada fonte de variabilidade.

#### Variabilidade causada pela matéria-prima

Cada matéria-prima requer, para seu processamento, de parâmetros de processos específicos segundo as suas propriedades intrínsecas. Dessa forma mesmos parâmetros aplicados a matérias-primas diferentes produzirão peças com características diferentes.

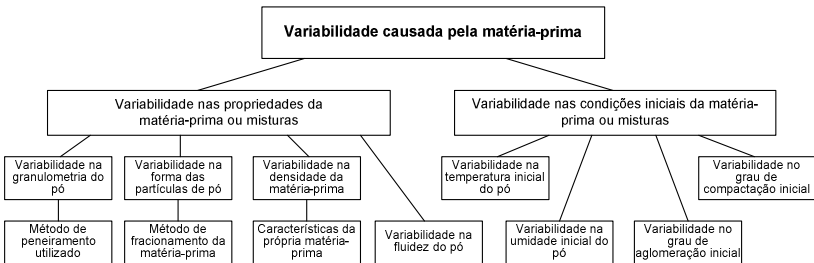
Por exemplo, a porcentagem de umidade e a temperatura inicial da matéria-prima darão origem à variabilidade microestrutural. Já diferentes diâmetros de partículas, variações entre matérias-primas de diferentes fornecedores, variações na forma das partículas e diferentes graus de aglomeração ou compactação inicial darão origem a variabilidade geométrica e microestrutural na peça final. Neste sentido tem-se realizado pré-processamentos na matéria-prima, como secagem a vácuo (LEITE, 2007) e mistura mecânica (PAGGI, 2008), com o intuito de reduzir a umidade do pó e a aglomeração das partículas, respectivamente.

Por outra parte, o EP tem permitido desenvolver pesquisas utilizando pó moído pelo próprio usuário. Considerando que a deposição do material sobre a PC é realizada pela ação da gravidade, a fluidez do



pó, especificamente a fluidez gravitacional, é uma propriedade que ainda não tem sido considerada.

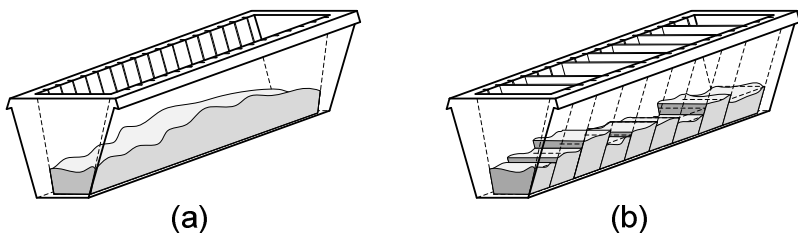
A análise da variabilidade causada pela matéria-prima permitiu identificar como possíveis causas a variabilidade nas propriedades da matéria-prima ou misturas e a variabilidade nas suas condições iniciais, cujas causas raízes são ilustradas na figura 4.18 através da ferramenta Árvore de Falha.



**Figura 4.18 – Árvore de falha para a variabilidade causada pela matéria-prima**

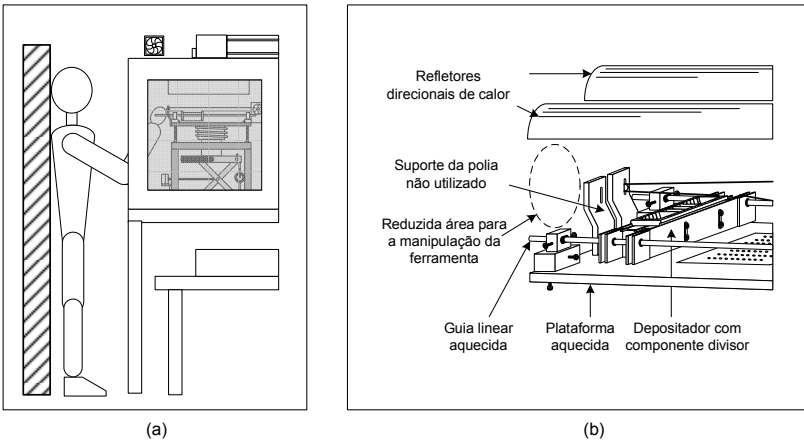
Variabilidade causada pelo equipamento-protótipo

Com o objetivo de mostrar o desenvolvimento da análise da variabilidade no EP, será apresentada como exemplo a análise das causas possíveis para a variabilidade B1- Variabilidade no subprocesso de carregamento de pó no depositador, apresentada na figura 4.16. A análise da variabilidade permitiu identificar como possíveis causas: (i) a variabilidade no acabamento superficial do pó carregado, e (ii) a variabilidade na quantidade do pó carregado em seu interior. A figura 4.19 ilustra ambas situações.



**Figura 4.19 – Variabilidade no acabamento superficial e na quantidade de pó no depositador para fabricação de peças (a) sem FGM (b) com FGM**

A variabilidade no acabamento superficial do pó carregado é devida: (i) ao reduzido espaço de manipulação para carregamento de pó causado pelo reduzido espaço externo que limita a movimentação do operador e à reduzida área no interior da câmara para a manipulação do pó (ii) às más condições de operação causadas pela exposição do operador ao ar quente proveniente do interior da câmara e aos gases gerados pelo próprio processo de sinterização, e à limitação visual do interior do depositador durante o carregamento; (iii) à falta de espalhamento uniforme da superfície do pó no depositador devido ao uso de ferramentas inadequadas; e (iv) ao uso de ferramentas inadequadas para a dosagem e distribuição do pó no interior do depositador. A figura 4.20 (a) ilustra o reduzido espaço interior para o operador ter acesso ao depositador.



**Figura 4.20 – Variabilidade causada pelo reduzido espaço de operação para (a) o operador e (b) o carregamento do pó no depositador**

A variabilidade na quantidade do pó carregado no depositador é causada pelo uso de ferramentas inadequadas para a dosagem e distribuição do pó e pela falta de métodos ou procedimentos para o próprio carregamento. A figura 4.20 (b) ilustra o reduzido espaço de operação no interior da câmara para a manipulação da ferramenta utilizada durante o carregamento e nivelamento do pó.

A partir da análise da variabilidade deste subprocesso foi elaborada a figura 4.21 utilizando a ferramenta “Diagrama de Árvore”, também chamada “Árvore de Falha”, julgada a mais indicada para a realização deste passo, por facilitar o ingresso de nova informação e pela

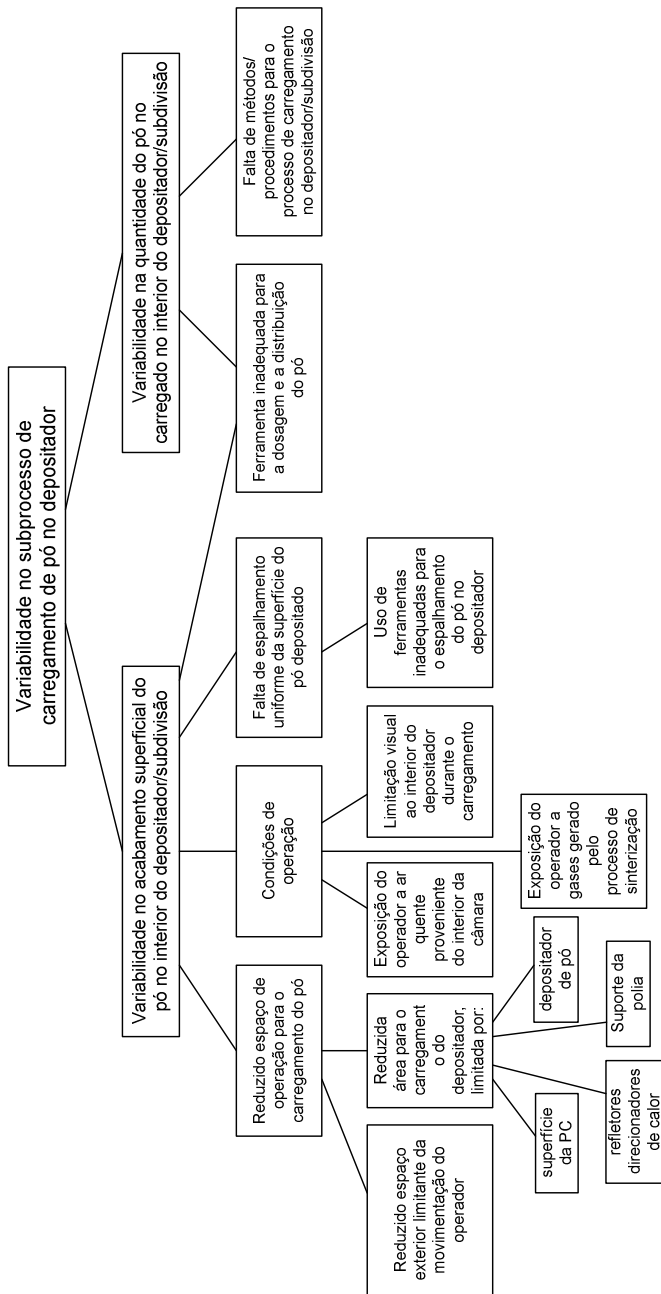


Figura 4.21 - Árvore de falha para a variabilidade no subprocesso de carregamento de pó no depositador

dificuldade do Diagrama de Causa e Efeito para conter uma grande quantidade de informação. Os resultados da análise da variabilidade para os restantes subprocessos encontram-se no “Relatório Diagramas de Árvore para a análise da variabilidade dos subprocessos do EP” que forma parte do REP.

A realização de desenhos que ilustram essas causas tem facilitado o trabalho de desdobramento até suas causas raízes.

#### Variabilidade causada pelo método/procedimento

As principais causas da variabilidade associadas aos métodos e/ou procedimentos de fabricação são devidas à falta de procedimentos escritos e padronizados para: (i) o pré-processamento do modelo 2D; (ii) a fabricação; (iii) a manutenção, ajuste e calibração do equipamento; e (iv) a preparação da matéria-prima.

#### Variabilidade causada pelo usuário

A análise e a melhoria dos problemas desenvolvidas na etapa 2, permitiram estabelecer que as causas possíveis de variabilidade se devem a: (i) falta de manutenção e ajustes antes do início da fabricação, (ii) variabilidade nos tempos de abertura das portas da câmara para carregamento, (iii) variabilidade na quantidade e na distribuição do pó no depositador, (iv) variabilidade no pré-processamento da matéria-prima, (v) variação no pré-processamento do desenho 2D a ser sinterizado, (vi) capacitação inadequada ou insuficiente, (vii) falta de treinamento supervisionado, e (viii) cansaço físico e mental do operador causado pelas longas jornadas de trabalho requeridas para a fabricação de peças no EP.

#### Variabilidade causada pelo meio ambiente

As principais causas da variabilidade associadas ao meio ambiente são devidas à variabilidade na temperatura exterior da câmara de fabricação, e à variabilidade no fluxo de ar entre a câmara e o meio ambiente. O efeito do meio ambiente observa-se durante: (i) a abertura das portas para o carregamento do pó, diminuindo a temperatura no interior da câmara; (ii) o processo de sinterização, variando a temperatura da superfície da camada, consequência do ar soprado à lente focal; (iii) o processo de aquecimento e preaquecimento, variando sua velocidade, assim como a frequência de oscilação da temperatura; e (iv) a extração do pó e ar quente do interior da câmara.

Foi observado que a sala em que se encontra o EP não possui qualquer controle de temperatura nem controle de umidade.

### Tarefa 3.4.2: Analisar as causas possíveis de variabilidade para cada parâmetro de fabricação

A tarefa 3.4.2 foi dividida em: (i) compilação dos parâmetros de fabricação utilizados atualmente no processo de fabricação, (ii) análise da variabilidade dos parâmetros de fabricação utilizados no processo, e (iii) determinação dos parâmetros de fabricação requeridos para garantir o processo de fabricação de peças.

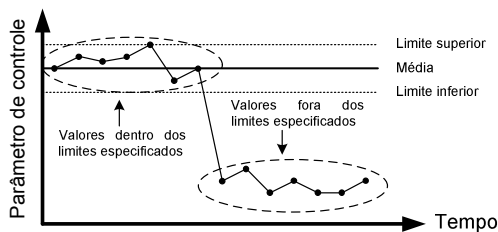
#### Subtarefa 3.4.2.1: Compilar os parâmetros de fabricação utilizados no processo de fabricação

Os parâmetros de fabricação utilizados no EP, apresentados na seção 2.1.5, são: (a) a potência do feixe do Laser, (b) a velocidade do Laser, (c) a temperatura da plataforma, (d) a temperatura da câmara, e (e) a espessura da camada. Os parâmetros (a), (b) e (e) correspondem a parâmetros selecionados por meio da interface de *software*. Já os parâmetros (c) e (d) correspondem a parâmetros ajustados manualmente pelo operador.

#### Subtarefa 3.4.2.2: Analisar a variabilidade dos parâmetros de fabricação utilizados no processo

A fabricação de produtos não defeituosos requer que o processo de fabricação apresente uma variabilidade reduzida e dentro dos limites especificados no projeto do equipamento de fabricação. Com esse objetivo será utilizada a ferramenta “Carta de Controle”, ilustrando esses desvios.

A Carta de Controle “é um tipo específico de gráfico de controle que serve para acompanhar a variabilidade de um processo” (JÚNIOR, 2003, p.89). A figura 4.22 ilustra essa ferramenta, indicando valores do parâmetro dentro e fora dos limites especificados no projeto do equipamento de fabricação. Na mesma figura observa-se, mesmo que os



**Figura 4.22 – Carta de Controle evidenciando um parâmetro dentro e fora das especificações de projeto**

valores fora dos limites especificados apresentem reduzida variação entre eles, esses valores encontram-se afastados do valor médio desejado.

No caso do EP, não foram encontradas especificações de limites para os valores dos parâmetros de fabricação, portanto para uma melhor visualização da variabilidade em uma Carta de Controle, foi considerada como valores limites uma faixa de tolerância de  $\pm 2\%$  em relação ao valor nominal (ou valor máximo) da faixa de valores permitida, para cada um dos parâmetros sob análise, apresentados a seguir:

- Parâmetro: *Potência do feixe do Laser*

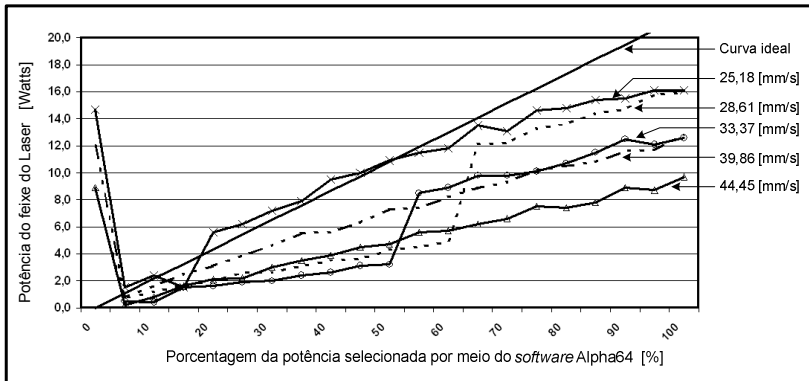
A potência do feixe do Laser é selecionada por meio de uma barra deslizante (em porcentagem da potência desejada) na interface do *software* Alpha. O valor selecionado permite calcular o valor a ser enviado à placa digital/análogica, gerando um sinal de referência ao controlador do Laser, que por sua vez gera um sinal PWM para comandar a potência do Laser.

A construção de uma Carta de Controle requer o monitoramento desse parâmetro de forma contínua. Devido à falta de um instrumento de medição de potência em forma contínua, foi utilizado um medidor de potência média (em intervalos descontínuos de 5 s de exposição ao feixe), disponibilizado pelo laboratório LabMat, a partir do qual foi obtida a curva de potência do feixe em função da porcentagem ingressada (de 0 até 100 %, em intervalos de 5%) para 5 velocidades selecionadas, cujos resultados são apresentados na figura 4.23.

O gráfico da figura 4.23 mostra que a potência média varia para diferentes valores de velocidade e é diferente de zero quando o valor 0% é selecionado. Também é observada uma brusca variação na potência na faixa de 50 até 70 %. A seguir são detalhadas essas observações:

- A variação aparente da potência para diferentes velocidades é devida ao princípio de funcionamento do EP (ver o apêndice C1), já que o valor da potência média comandada pelo *software* pode ser medido somente no Tempo de Exposição ao Feixe do Laser (TEFL) em que o feixe encontra-se ligado durante a gravação de cada spot, tempo que varia de 0,1 a 1 ms segundo a velocidade selecionada. Em outras palavras, durante o intervalo de medição de 5 seg. o medidor de potência média considera o tempo do Laser ligado e desligado, diminuindo o valor médio do feixe do Laser.

- O valor da potência é diferente de zero quando selecionado pelo usuário, devido à própria programação do *software*. Para porcentagem de potências maiores do que 0%, o algoritmo utiliza a porcentagem da



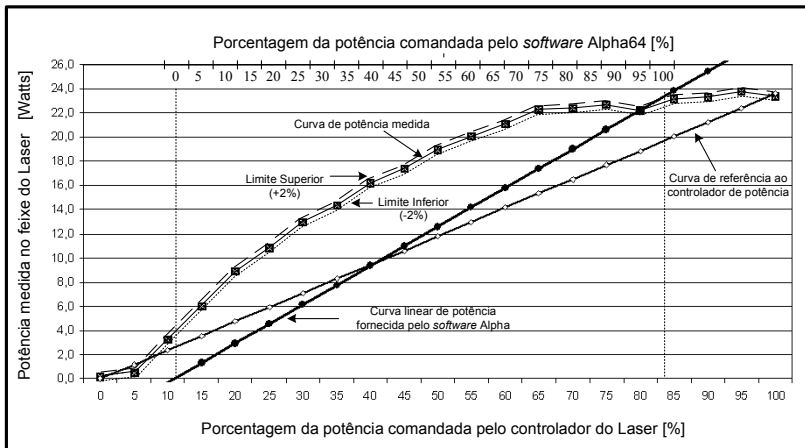
**Figura 4.23 – Curvas de potência do Laser geradas através do *software* Alpha, para diferentes valores de velocidade do feixe**

potência selecionada pelo usuário. Já para a porcentagem de potência igual a 0 %, o algoritmo utiliza um valor proporcional à escala de cinza do desenho, atribuindo-lhe à cor preta o valor máximo. Na figura 4.23 observa-se a influência da velocidade do Laser para uma porcentagem de potência de 0 %.

- A brusca variação na potência, na faixa de 50 até 70 %, foi evidenciada durante as medições, variando também segundo o sentido da medição.

Visando determinar a curva de calibração do Laser, independente da velocidade do Laser, foi desenvolvido um algoritmo de teste para comandando uma potência contínua por tempo maior a 5 s. O resultado é apresentado na curva da figura 4.24, considerando como limite da potência, um valor de  $\pm 2\%$  de seu faixa nominal (25 watts). Na figura 4.24 observa-se a curva linear de porcentagem da potência, comandada pelo *software*, a curva linear de referência ao controlador do Laser e a curva de potência medida, que mostra um comportamento não linear. O manual do operador do Laser (SYNRAD, 2002, p.10) adverte para essa não linearidade entre o sinal de referência ao controlador do Laser e a potência de saída do Laser.

Observa-se também, na figura 4.24, que quando o *software* Alpha comanda 0% e 100% da potência do Laser, na realidade está comandando um sinal de 11% e 84% do valor nominal do Laser, respectivamente. A explicação encontra-se no *software* de marcação “Lasercontrol” (ver a tarefa 1.1.4 para mais informação) que definiu uma potência mínima (que não marcasse uma chapa de cerâmica) e uma



**Figura 4.24 – Curva da potência do feixe do Laser**

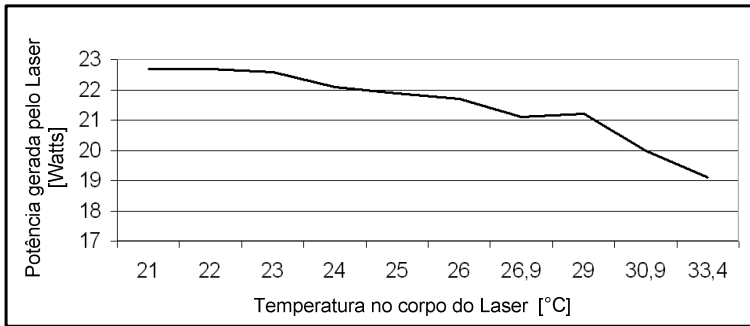
potência máxima (que não danificasse a chapa). Esses valores de potência mínima e máxima no “Lasercontrol” foram definidos como sendo 0% e 100%, respectivamente, em todas as versões existentes do *software* Alpha. O valor final a ser enviado à placa digital/analógica é apresentado na própria interface do *software* sob o nome “potcalc” (potência calculada), expressada pela equação 4.1, que foi obtida diretamente do algoritmo do *software*.

$$Potência\_Calculada = \%PotênciaSelecionada \times 30 + 450 \quad (4.1)$$

A placa digital/analógica tem uma resolução de 12 bits (0 - 4095) para comandar a potência do Laser. Por outro lado, a *Potência\_Calculada* varia entre 450 e 3450 (para 0% e 100% respectivamente), pelo que um valor de 450 comanda uma potência de 11% ( $450 \times 100 / 4096$ ) do valor nominal do Laser. Já um valor de 3450 comanda uma potência de 84% ( $3450 \times 100 / 4096$ ) de seu valor nominal.

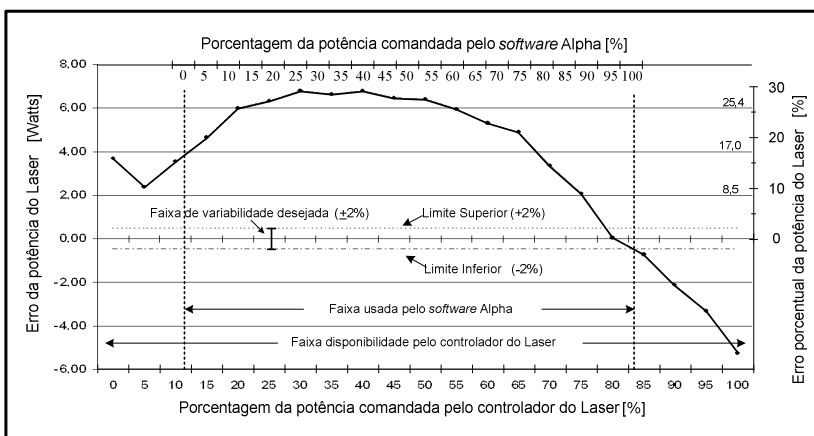
Durante as medições da potência foi observado que: (i) os valores da potência variavam segundo o sentido que a medição era realizada; e (ii) os valores da potência do Laser diminuía com o tempo de uso e com o aumento da potência utilizada. Em relação ao ponto (ii), testes adicionais permitiram evidenciar que essa diminuição era causada pelo aumento da sua temperatura de operação, como observado na figura 4.25. O manual do usuário do Laser informa da necessidade de utilizar resfriamento externo para aplicações que utilizem potências muito baixas (SYNRAD, 2002, p.25).



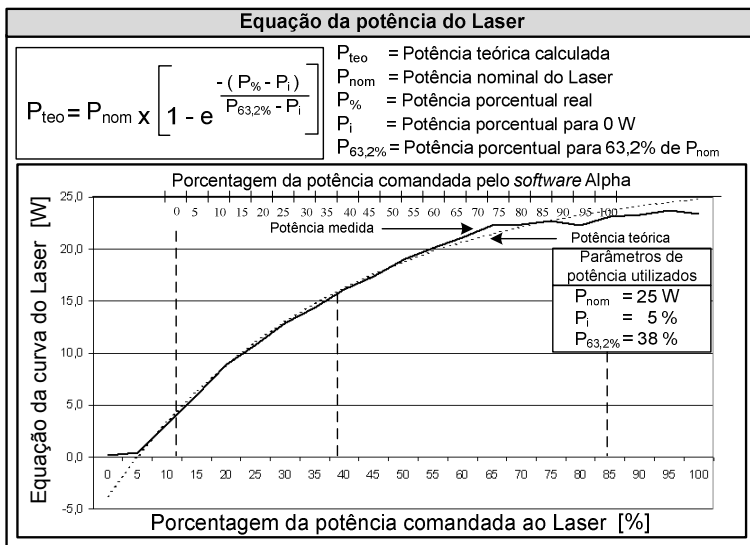


**Figura 4.25 – Curva da potência gerada pelo Laser em relação a sua temperatura de operação**

Com o intuito de evidenciar o erro entre a potência gerada pelo Laser e a porcentagem da potência selecionada no *software* do EP foi obtido o gráfico da figura 4.26. Nele observa-se que o erro entre ambas curvas, em relação ao valor nominal do Laser, encontra-se entre 17 % e 30,4 % em toda a faixa utilizada. Na figura 4.27 mostra-se a equação de primeiro ordem para a potência do Laser, determinada a partir da curva da potência medida e as curvas teórica e medida.



**Figura 4.26 – Curva de erro entre a potência medida e a potência comandada pelo software Alpha**

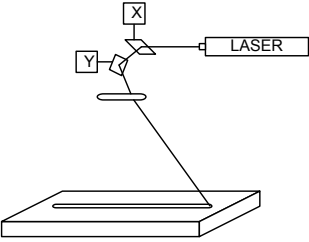
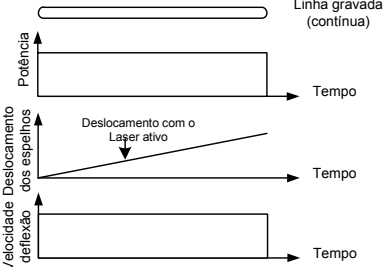
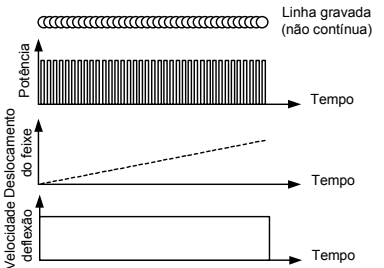
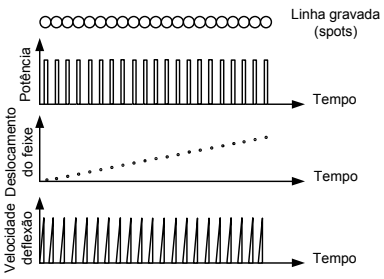


- Parâmetro: Velocidade do Laser

O *software* Alpha exibe no módulo “Sinterização a laser” uma barra deslizante virtual nomeada “Velocidade”, expressa em mm/s (ver a figura B6 no apêndice B6). Pesquisadores que utilizaram o EP têm-se referido a essa velocidade como velocidade do Laser (DABBAS, 2006, p.43), velocidade do feixe do Laser (KULMAN, 2006, p.57; PAGGI, 2008, p.87; KLAUSS, 2010, p.65), ou velocidade de varredura do Laser (DABBAS, 2006, p.42; LEITE, 2007, p.67; SANTOS, 2009, p.43; KLAUSS, 2010, p.59).

Segundo Gibson e Shi (1997), a “velocidade do feixe” pode ser definida como a distância deslocada pelo *scanner* em um tempo determinado, com o **Laser ligado**. A função de *scanner* no EP é realizada pelo cabeçote de marcação.

Segundo o princípio de funcionamento do EP, apresentado no apêndice C1, o EP corresponde a um equipamento de marcação a Laser, pelo que a sinterização acontece com o feixe do Laser fixo em um ponto (spot), fornecendo energia durante um determinado tempo até os espelhos serem deslocados a uma nova posição, com o feixe do **Laser desligado**, portanto a “velocidade do feixe”, definida anteriormente, é zero no EP, já que o Laser permanece desligado durante o deslocamento dos espelhos, não existindo portanto varredura do feixe. A figura 4.28

	<p align="center"><b>Sistema defletor de feixe do Laser</b></p> <p>Diagrama geral de um sistema defletor de feixe Laser, constituído por um mecanismo defletor (dois espelhos fixados a galvanômetros) e por um Laser comandados por um algoritmo em um computador, utilizado para gravar curvas contínuas, descontinuas ou pontos (spot).</p> <p>O Laser pode ser operado em forma contínua ou pulsante. O mecanismo defletor pode ser controlado a velocidade constante (para corte ou sinterização tradicional) ou para posicionamento (marcação).</p>
	<p><b>Mecanismo defletor deslocado a velocidade contínua e feixe do Laser contínuo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Linha gravada em forma contínua</li> <li>• Potência constante (contínua)</li> <li>• Deslocamento contínuo dos espelhos.</li> <li>• Velocidade de deflexão constante</li> <li>• VVFL constante igual ao comprimento da linha pelo tempo de gravação</li> </ul>
	<p><b>Mecanismo defletor deslocado a velocidade contínua e feixe do Laser pulsante</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Linha gravada em forma descontinua</li> <li>• Potência variável (potência média constante)</li> <li>• Deslocamento contínuo dos espelhos</li> <li>• Velocidade de deflexão constante</li> <li>• VVFL constante igual ao comprimento da linha pelo tempo de gravação</li> </ul>
	<p><b>Mecanismo defletor para posicionamento e feixe do Laser contínuo ou pulsante</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Linha formada por spots consecutivos alinhados</li> <li>• Potência variável (potência média constante)</li> <li>• Deslocamento descontinuo dos espelhos</li> <li>• VDST variável: <ul style="list-style-type: none"> <li>- VDST zero, quando o Laser estiver ligado,</li> <li>- VDST igual ao tempo de resposta dos espelhos do cabeçote de marcação,</li> <li>- VDST média igual ao número de spots gravados pela distância entre seus centros dividido pelo tempo de gravação.</li> </ul> </li> </ul>

**Figura 4.28 - Diferenças entre um sistema de sinterização tradicional e um sistema de marcação a Laser**

ilustra a diferença entre um sistema de sinterização tradicional e um sistema de marcação a Laser.

Baseado na análise anterior a velocidade referida no módulo “Sinterização a laser” corresponde, na verdade, à velocidade de marcação, gravação ou de sinterização, entendida como a distância linear dos spots<sup>14</sup> marcados (número de spots multiplicado pela distância entre dois spots consecutivos) e o tempo requerido para essa marcação. No caso de equipamentos de gravação, essa velocidade é denominada “Velocidade de Deflexão” (FAIßT, 2008) sobre a Superfície de Trabalho (VDST).

Conclui-se então que o conceito de VVFL não é aplicável a este EP, e que esse parâmetro é utilizado em equipamentos no qual o feixe se desloca em forma contínua pela superfície da camada.

Uma análise do algoritmo de marcação do *software* Alpha permitiu concluir que o parâmetro ingressado como velocidade do Laser corresponde na realidade ao TEFL, definido como o tempo necessário que o feixe do Laser deve permanecer ligado para sinterizar um único ponto ou spot com características desejadas, sendo esse o parâmetro de processo utilizado em equipamentos de marcação.

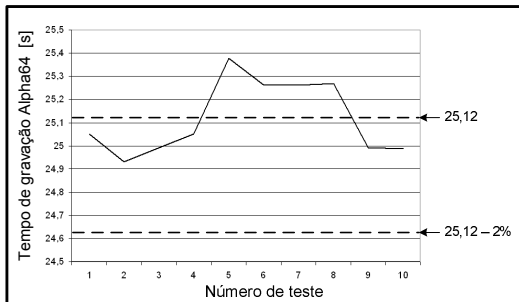
O TEFL não foi medido por não se dispor de uma placa de aquisição de dados de alta velocidade para monitorar diretamente os sinais de saída da placa digital/analógica. Contudo, foram realizados os seguintes testes: (i) variabilidade no tempo de gravação para uma mesma geometria (quadrado de 10x10 mm) a uma velocidade de 25,18 mm/s, tempo obtido através da indicação de tempo do *software* Alpha, considerando 10 repetições sob condições de repetitividade; (ii) variabilidade no tempo de gravação para a mesma geometria e condições que o teste anterior, mas com um segundo *software* rodando no computador do EP; e (iii) variabilidade entre a velocidade de gravação informada pelo *software* Alpha e a velocidade determinada experimentalmente por meio de um cronômetro, para a mesma geometria e condições que o teste (i).

O teste (i) determinou um tempo médio de gravação de 25,12±0,16 s, em uma faixa de ± 2%, como observado na figura 4.29.

O teste (ii) evidenciou um aumento do tempo de 25,12 s para 50,42 s, quando o mesmo teste (i) foi executado com uma aplicação multimídia rodando em segundo plano, o que representa uma diferença de 100,7%, evidenciando que o tempo de processamento do *software* depende dos processos internos do sistema operativo.

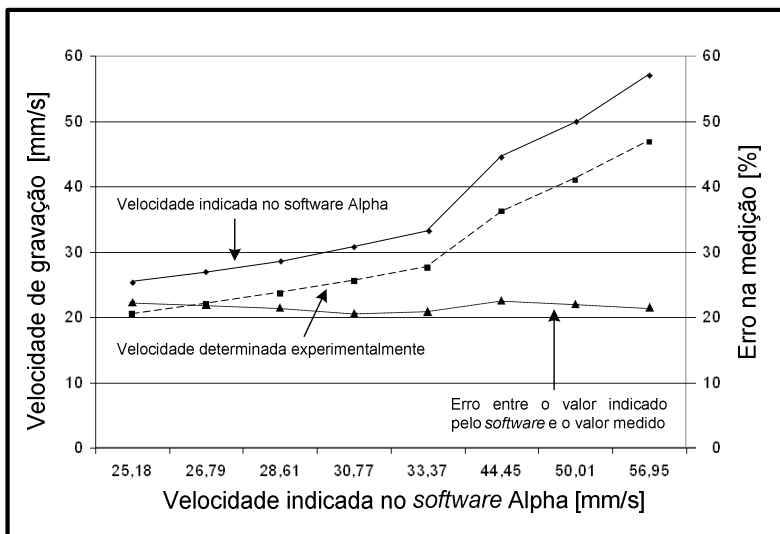
---

<sup>14</sup> Tamanho máximo do diâmetro do feixe do Laser gravado (JACOBS, 2006).



**Figura 4.29 - Variabilidade no tempo médio de gravação para um mesmo desenho**

O teste (iii) foi realizado para cada uma das velocidades disponíveis no *software* evidenciando que o erro na velocidade de gravação informada pelo *software*, em relação à velocidade de sinterização (ou fabricação), é de quase 20% menos do que o valor informado pelo *software*, como observado na figura 4.30. O teste (iii) evidenciou que os valores de velocidade fornecidos na tela do *software* foram determinados experimentalmente, em função do relógio interno do computador, e que a redução da velocidade atual é causada pela falta de manutenção desde o seu teste de calibração (2004 aprox.).



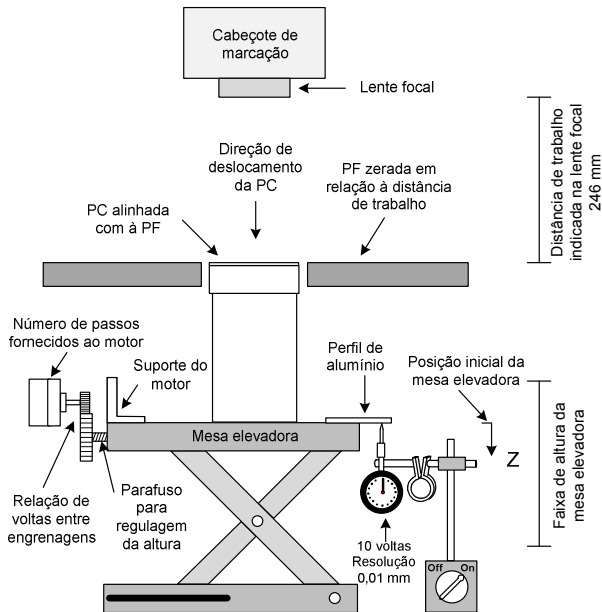
**Figura 4.30 - Variabilidade na velocidade informada no *software* Alpha para um mesmo desenho**

A partir do teste (i) foi possível também determinar matematicamente o valor da base de tempo utilizado pelo algoritmo de gravação 0,071 ms.

Conversações posteriores com o programador original do *software* “Lasercontrol” informaram que a base de tempo utilizada originalmente foi de 0,1 ms, que poderia ter-se alterado devido à falta de manutenção do *software*, correspondendo a um desvio do -29%.

- *Parâmetro: Espessura da camada*

A espessura da camada é determinada pelo número de passos fornecidos ao motor de passo, pela relação de dentes entre a engrenagem fixada ao motor e a engrenagem fixada ao parafuso da mesa elevadora, e pela relação entre o passo do parafuso e o deslocamento da mesa elevadora, como ilustrado na figura 4.31. O número de passos por volta do motor é de 48 ( $7,5^\circ$ /passo), a engrenagem fixada a seu eixo tem 20 dentes e a engrenagem fixada ao parafuso da mesa elevadora tem 120 dentes, pelo que são requeridos 288 passos para obter uma volta completa no parafuso da mesa elevadora (ver o apêndice A8 para uma ilustração completa do mecanismo de elevação).



**Figura 4.31 - Mecanismo de deslocamento da PC**

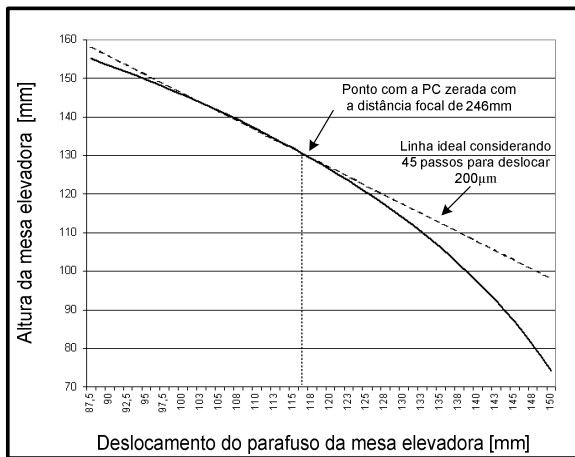
Pesquisadores têm determinado variações dimensionais na faixa de -13,65% até -20% na espessura da peça fabricada, em relação à espessura planejada e o número de camadas fabricadas.

No EP existem duas formas de comandar a altura da PC visando definir a espessura da camada durante a fabricação: (i) comandando um número de passos fixos (preestabelecidos) ao motor em cada camada, e (ii) comandando um número de passos variáveis em função do monitoramento a espessura da camada através de um relógio comparador fixado à mesa elevadora.

### ***Comando da PC programando um número de passos fixos***

Visando determinar o número de passos do motor necessários para deslocar a PC a uma espessura de 200  $\mu\text{m}$ , foram executados 10 sequências contínuas de 100 passos, obtendo uma média de  $0,442 \pm 0,014$  mm, ou que representa uma média de 45,25 passos para cada 200  $\mu\text{m}$  de deslocamento da PC. Esse cálculo presume que o deslocamento da mesa elevadora é proporcional ao número de passos fornecido ao motor.

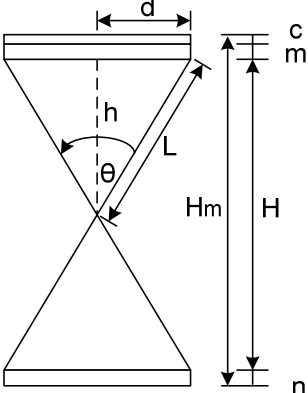
Testes posteriores evidenciaram a não proporcionalidade do deslocamento translativo vertical da mesa elevadora em relação ao deslocamento rotativo de seu parafuso, em toda a sua faixa permitida, como observado na curva da figura 4.32. Na mesma curva foi indicada o deslocamento do parafuso e a altura da mesa elevadora quando a PC encontra-se à distância focal de 246 mm.



**Figura 4.32 - Curva de deslocamento da mesa elevadora em relação ao deslocamento do parafuso**

Com o intuito de avaliar a curva experimental obtida na figura 4.32, foi determinada a equação matemática da curva, cujo esquema e resultados são apresentados na tabela 4.22. A curva teórica evidenciou o comportamento não linear entre a altura da mesa elevadora e o deslocamento de seu parafuso e portanto a relação não linear entre o número dos passos comandados pelo *software* Alpha.

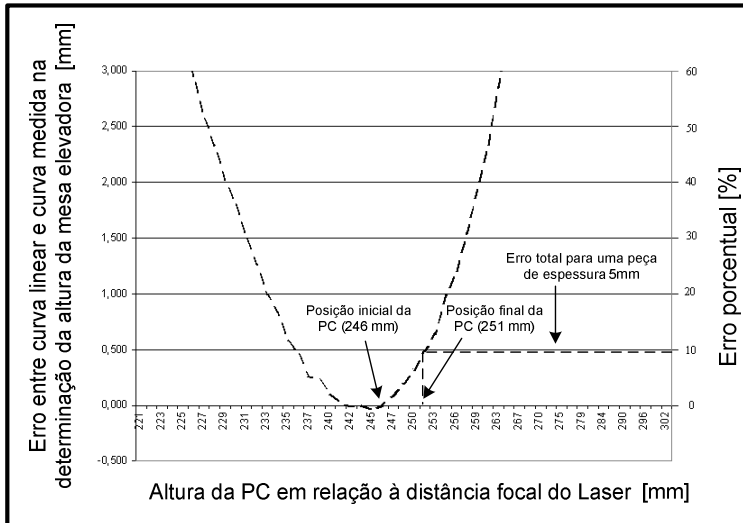
**Tabela 4.22 – Cálculo da altura da mesa elevadora em função do deslocamento do parafuso**

Equação do deslocamento da mesa elevadora	Diagrama da mesa elevadora
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"><math>H_m = H + m + n + c</math></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-right: 20px;"><math>H = 2 \cdot L \cdot \text{Cos}(\text{ArcSen}(d/L))</math></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"><math>d = p \cdot v</math></div> <p> <math>H_m</math> = Altura da mesa elevadora  <math>d</math> = Distância da metade do parafuso  <math>L</math> = Braço meio da mesa elevadora  <math>\Theta</math> = Ângulo formado pelos braços da mesa  <math>m</math> = Distância do eixo de rotação à superfície da mesa elevadora  <math>n</math> = Distância do eixo de rotação ao chão  <math>c</math> = Espessura chapa de aço  <math>p</math> = Passo do parafuso  <math>v</math> = Número de voltas do parafuso  <math>= 1v = 288</math> passos do motor         </p>	 <p> <math>L = 80,00 \text{ mm}</math>    <math>m = 9,75 \text{ mm}</math>  <math>n = 2,00 \text{ mm}</math>    <math>n = 9,75 \text{ mm}</math>  <math>p = 1,25 \text{ mm}</math> </p>

Com o intuito de avaliar o erro de desconsiderar a não linearidade no deslocamento da mesa elevadora, foi realizado o gráfico do erro relacionado a curva linear do deslocamento da mesa elevadora (considerando passos de 45) e a curva obtida experimentalmente, o que é observada na figura 4.33.

Foi evidenciado que o erro na espessura da peça final depende da posição inicial em que se encontra a mesa elevadora e do número de passos constantes fornecidos no *software* Alpha. A altura inicial da mesa elevadora dependerá da altura da PF, cuja superfície superior deve estar à distância focal de 246 mm, segundo foi ilustrado na figura 4.31. Variações na regulagem da distância focal podem gerar variação na espessura da peça final para um mesmo valor de passos fornecidos ao motor de passo.





**Figura 4.33 - Erro entre a curva linear e a curva da altura da mesa elevadora medida em relação à distância da lente focal**

Na figura 4.33 observa-se que para uma peça com espessura final desejada de 5 mm, fabricada a partir de 25 camadas de 200  $\mu\text{m}$ , gerando 45 passos para o deslocamento de PC por camada, o erro será de 9,6%. A determinação desse erro considera que a distância inicial entre a PC e a lente focal está em 246 mm, e sua distância final é de 251 mm.

### ***Comando da PC por monitoramento da espessura da camada***

Visando determinar a influência da temperatura interna na indicação do relógio comparador, foram realizados os seguintes testes: (i) variação da indicação no relógio comparador por variação da temperatura no interior da câmara; e (ii) variação da indicação no relógio comparador, em diferentes pontos de contato com o perfil de alumínio, devido à deformação do perfil por aquecimento.

No teste (i) o relógio comparador foi ajustado para indicar um deslocamento de 7,93 mm da PC (79,3% de seu indicação máxima) e a temperatura do controlador ajustada a uma temperatura de 130°C. Nessas condições a temperatura no corpo do relógio não superou os 50°C e o relógio comparador evidenciou uma variação máxima de 0,08 mm, que representa uma variação de quase 1%. No teste (ii) o relógio comparador foi localizado em 3 diferentes pontos do perfil de alumínio e o controlador de temperatura ajustado a uma temperatura de 130°C,

entanto a temperatura sobre a PC não superava os 140°C devido as lâmpadas IR. Nessas condições a temperatura no corpo do relógio não superou os 50°C e não foram observadas mudanças significativas na indicação do relógio comparador.

Baseado nos testes realizados, conclui-se que sob as condições apresentadas, a temperatura no interior da câmara no afeta significativamente na indicação do relógio comparador nem a rigidez do perfil de alumínio.

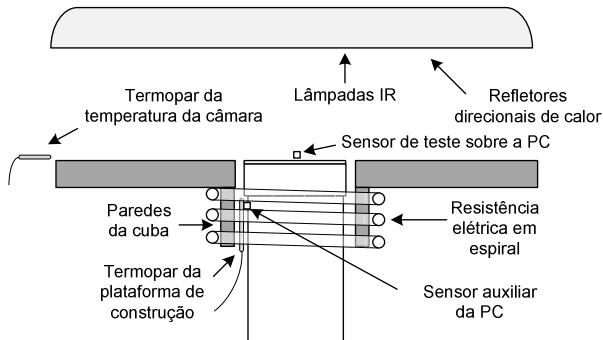
Conclui-se que o erro dimensional no eixo Z é devido exclusivamente ao procedimento utilizado para gerar a espessura de todas as camadas de pó, comandando passos fixos através do *software* Alpha. Esse erro pode ser reduzido através do monitoramento da espessura de cada camada. Entre as causas que dificultam esse monitoramento encontram-se a falta de iluminação adequada no interior da câmara, a distância entre o relógio comparador e o operador, a dificuldade na leitura da espessura devido à vibração da agulha indicadora causada pelo motor passo a passo, e por acreditar na linearidade entre o número de passos e o deslocamento da PC.

- Parâmetro: Temperatura da plataforma

A temperatura da plataforma refere-se à temperatura da PC, visando aquecer o material depositado.

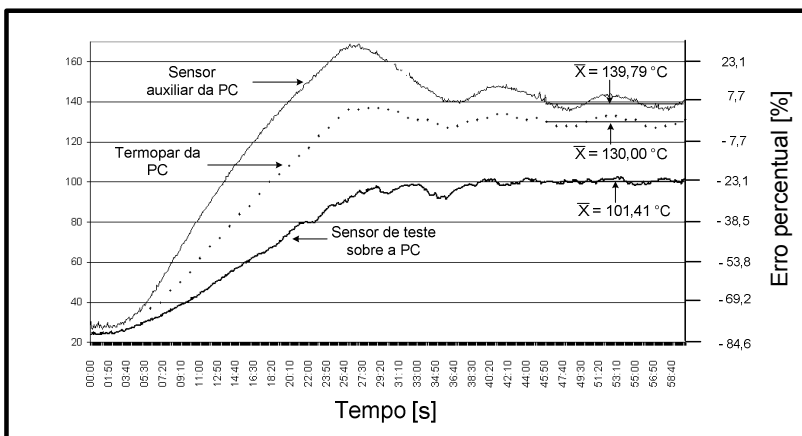
Inicialmente o aquecimento da PC era realizado por meio de uma resistência elétrica localizada sob a chapa de aço (atualmente removida) e pelo aquecimento da PF, realizado por meio de uma segunda resistência elétrica, em forma de espiral quadrado, localizada sob a PF, visando manter aquecida toda a PF e o material sob a camada a ser sinterizada. Ambas resistências eram energizadas por um controlador de temperatura monitoradas através de um termopar posicionado logo abaixo da PC (DABBAS, 2006, p.48-51). Na figura 4.34 ilustra-se a localização da resistência elétrica em espiral e do sensor de temperatura da PC.

A temperatura da PC não é uma boa alternativa para ser utilizada como parâmetro de fabricação, já que depois de sucessivas camadas depositadas, a camada a ser processada fica cada vez mais afastada da PC, portanto o controle da temperatura da PC deixa de influenciar na temperatura da própria camada.



**Figura 4.34 – Localização dos sensores de temperatura no EP**

Com o intuito de avaliar a variação entre a temperatura indicada pelo termopar posicionado logo abaixo da PC e o “sensor de teste” localizado sobre a PC, foi elaborada a Carta de Controle da “Temperatura da plataforma de construção”. Para sua elaboração foi programada uma temperatura de 130 °C no controlador (em modo liga/desliga) e monitorada a temperatura do termopar da PC, a temperatura do “sensor de teste” sobre a PC e a temperatura de um sensor auxiliar localizado junto ao termopar da PC, durante 1 hora. A medição foi realizada a cada 5 s com o auxílio de uma placa de aquisição especialmente adaptada para este objetivo (ver o apêndice B8). As curvas resultantes são apresentadas na figura 4.35.



**Figura 4.35 – Curva da temperatura sobre a superfície da camada causada pela resistência elétrica**

Na figura 4.35 observa-se que a temperatura média no termopar da PC é 130 °C, enquanto que a temperatura média no sensor de teste foi de 101,41 °C, o que representa -22% em relação à temperatura selecionada. A principal causa dessa variação encontra-se na localização do sensor do controlador. Observa-se também que o sensor auxiliar da PC (sensor LM35) apresenta uma variação de quase 10 °C a mais que o termopar da PC, o que pode ser causado pelo tipo de capa de proteção, o comprimento e espessura da capa, o material, o tipo de junção, o contato direto à parede da cuba ou da chapa tubulada, e o tempo de resposta do sensor LM35. Foi observado que o EP não possui uma fixação adequada para o sensor da PC que garanta o contato fixo e sempre na mesma localização com as paredes da cuba ou com as paredes da chapa tubulada.

- *Parâmetro: Temperatura da câmara*

O parâmetro “Temperatura da câmara” refere-se à temperatura medida a 5 mm sobre o nível da PF e fora dela, que visa monitorar o aquecimento do material depositado, sendo realizado por meio de duas lâmpadas IR (DABBAS, 2006, p.50, 51). Segundo evidenciado na tarefa 1.3.6 o subprocesso de preaquecimento liga as lâmpadas IR depois da geração da camada e desligadas quando a temperatura da câmara atingir a temperatura especificada segundo o material a sinterizar.

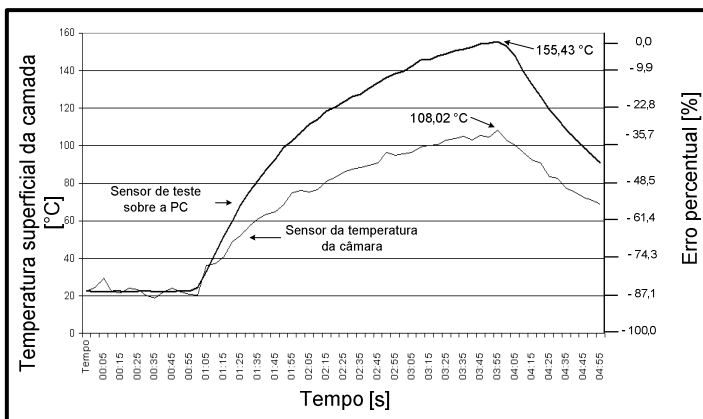
Em relação ao nome, à função e à localização do sensor que monitora o parâmetro de fabricação, observam-se algumas discordâncias descritas a seguir:

- Discordância entre o nome do parâmetro e a função que cumpre, já que se o objetivo do parâmetro é monitorar e controlar a temperatura de aquecimento da camada antes da sinterização, o parâmetro deveria ser nomeado “temperatura da camada de pó”.
- Discordância entre a função que o sensor cumpre e a localização do sensor, já que se a função do sensor é monitorar a temperatura da camada do pó, o sensor deveria estar próximo à superfície da camada, sobre a PC e nunca fora da PF, como acontece atualmente.
- Discordância no procedimento de preaquecimento da camada, ligando e desligando as lâmpadas IR antes da sinterização, já que dessa forma só é assegurada a temperatura inicial da camada antes da sinterização, mas não a temperatura da camada durante a própria sinterização, pela falta de um sistema de controle. Testes de aquecimento/resfriamento da camada causados pela ligamento/desligamento das lâmpadas IR evidenciaram taxas elevadas de aquecimento/resfriamento quando

comparado com as taxas de aquecimento/resfriamento da resistência elétrica (como evidenciado nas curvas das figuras 4.35 e 4.36).

Para obter a curva da “Temperatura da camada de pó” foi posicionado um “sensor de teste” sobre a PC e outro sensor na mesma localização que o termopar da temperatura da câmara, como ilustrado na figura 4.34. As lâmpadas IR permaneceram desligadas, no primeiro minuto, com o intuito de comparar os valores iniciais dos sensores, sendo ligadas no minuto 1 e desligadas no minuto 3. A taxa de aquisição foi de 5 s com o auxílio de uma placa de aquisição especialmente adaptada para este objetivo (ver o apêndice B8 para mais informações). As curvas resultantes são apresentadas na figura 4.36.

Na figura 4.36 observa-se que quando a temperatura do sensor da câmara atinge 108 °C, a temperatura sobre a superfície da camada atinge 155,43 °C. Considerando que a temperatura desejada é a temperatura da camada, o erro induzido pela localização do sensor fora da PF é de 30%. A taxa de aquecimento sobre a camada, na faixa dos 100 até 150 °C, foi determinada em 46,9 °C/min; enquanto a taxa de resfriamento, na mesma faixa, foi determinada em -71,09 °C/min.



**Figura 4.36 – Curva da temperatura sobre a camada de pó causada pelas lâmpadas IR**

#### - Outros parâmetros de fabricação não informados pelos usuários

Durante o desenvolvimento desta etapa, foram identificados outros parâmetros de fabricação geralmente não informados pelos pesquisadores que utilizaram o EP. Entre eles, encontram-se: (i) velocidade de deslocamento do depositador, (ii) taxa de aquecimento da

camada, (iii) taxa de resfriamento da camada durante e depois da sinterização, (iv) distância vertical e horizontal mínima entre dois spots consecutivos, (v) diâmetro do feixe do Laser, e (vi) modo de operação do Laser (contínuo, pulsado).

Visando quantificar cada um desses parâmetros foram estudadas folhas de dados, para os componentes comerciais, e desenvolvidos experimentos específicos, para os componentes não comerciais, descritos na tabela 4.23.

**Tabela 4.23 – Planejamento dos experimentos para outros parâmetros de fabricação**

<b>Parâmetro</b>	<b>Experimentos</b>
Velocidade de deslocamento do depositador	Determinação da velocidade de avanço e retrocesso do depositador, para diferentes condições de carga.
Taxa de aquecimento da camada	Medição do tempo de aquecimento da câmara de fabricação produto da ação das lâmpadas IR.
Taxa de resfriamento da camada	Medição do tempo de resfriamento da câmara de fabricação produto da ação das lâmpadas IR.
Espaçamento entre spots	Medição de 2 spots consecutivos no eixo X e no eixo Y.

A seguir são resumidos os resultados obtidos para os 6 parâmetros de fabricação:

- A “velocidade de deslocamento do depositador” é fixa, sendo sua velocidade de deposição e espalhamento (modo de avanço) de  $84,51 \pm 4,28$  mm/s, e a velocidade de nivelamento (modo de retrocesso) de  $85,68 \pm 1,16$  mm/s, determinado para 10 medições sob condições de repetitividade. As medições foram realizadas com o auxílio de uma placa de aquisição de dados, apresentado no apêndice B8. A medição foi realizada com o depositador vazio e carregado com um peso equivalente a uma carga completa, não apresentando variações significativas na sua velocidade.
- A “taxa de aquecimento da camada” depende da temperatura inicial no interior da câmara de fabricação, das condições de operação (com/sem utilização do soprador de pó da lente focal e do exaustor), das condições no interior da câmara (volume máximo de ar a ser aquecido, fugas de ar, entre outros), da fonte de calor utilizada (resistência elétrica, lâmpadas IR) e da temperatura do meio ambiente. Considerando o aquecimento causado pela resistência elétrica, com o exaustor e o soprador de ar desligados, foi determinada uma taxa de aquecimento da PC de  $5$  °C/min, com uma oscilação de  $\pm 3$  °C em torno a uma referência de  $130$  °C. Considerando o aquecimento

causado pelas lâmpadas IR, com o exaustor e o soprador de ar desligados, e a temperatura na superfície da camada atingindo os 175 °C, foi determinada uma taxa de aquecimento de 21,66 °C/min, na faixa de 150 até 175 °C.

- A “taxa de resfriamento da camada” depende da temperatura inicial atingida pela camada, depois de desligada a fonte de aquecimento, das condições de operação, das condições no interior da câmara e da temperatura do meio ambiente. Considerando o resfriamento causado pelo desligamento da resistência elétrica, com o exaustor e o soprador de ar desligados, foi determinada uma taxa de resfriamento de 1,43 °C/min. Considerando o resfriamento causado pelo desligamento da lâmpada IR, com o exaustor e o soprador de ar desligados, e a temperatura inicial de 175 °C, foi determinada uma taxa de resfriamento de 80 °C/min, na faixa de 175 até 150 °C.
- A “distância entre spots consecutivos” não foi medida devida à falta de referências dimensionais no microscópio disponibilizado, mas foi determinada analiticamente, baseada na resolução máxima utilizada pelo *software* Alpha. O número de pixels horizontal (eixo x) máximo a serem gravados é de 488, que grava uma linha de largura de 98,1 mm enquanto que o número de pixels vertical (eixo y) máximo é de 496 mm, que grava uma linha de comprimento de 98,1 mm. Dessa forma determina-se a distância entre os centros de dois spots consecutivos a seguir:

$$\text{Distância horizontal} : \frac{98,20[\text{mm}]}{488[\text{pixels}]} = 0,201 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{pixels}} \right]$$

$$\text{Distancia vertical} : \frac{98,20[\text{mm}]}{496[\text{pixels}]} = 0,198 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{pixels}} \right]$$

- O “diâmetro do feixe de Laser” teórico é fornecido no manual do cabeçote de marcação (SYNRAD, 1996). A lente focal registra um tamanho de campo de 112 mm, que corresponde a um tamanho de spot de 250 μm (baseado no modelo de distribuição gaussiana 1/e<sup>2</sup>). O diâmetro do feixe também pode ser determinado experimentalmente para um material especificado, utilizando o procedimento descrito em Dabbas (2006, p.96).
- O “modo de operação do Laser” utilizado no EP pode ser contínuo (CW-Continuous Wave) ou pulsado. No modo contínuo, o controlador UC-1000 gera um sinal de PWM a 100%, sem opção de variar a sua potência. Para operar em modo contínuo, variando a potência, é requerido comandar o Laser em frequências superiores a 20 KHZ (SYNRAD, 2002, p.14, 35). O *software* Alpha encontra-se

programado somente para operar em modo pulsante, já que é a única forma de variar a potência utilizando o controlador UC-1000.

Finalmente a Estratégia de Varredura do Feixe do Laser (EVFL) não foi assinalado como um parâmetro de fabricação propriamente dito, contudo, pode influir nas características finais da peça fabricada.

Subtarefa 3.4.2.3: Determinar os parâmetros de fabricação requeridos pelo processo

Como mencionado na seção 3.4.4, os parâmetros de fabricação correspondem aos parâmetros necessários para uma especificação completa e reproduzível na fabricação de um objeto. Segundo o apresentado na seção 2.1.3.1, autores têm descrito alguns dos parâmetros do processo de SLS, considerados por eles, os mais importantes ou influentes. Por outro lado, segundo o princípio de funcionamento (ver o apêndice C1), o EP é um equipamento de marcação a Laser sendo utilizado para a sinterização seletiva de uma camada de pó, adaptado para fabricar peças com FGM. Portanto o processo de fabricação no EP apresenta alguns parâmetros comuns aos equipamentos de SLS e alguns parâmetros de processo comuns a equipamentos de marcação.

Com o intuito de identificar a maior quantidade de parâmetros de fabricação específicos aplicáveis ao EP, foi elaborada uma tabela resumo com parâmetros de fabricação, divididos em parâmetros de máquina, de material e de processo, baseado na descrição dos produtos internos e na identificação dos subprocessos obtidos na etapa 1, nas conclusões obtidas na etapa 2 da metodologia, e de bibliografia específica no tema, cujos resultados são apresentados na tabela 4.24.

#### **4.3.5 Passo 3.5 - Proposição de soluções para reduzir ou eliminar as causas da variabilidade**

Tarefa 3.5.1: Propor soluções para as causas de cada fonte de variabilidade

A redução da variabilidade causada pela matéria-prima dependerá de: (i) um adequado pré-processamento da matéria-prima ou mistura (ex. redução da umidade inicial, preaquecimento da matéria-prima), (ii) uma homogeneização no tamanho do grão de pó, por meio de peneiras e análise granulométrica, e (iii) uma homogeneização do grau de compactação, junto com a eliminação de grânulos existentes (por meio de mistura mecânica), sendo a redução dessa variabilidade de



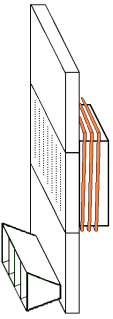
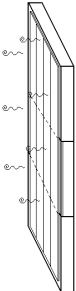

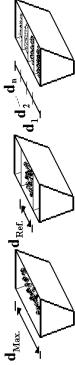

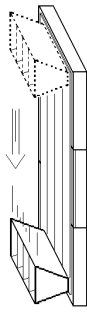
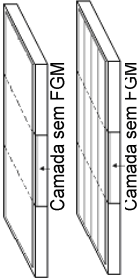
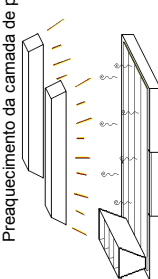
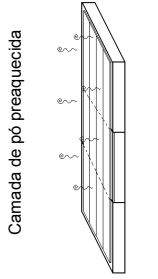
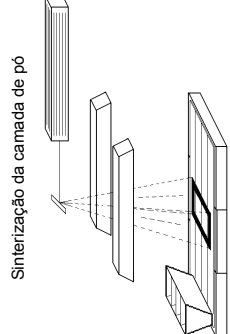


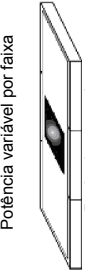

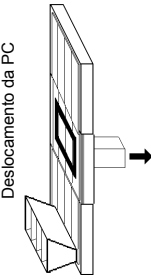


SUBPROCESSOS	PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO		PRODUTO INTERNO
<p>Ilustração</p>  <p>Aquecimento da PC e da PF</p>	<p>Parâmetro de máquina</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura abaixo da PC</li> </ul>	<p>Parâmetros de material e de processo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura da camada de pó</li> </ul>	<p>Ilustração</p>  <p>Camada de pó aquecida</p>
<p>Carregamento do pó</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso da matéria-prima ou nível do pó no depositador</li> <li>• Largura do depositador</li> <li>• Separação entre divisores</li> <li>• Número de materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matéria-prima</li> <li>• Granulometria do pó</li> <li>• Geometria das partículas<sup>1</sup></li> <li>• Temperatura inicial</li> <li>• Umidade inicial</li> <li>• Densidade da partícula<sup>1</sup></li> <li>• Homogeneidade</li> <li>• Força de adesão entre partículas<sup>1</sup></li> </ul>	<p>Depositador carregado</p>  <p>Diagrama mostrando o depositador com camadas de pó de espessuras <math>d_{1max}</math>, <math>d_{1min}</math>, <math>d_{2max}</math>, <math>d_{2min}</math> e <math>d_{part}</math>.</p>
<p>Deslocamento do depositador, espalhamento e deposição do pó</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade do deslocamento do depositador em avanço</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluidez do pó<sup>1</sup></li> <li>• Geometria da partícula</li> </ul>	
<p>Deslocamento do depositador e nivelamento da camada de pó</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade do deslocamento do depositador em retrocesso</li> <li>• Altura da base do depositador em relação a PF</li> <li>• Diferença de altura entre as régulas de espalhamento e nivelamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espessura da camada</li> <li>• Largura de cada faixa de pó</li> <li>• Acabamento superficial da camada depositada</li> <li>• Grau de compactação da camada</li> </ul>	 <p>Camada sem FGM</p> <p>Camada sem F-GM</p>

Tabela 4.24 - Parâmetros de máquina e de processo aplicáveis ao EP (continua)

SUBPROCESSO	PARÂMETROS DE MÁQUINA	PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO de processo	PRODUTO INTERNO
<p>Ilustração</p> <p>Preaquecimento da camada de pó</p> 	<p>Parâmetro de máquina</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potência das lâmpadas IR da camada</li> <li>• Distância das lâmpadas IR da camada</li> <li>• Velocidade de aquecimento</li> </ul>	<p>Parâmetros de material e de processo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura da superfície da camada de pó</li> <li>• Temperatura de transição vítrea do material<sup>2</sup></li> <li>• Temperatura de fusão do material<sup>2</sup></li> <li>• Condutividade térmica do material<sup>2</sup></li> </ul>	<p>Ilustração</p> <p>Camada de pó preaquecida</p> 
<p>Sinterização da camada de pó</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de gravação</li> <li>• Velocidade de deslocamento dos espelhos</li> <li>• Tempo de resposta do cabeçote de marcação</li> <li>• Temperatura do Laser</li> <li>• Temperatura de refrigeração do Laser</li> <li>• Fluxo da água para a refrigeração</li> <li>• Distância de trabalho do Laser</li> <li>• Ângulo da lente focal</li> <li>• Frequência do controlador do Laser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potência do feixe do Laser</li> <li>• Tempo de exposição do feixe do Laser em cada spot</li> <li>• Diâmetro efetivo do feixe do Laser</li> <li>• Densidade do material<sup>1</sup></li> <li>• Temperatura durante a sinterização da camada</li> <li>• Distância mínima vertical e horizontal entre spots</li> <li>• Distância de penetração do feixe do Laser na camada</li> <li>• Grau de contração da camada sinterizada</li> <li>• Granulometria do pó</li> </ul>	<p>Camada de pó sinterizada com</p>  <p>Potência fixa</p>  <p>Potência variável por faixa</p>  <p>Potência segunda a cor</p> 
<p>Deslocamento da PC</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fator mm/ passo do motor</li> <li>• Velocidade de deslocamento da PC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espessura da camada</li> </ul>	<p>Camada deslocada para abaixo</p>  <p>Camada deslocada para cima</p> 

**Tabela 4.24 - Parâmetros de máquina e de processo aplicáveis ao EP (conclusão)**

Fonte: Elaborado a partir da revisão bibliográfica e das conclusões obtidas na etapa 2 da metodologia

(1) Linoya, Gotoh e Higashitani(1991) (2) Gibson e Shi (1997)

responsabilidade do usuário.

A variabilidade causada pelo processo de fabricação pode ser reduzida pela implementação das propostas de solução surgidas da análise das causas de variabilidade para o EP, que são apresentadas na tabela 4.25.

A variabilidade causada pelo método/procedimento pode ser reduzida pela padronização e proposta de métodos/procedimentos completos, adequados e atualizados permanentemente, que deverão ser seguidos pelos usuários, como o gerado no apêndice B2 e os gerados no “Procedimento Operacional Padrão” (POP), a partir do conhecimento adquirido e que forma parte do REP. A listagem dos procedimentos desenvolvidos encontra-se na tabela 4.26.

A redução da variabilidade causada pelo usuário requer uma capacitação formal, de disponibilidade de informação dos componentes do EP e dos procedimentos específicos de fabricação e de manutenção.

A variabilidade causada pelo meio ambiente pode ser reduzida através do controle ambiental e monitoramento da sala em que o equipamento se encontra.

#### Tarefa 3.5.2: Propor soluções para as causas de variabilidade dos parâmetros de fabricação

##### - Parâmetro: Potência do feixe do Laser

O desvio no valor da potência fornecida pelo *software* Alpha pode ser reduzido através das seguintes propostas: (i) eliminação da equação 4.1 no algoritmo de geração da potência, (ii) utilização da equação matemática da potência do Laser, em função do sinal PWM, no algoritmo de gravação, (iii) monitoramento periódico da potência máxima do Laser, (iv) obtenção periódica da curva de calibração do Laser para considerar a perda de potência do Laser de CO<sub>2</sub> no interior do Laser, e (v) desenvolvimento dos procedimentos para obtenção da curva de calibração do Laser e para a medição da potência máxima fornecida pelo Laser.

Uma solução definitiva poderia incluir o uso de um sensor de potência contínua e um algoritmo de auto calibragem.

##### - Parâmetro: Velocidade de varredura do feixe do Laser

Segundo evidenciado na análise da VVFL na tarefa 3.5.1, o conceito de “Velocidade de varredura do feixe do Laser” não é aplicável ao EP, sendo o parâmetro utilizado neste tipo de equipamento de marcação o “Tempo de exposição ao feixe do Laser”.

**Tabela 4.25 – Proposta de soluções às causas raízes de variabilidade (continua)**

Proposta de soluções às causas raízes de variabilidade		
Causas raízes	Propostas de solução	
Carregamento de pó no depositador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzido espaço fora da câmara de fabricação que limita a movimentação do operador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornecer um espaço maior, enfrente das portas da câmara, para uma adequada movimentação do operador durante o carregamento</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área reduzida para o carregamento do depositador no interior da câmara de fabricação</li> <li>• Limitação visual ao interior do depositador durante o carregamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzir o comprimento dos refletores direcionais das lâmpadas IR limitando-as à superfície da PC</li> <li>• Eliminação do suporte da polia não utilizada</li> <li>• Modificar o suporte e a posição da polia para permitir uma melhor visão da superfície do depositador</li> <li>• Projetar um sistema para carregamento do pó a distância</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exposição do operador ao ar quente proveniente do interior da câmara</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projetar uma porta pequena para manipular somente a mão (com luva) no interior da câmara.</li> <li>• Projetar janelas nas portas para monitorar o carregamento</li> <li>• Projetar um sistema para carregamento a distância</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de espalhamento uniforme da superfície do pó depositado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar uma espátula plana com dimensões adequadas</li> <li>• Instalação de um espelho para observar o interior do depositador</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade na quantidade de pó carregado no interior do depositador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar um dosificador</li> <li>• Padronizar o procedimento de carregamento do pó</li> </ul>
Deslocamento do depositador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folga entre o mecanismo de deposição e a sua base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução dos parafusos de nivelamento da PF a 50 mm e aumento da base do mecanismo de deposição</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folgas entre os suportes das guias lineares e suas bases de apoio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Repor os 4 parafusos faltantes no depositador, evitando ter que regular demais a altura das guias lineares</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folgas entre as guias lineares e as buchas de bronze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar o diâmetro das guias lineares a um diâmetro próximo ao diâmetro interior das buchas</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folgas entre a polia e o eixo do motor DC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fazer ou adaptar uma nova polia ao eixo do motor DC</li> <li>• Reduzir a espessura da polia</li> <li>• Fixar a nova polia ao eixo do motor, por meio de um parafuso</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atrito entre as guias lineares e as buchas de bronze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitorar periodicamente as guias lineares visando eliminar resíduos de pó grudado e ferrugem</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folga entre a polia e o eixo do motor DC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fazer ou adaptar uma nova polia ao eixo do motor DC</li> <li>• Reduzir a espessura da polia</li> <li>• Fixar a nova polia ao eixo do motor, por meio de um parafuso</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade na aplicação da força no depositador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modificar o projeto mecânico do depositador para: (i) aplicar a força em ambos extremos do depositador, (ii) substituir o cabo de aço e a volta dupla, (iii) eliminar a folga entre a polia e o eixo do motor DC, (iv) permitir a substituição da polia menor, (v) evitar a influência da temperatura no mecanismo de transmissão, (vi) evitar a acumulação de pó entre as paredes laterais do depositador e as régua, depositando, espalhando e nivelando em modo de avanço e elevando o depositador ou descendo a PC, em modo de retrocesso</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade na regulagem da altura do depositador</li> <li>• Eixos centrais das buchas no depositador não concêntricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modificar o projeto mecânico do depositador para um ajuste fino das régua e uma diminuição do número de partes</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riscos ou rachaduras na camada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpeza no interior do depositador e na superfície da PF visando <u>eliminar pó grudado e sujeira</u></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aglomeração do pó no depositador/ subdivisor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Misturar mecanicamente o pó antes da fabricação</li> <li>• Propor um procedimento para reduzir a umidade inicial do pó</li> <li>• Evitar o uso de pós com formas de partículas que limitem a capacidade de escorregamento pelo depositador</li> </ul>

**Tabela 4.25 – Proposta de soluções às causas raízes de variabilidade (continuação)**

<b>Proposta de soluções às causas raízes de variabilidade</b>		
<b>Causas raízes</b>	<b>Propostas de solução</b>	
Geração da camada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deslocamento irregular da régua de nivelamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ver propostas de soluções para o subprocesso de deslocamento do depositador</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitação visual ao interior do depositador durante o carregamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eliminação do suporte da polia não utilizada</li> <li>Modificar o suporte da polia para permitir uma melhor visão da superfície do depositador</li> <li>Projetar um sistema para carregamento a distância</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formação de uma segunda camada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depositar, espalhar e nivelar em modo de avanço, e elevar o depositador ou descer a PC, em modo de retrocesso</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desnivelamento do depositador e das régua em relação à PF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir procedimentos de nivelamento do depositador</li> <li>Modificar o projeto mecânico para fornecer regulagem fino das régua</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deslocamento irregular da régua de espalhamento e nivelamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ver propostas de soluções para o subprocesso de deslocamento do depositador</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variação na pressão sobre a camada final de pó</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar ferramentas adequadas para a dosagem e espalhamento do pó no depositador</li> <li>Reduzir a diferença de alturas entre as régua</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilidade nas linhas divisórias entre distintas misturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzir a vibração do depositador durante a deposição (ver propostas de soluções para o subprocesso de deslocamento do depositador)</li> <li>Reduzir a altura entre a base do depositador e a PF</li> <li>Ajustar a base do depositador e do componente divisor</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilidade na distância de separação entre linhas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substituir o atual componente divisor (por deformação) e garantir a distância de separação dos sucos dos divisores</li> <li>Utilizar outros materiais, no componente divisor, para trabalhar as temperaturas usadas no EP</li> <li>Reduzir a espessura dos divisores</li> <li>Eliminar as folgas entre o divisor e o componente divisor</li> <li>Padronizar os divisores de pó</li> </ul>
Aquecimento da camada de pó	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilidade na distribuição de radiação sobre a camada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substituir os atuais refletores direcionais em formato circular por refletores parabólicos</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilidade da temperatura nas bordas internas da PF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substituir os atuais refletores direcionais em formato circular por refletores parabólicos</li> <li>Modificar a resistência elétrica em espiral para que cada espiral esteja a uma mesma distância com a PF e com as paredes da cuba</li> <li>Reduzir a oscilação da resistência elétrica na PF aumentando a graduação do controlador e melhorando o controle sobre a temperatura (controle PID)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oscilação da temperatura na PC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzir a oscilação da resistência elétrica na PF aumentando a graduação do controlador e melhorando o controle sobre a temperatura (controle PID)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilidade na temperatura interna da câmara</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzir a oscilação da temperatura na PC</li> <li>Eliminar as fugas de calor: (i) fechando o orifício de entrada de cabos elétricos, (ii) filtrando o ar de saída do exaustor, (iii) fechando hermeticamente a janela e as portas, e (iv) ré circulando o ar para sopro da lente e extração da fumaça. Observação: O fechamento da câmara pode gerar elevação da temperatura interior, danificando componentes que não operam a essas temperaturas</li> <li>Manter um controle da temperatura e umidade ambiental</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminuição rápida da temperatura sobre a camada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Implementar um controle das lâmpadas IR durante a sinterização da camada</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Abertura das portas para o carregamento do depositador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projeto de redução da porta para carregamento e janela no lado da porta</li> <li>Projeto mecânico de um sistema para carregamento no depositador ou carregamento a distância</li> </ul>	

**Tabela 4.25 – Proposta de soluções às causas raízes de variabilidade (conclusão)**

<b>Proposta de soluções as causas raízes de variabilidade</b>		
<b>Causas raízes</b>	<b>Propostas de solução</b>	
Sinterização da camada de pó	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade do diâmetro do feixe do Laser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajustar a distância de trabalho (distância da lente e a PF) a 246 mm, segundo informado na própria lente focal.</li> <li>• Determinar o diâmetro do feixe para o material, o tempo de exposição e a potencia fornecida</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade no tempo de exposição do feixe do Laser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto eletrônico de placa com microprocessador para o comando do tempo de exposição do feixe sobre o spot e comunicação com o software Alpha</li> <li>• Implementar o comando liga/desliga via controle "gate" no UC-1000</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases entre a lente focal e a camada de pó</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto mecânico para soprar e aspirar a fumaça da lente focal e aspirar o pó através da recirculação do ar quente no interior da câmara durante a sinterização</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade na temperatura do corpo do Laser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilização de refrigeração externa, na faixa de 18 até 20 °C durante toda a fabricação</li> <li>• Controle da temperatura ambiente</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade no posicionamento do feixe do Laser sobre a camada de pó</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar a resolução da placa digital/analógica para 16bits</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade no dimensionamento do desenho 2D sinterizado sobre a camada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixar a PC sobre a chapa de aço, por meio de dois pinos, durante a fabricação, evitando o seu deslocamento</li> <li>• Não utilizar acessórios para nivelamento da PC. Propor um procedimento de nivelamento da PC baseado no nivelamento da chapa de aço em relação à lente focal</li> <li>• Reduzir as folgas e as vibrações na PF e na PC</li> <li>• Utilizar o procedimento para pré-processamento do desenho 2D desenvolvido como resultado da etapa 2 da metodologia</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade na espessura da camada sinterizada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar uma equação de comparação para cada material utilizado</li> </ul>	
Deslocamento da PC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade na leitura no relógio comparador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substituir o relógio comparador atual por um instrumento digital, com painel de indicação fora da câmara de construção</li> <li>• Projeto eletrônico de controle da espessura da camada</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade no deslocamento da mesa elevadora</li> </ul>	<p>Opção 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deslocar a mesa elevadora à espessura alvo desejada, baseado na leitura direta do relógio comparador para cada camada e não no fornecimento de passos fixos</li> </ul> <p>Opção 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerar a não linearidade no deslocamento da mesa elevadora no cálculo do fator mm/passos</li> <li>• Projeto do software para o cálculo do número de passos em função da espessura desejada e da distância focal</li> <li>• Substituição da engrenagem do eixo do parafuso</li> <li>• Projeto mecânico para reduzir o peso da chapa de aço e a chapa tubulada, ou projeto elétrico para substituição do atual motor de passo para um motor de maior torque</li> <li>• Proposta de uma base de suporte do motor mais estável</li> <li>• Projeto mecânico para uma guia de deslizamento da chapa de aço no interior da cuba</li> <li>• Manutenção periódica visando eliminar o pó grudado nas paredes interiores</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deslocamento da PC em relação à chapa de aço (eixo z)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver um procedimento de nivelção da PC baseado no nivelamento da chapa de aço em relação à lente focal, sem o uso de acessórios de nivelamento</li> <li>• Redução/eliminação da vibração no sistema de deposição</li> <li>• Fixação temporal da PC à chapa de aço por meio de pinos</li> <li>• Limpeza periódica da superfície da chapa de aço</li> <li>• Manter em boas condições a PC, livre de curvatura ou deformações ou amassamentos nos cantos</li> </ul>

**Tabela 4.26 – Listagem dos procedimentos desenvolvidos para o EP**

Código	Título Procedimento
P-001	Procedimento geral de fabricação de peças no equipamento de SLS
P-Fab-01	Procedimento de pré-processamento do modelo digital
P-Fab-02	Procedimento de revisão do equipamento de SLS
P-Fab-03	Procedimento de preparação do equipamento SLS
P-Fab-04	Procedimento de fabricação de peças poliméricas
P-Fab-05	Procedimento de desligamento do equipamento SLS

As propostas, visando implementar o parâmetro TEFL, são: (i) substituir a barra de “velocidade” por “tempo de exposição”, (ii) implementar uma placa eletrônica, baseado em um microprocessador, para comandar o TEFL à camada de pó, e (iii) monitorar o TEFL através de uma placa de aquisição de dados.

Por outro lado, pode-se fornecer o valor de velocidade de marcação, gravação ou de sinterização no módulo “sinterização a laser”, com a devida rotulagem.

*- Parâmetro: Espessura da camada*

Segundo evidenciado na análise da espessura da camada, na tarefa 3.5.1, no EP existem duas formas de comandar a altura da PC: (i) fornecendo um número de passos fixos, e (ii) monitorando o relógio comparador fixado à mesa elevadora.

Com o intuito de reduzir os desvios no deslocamento vertical da PC pelo fornecimento da relação passos/mm, propõe-se: (i) gerar um algoritmo que determine o número de passos a serem deslocados, a partir do valor de espessura alvo informado pelo usuário, baseado na não linearidade da mesa elevadora e a distância de trabalho do Laser; (ii) implementar um sistema de controle da espessura da camada.

Com o intuito de reduzir os desvios no deslocamento da PC monitorando somente o relógio comparador, propõe-se substituir o relógio comparador analógico por um digital, com display fora da câmara de fabricação.

*- Parâmetro: Temperatura da plataforma e da câmara*

Em relação aos parâmetros de temperatura da câmara e a temperatura de aquecimento, foi evidenciado que ambas possuem o mesmo objetivo: “aquecer o material depositado”, constituindo o primeiro um parâmetro de máquina e o segundo um parâmetro de processo (“temperatura da superfície da camada”). Uma discussão em relação a esses parâmetros é apresentada na seção 5.2.1 do capítulo 5.

#### 4.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi descrito detalhadamente a aplicação das 3 etapas que constituem a metodologia descrita no capítulo 3, para a análise da variabilidade no processo de fabricação de peças no equipamento-protótipo de SLS.

A etapa 1 permitiu coletar informação dos componentes comerciais e não comerciais do equipamento além de gerar informações do equipamento em seu conjunto (diagramas funcionais, diagrama de conexões elétricas e de comunicação, fluxograma de informação de dados, leiaute das placas eletrônicas, entre outras).

A etapa 2 permitiu analisar metodicamente e sistematicamente cada um dos problemas compilados em dissertações e teses que utilizaram o equipamento e em entrevistas a usuários experientes no uso do mesmo.

A etapa 3 permitiu identificar e determinar as causas da variabilidade no processo de fabricação de peças com/sem FGM no equipamento de SLS e as causas de variabilidade nos 5 parâmetros de fabricação utilizados pelo mesmo.

No seguinte capítulo serão descritos os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita neste capítulo fornecendo propostas de solução para redução ou eliminação tanto das causas dos problemas analisados quanto das causas da variabilidade no processo de fabricação de peças com/sem FGM. Serão discutidos também aspectos relativos aos parâmetros de fabricação e melhorias do EP



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Resultados

A seguir são apresentados os resultados da análise obtidos da aplicação da metodologia apresentada no capítulo 4.

#### 5.1.1 Resultados da análise dos problemas por subprocesso

A seguir são apresentados os resultados da aplicação da MAMP, descrita na etapa 2 do capítulo 4.

##### 5.1.1.1 Subprocesso de carregamento de pó

A análise dos problemas deste subprocesso, desenvolvida nos passos 2.3 a 2.13 da etapa 2 (capítulo 4), permitiu obter os seguintes resultados:

- Entre as dificuldades para o carregamento do pó encontram-se: (i) o limitado espaço no interior da câmara para a manipulação do material, (ii) o aquecimento dos elementos ao redor da área para carregamento do pó tais como PF, guia linear e refletores direcionais de calor (no caso de utilizar aquecimento), conforme foi ilustrado na figura 4.20, (iii) o reduzido espaço externo à câmara de fabricação para a movimentação do operador; (iv) o ar quente, o pó em suspensão e os gases gerados pelo processo; (v) o bloqueio visual do depositador causada pelo suporte da polia não utilizada; e (vi) o tipo de ferramenta utilizada para o próprio carregamento.
- Um risco para a segurança do operador durante o carregamento do depositador, além dos descritos nos parágrafos anteriores, consiste na possibilidade de eletrocussão do usuário pela energização dos refletores direcionais, o que pode acontecer mesmo que as lâmpadas IR não estejam acessas, devido à conexão entre um borne da lâmpada e o refletor destinado a mantê-las penduradas, estando esse último conectado à fase. Esta situação foi logo eliminada com a realização de um novo suporte para cada lâmpada IR e com a normalização da tomada, respeitando a polaridade da rede.

As propostas de soluções para cada problema analisado neste subprocesso foram divididas em propostas de melhoria para reduzir e em propostas de melhoria para eliminar esses problemas, que são apresentadas na tabela 5.1.

No presente trabalho foram consideradas como propostas de melhoria para **redução** de problemas, aquelas com foco no projeto mecânico, eletrônico ou computacional do equipamento, ou de sua própria concepção, permitindo reduzir ou minimizar os efeitos não

desejados, sendo essas soluções caracterizadas pelo baixo custo e o reduzido tempo requeridos para sua implementação. Cada proposta pode ser realizada de forma independente sem alterar significativamente o atual funcionamento do equipamento. Da mesma forma foram consideradas como propostas de melhoria para **eliminação** de problemas, as soluções com foco na correção do projeto mecânico, eletrônico ou computacional, ou na própria concepção que deu origem ao equipamento, correspondendo principalmente a soluções do tipo projeto de reforma (remanufacturing), projeto de modernização (retrofitting) ou projeto novo, as que considerem como requisitos do projeto as conclusões obtidas durante a fase de análise.

**Tabela 5.1 – Propostas de melhoria para o subprocesso de carregamento do pó**

Propostas de melhoria	Descrição
Propostas de melhoria para redução dos problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzir o comprimento das lâmpadas IR e dos refletores direcionais de calor as dimensões da PC, mantendo o valor atual da potência nominal.</li> <li>• Modificar as portas de abertura da câmara para incluir um vidro na altura da PF e uma janela para carregamento no depositador.</li> <li>• Carregar o pó com uma colher dosificadora com bico menor que 5 mm de diâmetro.</li> <li>• Carregar o pó através de uma tubulação metálica para depositar o pó de fora da câmara de fabricação, utilizando a força de gravidade e vibração manual, sem requerer abrir as portas.</li> <li>• Permitir um maior espaço externo na frente das portas da câmara de fabricação para o deslocamento do operador durante o processo de carregamento</li> </ul>
Propostas de melhorias para eliminação dos problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto novo de um mecanismo de carregamento e nivelamento do pó no interior do depositador ou componente divisor para gerar FGM, que inclua um silo de armazenamento de matéria-prima. O mecanismo deverá permitir a dosagem do material carregado.</li> <li>• Projeto novo visando fabricar uma câmara de aquecimento na qual todos os componentes que não precisem aquecimento estejam fora dessa câmara.</li> </ul>

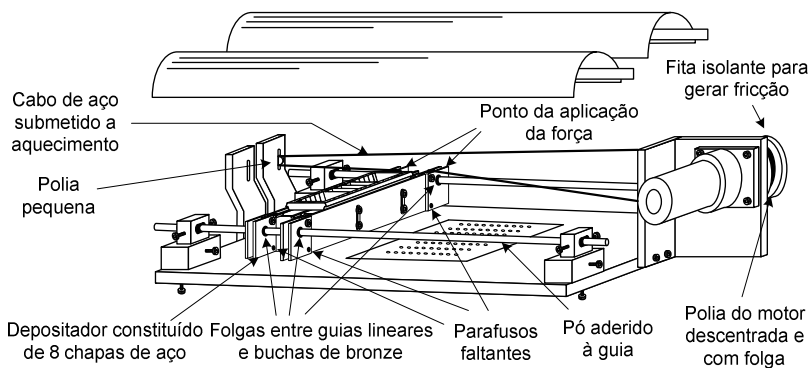
#### 5.1.1.2 Subprocesso de deslocamento do depositador

A análise dos problemas deste subprocesso, desenvolvida nos passos 2.3 a 2.13 da etapa 2 (capítulo 4), permitiu obter os seguintes resultados:

- Entre as dificuldades para o deslocamento do depositador encontram-se: (i) a armação da estrutura mecânica do depositador, constituída de 8 chapas, que dificulta um adequado alinhamento entre as guias lineares e as buchas de bronze; (ii) o aquecimento do cabo de aço gerando a sua dilatação e reduzindo a sua tensão; (iii) a implementação utilizada para deslocar o depositador, baseada em uma volta dupla do cabo de aço na

polia do motor junto à fita isolante na superfície em contato com o cabo de aço; (iv) o eixo da polia do motor descentrado e com folga; (v) a excessiva folga entre as guias lineares e as 4 buchas do depositador; (vi) o único ponto de aplicação da força para o deslocamento do depositador afastado do centro de massa ou centro geométrico; e (vii) o atrito gerado pelo pó aderido nas guias lineares, conforme ilustrado na figura 5.1.

- Entre as peças desgastadas encontram-se: (i) a polia do motor, que apresenta desgaste no furo central, gerando folgas entre polia e eixo do motor; e (ii) a polia do cabo de aço desgastada pelo uso e deformada pelo aquecimento das lâmpadas IR, além de apresentar um eixo de giro fixado por meios não mecânicos, ter um diâmetro menor e gerar trancamentos e rupturas do cabo de aço quando o cabo se desencaixa da polia.



**Figura 5.1 – Ilustração de problemas no deslocamento do depositador**

As propostas de melhoria para reduzir ou eliminar os problemas analisados neste subprocesso são apresentadas na tabela 5.2.

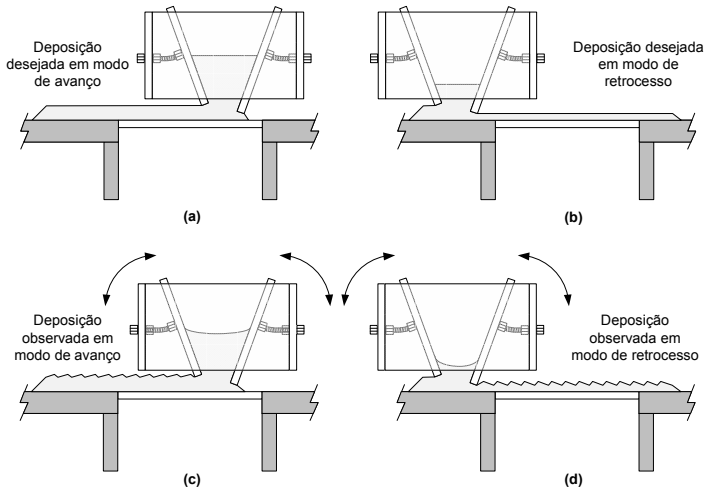
**Tabela 5.2 – Propostas de melhoria para o subprocesso de deslocamento do depositador**

Propostas de melhoria	Descrição
Propostas de melhoria para redução dos problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzir o comprimento das lâmpadas IR e dos refletores direcionais de calor as dimensões da PC, mantendo o valor atual da potência nominal.</li> <li>• Trocar os refletores direcionais de calor por refletores unidirecionais parabólicos dirigidos diretamente à PC.</li> <li>• Proteger o motor DC do calor direto das lâmpadas IR.</li> <li>• Trocar a polia pequena por uma polia maior em material metálico.</li> <li>• Trocar a polia do motor por uma polia de metal e com menor espessura.</li> <li>• Não fixar os dispositivos de fim de curso diretamente sobre a PF. Utilizar uma estrutura de suporte que não esteja em contato com as resistências elétricas e protegidas da radiação direta das lâmpadas IR.</li> </ul>
Propostas de melhorias para eliminação dos problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reprojeter o atual depositador para ser constituído apenas por 4 chapas de aço, ou 2 blocos e 2 chapas de aço, no qual cada bloco inclua uma bucha de bronze ou rolamentos ajustados à guia linear.</li> <li>• Projeto novo visando fabricar uma câmara de aquecimento na qual todos os componentes que não precisem aquecimento estejam fora dessa câmara.</li> </ul>

### 5.1.1.3 Subprocesso de geração da camada de pó

A análise dos problemas deste subprocesso, desenvolvida nos passos 2.3 a 2.13 da etapa 2 (capítulo 4), permitiu obter os seguintes resultados:

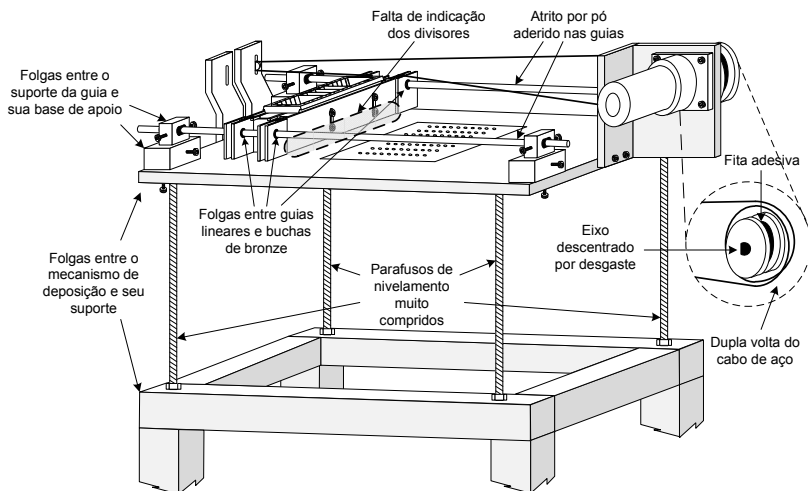
- A falta de um adequado pré-processamento da matéria-prima causa: (i) vazios de material na camada de pó depositada, devido à aglomeração de pó no depositador; e (ii) riscos ou rachaduras superficiais na camada depositada, devido a aglomerações de pó, pó aderido ou restos de material de processamentos passados.
- A superfície da camada depositada apresenta ondulações geradas pela vibração da régua de nivelamento durante o seu deslocamento, segundo ilustrado na figura 5.2, causados por: (i) folgas entre as guias lineares e as buchas de bronze pela diferença entre os seus diâmetros externos e internos, respectivamente; (ii) folgas entre os suportes das guias lineares e suas bases de apoio devido à limitação para regulagem da altura das guias lineares; (iii) folgas entre o mecanismo de deposição e a sua base de suporte devido ao comprimento dos parafusos de nivelamento entre eles; (iv) atrito gerado pelo pó aderido às guias lineares; (v) o ponto de aplicação da força para o deslocamento do depositador ( afastado do centro de massa ou centro geométrico ); (vi)



**Figura 5.2 – Ilustração da deposição da camada de pó (a) desejada em modo de avanço, (b) desejada em modo de retrocesso, (c) observada em modo de avanço, e (d) observada em modo de retrocesso**

elevada velocidade de deposição do pó sobre a PC, determinada em 83,33 mm/s; (vii) a folga entre a polia e o eixo do motor DC; e (viii) volta dupla do cabo de aço na polia do motor, conforme ilustrado na figura 5.3.

- A camada gerada utilizando a técnica de FGM, com variação da mistura de material, apresenta (i) faixas sem material, devido à falta de pré-processamento do material, à capacidade de escorregamento do pó, à separação entre divisores e à falta de um sistema de vibração que auxilie no seu escorregamento; (ii) faixas de material depositada sem um adequado controle da sua posição (no eixo Y) em relação a PC e o desenho a ser gravado; (iii) uma zona de indefinição ou incerteza do material depositado devido à diferença entre altura das régua de espalhamento e nivelamento, e devido ao ângulo de deslocamento entre o divisor de pó e o deslocamento do depositador; e (iv) contaminação entre materiais devido à deposição e espalhamento do pó, e à posterior retirada de material durante o nivelamento da camada.
- Geração de uma segunda camada durante o processo de espalhamento e de nivelamento causado pela acumulação de pó entre cada parede do depositador e as régua de espalhamento e nivelamento, com espessura definida pela borda inferior do depositador. Foi evidenciado que a extensão da segunda camada é proporcional ao número de



**Figura 5.3 – Ilustração de problemas na geração da camada de pó**

deslocamentos do depositador, o que é solucionado deslocando o depositador sem material.

- Grande desperdício de material produto do processo de fabricação causadas por: (i) folgas entre a borda interna da PF e a borda externa da PC; (ii) altura excessiva entre a base inferior das réguas e a PF; e (iii) vibração excessiva do depositador.

A figura 5.2 (a) ilustra a deposição e espalhamento desejado do depositador enquanto a figura 5.2 (b) ilustra o nivelamento desejado do depositador. Observa-se que os parafusos de ajuste das réguas de espalhamento e nivelamento encontram-se dobrados, motivo pelo qual não é possível regular a orientação das réguas. A figura 5.2 (c) ilustra a forma da camada depositada e espalhada, causado pela vibração e deslocamento do depositador. A figura 5.2 (d) ilustra as ondulações na superfície final da camada já nivelada.

As propostas de melhoria para reduzir ou eliminar os problemas analisados neste subprocesso são apresentadas na tabela 5.3.

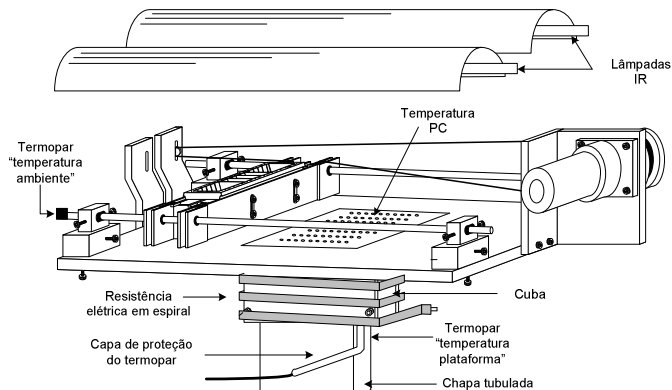
**Tabela 5.3 – Propostas de melhoria para o subprocesso de geração da camada de pó**

Propostas de melhoria	Descrição
Propostas de melhoria para redução do problema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzir a folga resultante entre a borda interna da PF e a borda externa da PC.</li> <li>• Modificar o depositador para incluir a regulagem fina da altura das régua, a distância entre elas e a sua orientação, por meio de parafusos.</li> <li>• Fixar por meio de pinos a PC à chapa de aço, para cada peça a ser construída.</li> <li>• Implementar paredes laterais durante o percurso do depositador de pó, para evitar a acumulação de pó nas bordas laterais da PF.</li> <li>• Reduzir os parafusos de nivelamento do mecanismo de deposição a 50 mm e aumentar a altura da base suporte do mecanismo.</li> <li>• Marcar as linhas divisórias do componente divisor no depositador e regular o seu deslocamento de avanço sobre a PC.</li> <li>• Modificar o <i>software</i> do EP para permitir a variação da distância vertical e horizontal entre spots consecutivos e para indicar o deslocamento dos divisores do componente divisor.</li> <li>• Implementar um procedimento para nivelamento da PC diretamente sobre a chapa de aço e um procedimento de regulagem do sistema de deposição.</li> </ul>
Propostas de melhorias para eliminação do problema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver um projeto mecânico de deposição de pó que inclua: um rolo compactador e variação da velocidade de deslocamento do depositador.</li> <li>• O mecanismo também deve permitir que a deposição, espalhamento e nivelamento aconteça em um único deslocamento do depositador, e que durante o retorno o depositador seja elevado ou a PC desça durante o deslocamento oposto.</li> <li>• Desenvolver um novo projeto mecânico para a PF que inclua câmaras para a acumulação do pó.</li> <li>• Desenvolver um projeto mecânico para carregar manual ou automaticamente o pó no depositador, incluindo um silo acumulador de pó, para garantir a fabricação de toda a peça, sem requerer carregamento externo.</li> </ul>

#### 5.1.1.4 Subprocesso de aquecimento

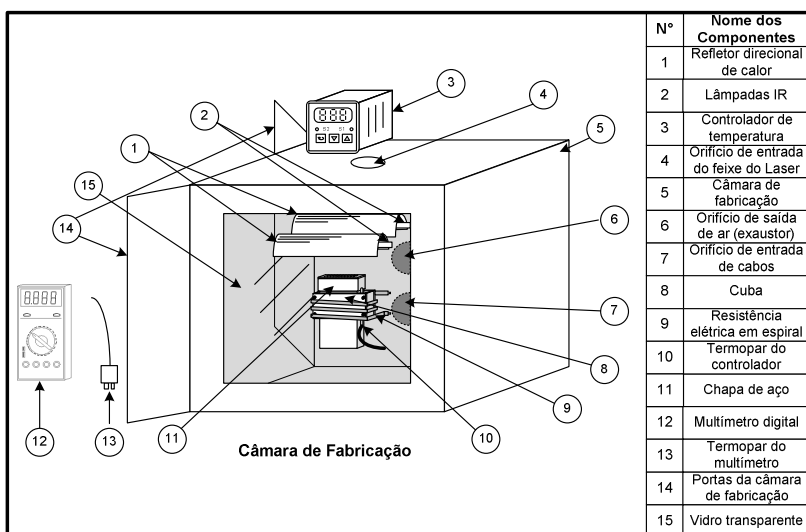
A análise dos problemas deste subprocesso, desenvolvida nos passos 2.3 a 2.13 da etapa 2 (capítulo 4), permitiu obter os seguintes resultados:

- O valor do termopar “temperatura ambiente” (indicado na figura 5.4) não corresponde ao valor da temperatura na superfície da camada, que é o parâmetro do processo que deve ser monitorado. Medidores de temperatura à distância se apresentam como alternativas de medição desse parâmetro.
- O termopar para a “temperatura da plataforma” apresenta uma capa proteção metálica de 150 mm de comprimento, resultando que sua medição é influenciada pelas temperaturas em toda a extensão da capa. O termopar não está aderido (fixado), apenas encaixado entre a parede interna da cuba e a parede externa da tubulação quadrada, como ilustrado na figura 5.4.



**Figura 5.4 – Ilustração da localização dos sensores de temperatura no interior da câmara de fabricação**

- O nome “câmara de aquecimento” utilizado por alguns autores para se referir ao lugar no qual a temperatura é mantida sob controle, não é aplicável no caso da câmara do EP, já que os seus componentes não foram projetados para operar nas temperaturas requeridas por alguns pós já sinterizados no EP, sendo o nome “câmara de fabricação” o mais adequado (ver a figura 5.5).



**Figura 5.5 – Ilustração dos componentes do subsistema de aquecimento**



- A falta de controle do subprocesso de aquecimento encontra-se relacionada com o ligamento e desligamento das lâmpadas IR realizados pelo operador, com o intuito de acelerar o processo de preaquecimento da superfície da camada depois da abertura das portas.
- A ligação do exaustor de pó, depois da sinterização da camada, reduz a temperatura no interior da câmara. O fluxo de ar elevado e a posição do orifício de saída de ar contribuem para o empenamento da camada pela brusca redução de temperatura na sua superfície. Autores recomendam garantir um adequado processo de resfriamento para evitar o empenamento indesejado.
- O maior problema em relação ao subprocesso de aquecimento é gerado pela necessidade de abrir as duas portas da câmara para o carregamento do depositador, para cada camada a construir.

A figura 5.4 ilustra a posição dos componentes geradores de calor e a localização dos termopares de temperatura utilizados. A figura 5.5 ilustra a localização de todos os componentes do subprocesso de aquecimento, exceto a sua placa de comando.

As propostas de melhoria para reduzir ou eliminar os problemas analisados neste subprocesso são apresentadas na tabela 5.4.

#### 5.1.1.5 Subprocesso de sinterização da camada de pó

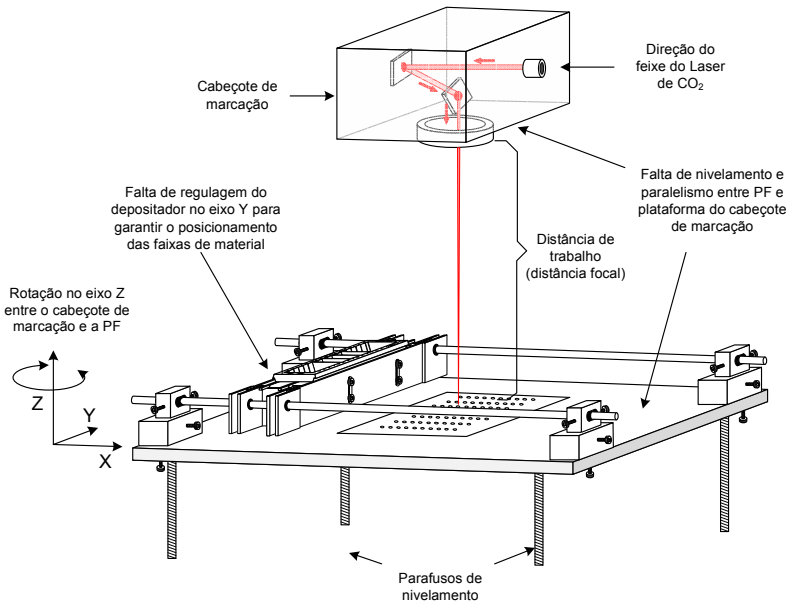
A análise dos problemas deste subprocesso, desenvolvida nos passos 2.3 a 2.13 da etapa 2 (capítulo 4), permitiu obter os seguintes resultados:

- A variação dimensional da camada no plano X-Y é devida a: (i) falta de procedimentos padronizados de pré-processamento do modelo digital em relação ao fator mm/pixel do EP para cada eixo; (ii) erro ao usar um fator de multiplicação (5,25/5,15) só no eixo X (*software* Alpha), o qual foi usado como fator de correção dimensional em ambos os eixos no *software* LaserStation, o que representa um aumento de 1,94% em relação ao eixo Y; (iii) deslocamento da PF em relação à distância de trabalho (distância focal), o que varia a dimensão do desenho sinterizado em relação ao modelo digital; e (iv) deslocamento entre diferentes desenhos pré-processados a serem sinterizados. A figura 5.6 ilustra alguns desses problemas.

**Tabela 5.4 – Propostas de melhoria para o subprocesso de aquecimento**

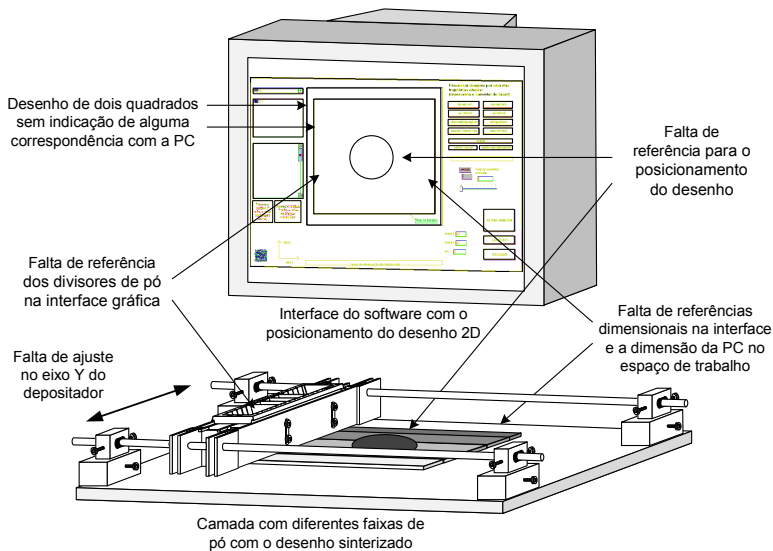
Propostas de melhoria	Descrição
Propostas de melhoria para redução de problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar as curvas da temperatura sobre a superfície da camada, produto da resistência elétrica e das lâmpadas, para as condições de fabricação da camada.</li> <li>• Implementar um controlador para as lâmpadas IR, cujo sensor monitore a temperatura da superfície da camada a sinterizar.</li> <li>• Reduzir o comprimento das lâmpadas IR e dos refletores direcionais de calor as dimensões da PC, mantendo sua potência nominal.</li> <li>• Proteger o motor DC da radiação das lâmpadas IR.</li> <li>• Permitir o contato direto entre a resistência elétrica e as paredes externas da cuba.</li> <li>• Substituir componentes plásticos tais como: polia do motor e polia do cabo de aço, por componentes metálicos.</li> <li>• Substituir o atual termopar (com capa metálica protetora) do controlador por um termopar com capa protetora de menores dimensões ou sem proteção e fixá-lo à chapa de aço.</li> <li>• Modificar as portas de abertura da câmara para incluir um vidro na altura da PF e uma janela para carregamento no depositador. Precauções tem que ser levadas em consideração para evitar queimaduras nas mãos.</li> <li>• Implementar um sistema de resfriamento controlado depois da sinterização de cada camada e no final do processo de fabricação, com o intuito de reduzir as tensões internas da peça produto do calor interno acumulado pelo pó, processo que pode levar varias horas. Obs: Fechar as fontes de fuga de ar quente não é recomendado nesta etapa, por possível elevação da temperatura interior, o que pode causar fundição dos componentes internos.</li> </ul>
Propostas de melhorias para eliminação de problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto novo visando fabricar uma câmara de aquecimento no qual todos os componentes que não precisem aquecimento estejam fora dessa câmara.</li> <li>• Projeto novo de sistema de deposição (ver resultados da análise do subprocesso de disposição), que inclua um silo de alimentação de pós diretamente ao depositador.</li> <li>• Implementar um processo para aspirar, filtrar e fazer circular o ar quente e com partículas de pó no interior da câmara, com controle do fluxo do ar, permitindo também soprar a lente do cabeçote de marcação durante a fabricação das peças.</li> <li>• Implementar um vidro especial que permita isolar a lente do cabeçote de marcação da temperatura do interior da câmara.</li> </ul>

- A variação dimensional da camada no eixo Z é devida a: (i) o grau de contração da matéria-prima utilizada depois da sinterização, (ii) condições iniciais do pó (umidade, temperatura, entre outras); (iii) grau da compactação prévia da camada, (iv) quantidade de energia térmica fornecida à camada (aquecimento da camada e potência do Laser), e (v) diâmetro do feixe do Laser. Mais informações em relação à variação dimensional no eixo Z são fornecidas nos resultados do subprocesso de deslocamento da PC (ver seção 5.1.1.6).



**Figura 5.6 – Ilustração dos problemas no subsistema de sinterização**

- A dificuldade de posicionar o desenho 2D gravado sobre uma camada de material homogêneo é devida a: (i) pré-processamento do desenho 2D, especificamente dos espaços em branco na borda do desenho; (ii) deslocamento manual do desenho 2D no módulo “Controle Alfa FGM” do *software*; (iii) falta de referências dimensionais na interface do *software* e da dimensão da PC nesse espaço de trabalho; (iv) falta de mecanismos e instrumentação que permitam ajustar a posição e a orientação da PF com referência à lente focal do cabeçote de marcação; e (v) falta de mecanismos e instrumentação que permita ajustar o paralelismo entre a superfície da PF e a superfície da plataforma do cabeçote de marcação. As figuras 5.6 e 5.7 ilustram alguns desses problemas.
- A limitação do EP para fabricar peças maiores, porem dentro da área de trabalho, foi devida a uma limitação na variável que contém o número total de pixels a serem gravados no *software* do EP, gerando erro de sobrefluxo. O erro foi causado pela falta de adequação do algoritmo original de marcação (LaserStation) ao algoritmo de sinterização, pelo aumento do número de spots a serem gravados.



**Figura 5.7 – Ilustração dos problemas para fabricar peças com FGM no subprocesso de sinterização**

- A limitação para sinterizar pó polimérico a baixas potências, maiores que as mínimas requeridas para sua sinterização, é devida a: (i) princípio de marcação do *software* do EP; (ii) separação entre dois spots consecutivos, vertical e horizontalmente (0,201 mm e 0,198 mm respectivamente), considerando um diâmetro gaussiano do feixe de 0,2 mm; (iii) diâmetro efetivo do feixe do Laser no pó para a potência utilizada: Mesmo que uma determinada potência sinterize o material, poderia não ser suficiente para unir os spots sinterizados, não formando portanto uma camada.
- A porosidade das peças fabricadas é devida ao próprio princípio de marcação do *software* do EP e à distância entre spots consecutivos. No caso do EP, essa distância é fixa.
- Não existe limitação no *hardware* nem no *software* do EP para variar a potência do Laser durante a sinterização em uma mesma camada. Foi verificado que o *software* Alpha possui algoritmos que permitem variar essa potência segundo a cor do desenho digital, já que foram baseados no *software* Lasercontrol para gravação em chapas cerâmicas. Um pixel de cor preta no desenho digital faz com que o algoritmo do *software* gere uma potência fixa de 85% de seu valor nominal, como

apresentado na subtarefa 3.4.2.2, dificultando o seu uso em materiais poliméricos.

Em relação à fabricação de peças utilizando a técnica de FGM, além dos resultados descritos anteriormente, observa-se o seguinte resultado:

- A dificuldade de posicionar a imagem do desenho 2D sobre uma camada de pó, com as faixas de diferente material, é devida à: (i) falta da regulagem do depositador, no eixo Y, que permita a deposição do pó nos limites desejados para cada faixa diferente de material; e (ii) falta de referências na própria interface gráfica do *software*, em relação aos divisores de pó, que permita ajustar o posicionamento do desenho 2D sobre essa camada. A figura 5.7 ilustra alguns desses problemas.

As propostas de melhoria para reduzir ou eliminar os problemas analisados neste subprocesso são apresentadas na tabela 5.5.

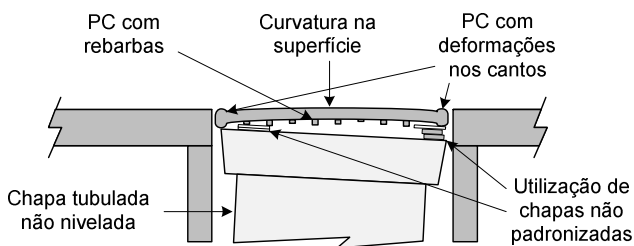
**Tabela 5.5 – Propostas de melhoria para o subprocesso de sinterização**

Propostas de melhoria	Descrição
Propostas de melhoria para redução de problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propor um procedimento de pré-processamento do modelo digital que inclua: (i) os fatores que garantam o dimensionamento da peça desejada; (ii) a fabricação de uma peça com um ou mais desenhos de camadas; (iii) a fabricação de peças com potências definidas pela cor do desenho da camada e (iv) o processamento da EVFL e exemplos de erros comuns durante essa etapa.</li> <li>• Verificar a distância entre a lente do cabeçote de marcação e a PC;</li> <li>• Substituir o atual relógio comparador por um transmissor com indicação digital em um painel externo, para o monitoramento da espessura da camada.</li> <li>• Modificar o <i>software</i> do EP para: (i) permitir a variação da distância vertical e horizontal entre spots consecutivos; (ii) indicar a trajetória do deslocamento dos divisores do componente divisor.</li> <li>• Informar ao usuário, no <i>software</i> do EP, da opção de variação da potência do Laser em uma mesma camada.</li> <li>• Desenvolver um manual para o usuário do software Alpha, baseado nos seus algoritmos, informando das possibilidades e limitações fornecidas pelo <i>software</i> segundo o tipo de peças a fabricar.</li> <li>• Regular o deslocamento do depositador para que as faixas de pó sejam depositadas corretamente.</li> <li>• Desenvolver um mecanismo que auxilie no ajuste da posição e rotação da PF em relação à lente do cabeçote de marcação.</li> </ul>
Propostas de melhorias para eliminação de problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redimensionar a variável causadora do sobre fluxo nos algoritmos do módulo de simulação da marcação e do módulo de fabricação.</li> <li>• Modificar o algoritmo do <i>software</i> para: (i) aplicar o fator de multiplicação ao eixo Y (5,25/5,15); (ii) modificar os algoritmos das 11 EVFL, o algoritmo de simulação da marcação e o algoritmo da gravação do desenho da camada; e (iii) variar a distância entre spots horizontal e vertical consecutivos.</li> </ul>

### 5.1.1.6 Subprocesso de deslocamento da PC

A análise dos problemas deste subprocesso, desenvolvida nos passos 2.3 a 2.13 da etapa 2 (capítulo 4), permitiu obter os seguintes resultados:

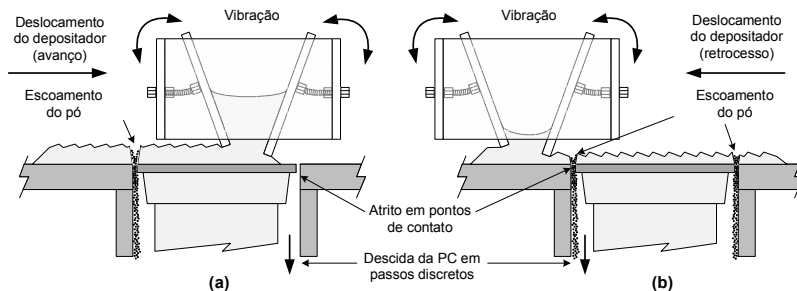
- A variação dimensional da camada no eixo Z é devida a: (i) variação da leitura do relógio comparador causada pela variação de sua temperatura externa; (ii) não proporcionalidade entre o número de passos programados no *software* e o deslocamento da mesa elevadora; (iii) contração da camada depois da sinterização; (iv) desgaste de 2 dentes da engrenagem fixo ao parafusos da mesa elevadora; e (v) folga entre o motor de passo e o seu suporte.
- A dificuldade de nivelar a PC no início do processo de fabricação é devida a: (i) irregularidades existentes na PC, tais como rebarbas e deformações nos seus cantos; (ii) falta de planicidade da superfície da PC; (iii) a falta de paralelismo entre a PF e a chapa de aço sob a PC; (iv) acúmulo de pó aderido à superfície da chapa de aço; e (v) folgas entre a PF e sua base. A figura 5.8 ilustra alguns desses problemas.
- A dificuldade em manter a PC nivelada e sem deslocamento no plano X-Y durante a fabricação da peça é devida a: (i) deslocamento das chapas não padronizadas, utilizadas para o nivelamento; (ii) a vibração causada pelo deslocamento do depositador e as folgas no mecanismo depositador; (iii) a vibração causada pela rotação do motor de passo; (iv) a falta de fixação entre a PC e a chapa de aço durante o processo de fabricação; (v) a reduzida área de contato entre a PC e a chapa de aço causada pelas rebarbas e deformações nos cantos da PC e pelas chapas de nivelamento; e (vi) o atrito entre as bordas da PC e as bordas da chapa de aço com as paredes interiores da PF e as paredes interiores da cuba. A figura 5.8 ilustra alguns desses problemas.



**Figura 5.8 – Ilustração de problemas de nivelamento da PC**

- O escoamento do pó não sinterizada na folga entre a PF e a PC é causada por: (i) diferença entre suas áreas, (ii) irregularidade na borda interior e na geometria da PF, (iii) irregularidade na borda exterior e na geometria da PC; (iv) vibração causada pelo deslocamento do depositador e pelo deslocamento da mesa elevadora; e (v) deslocamento no plano X-Y da PC durante o seu deslocamento pelo uso de chapas de nivelamento. Testes determinaram que para fabricar uma camada base ocupando 100% da superfície da PC, 1/3 escoou na folga entre a PF e a PC. A figura 5.9 ilustra alguns desses problemas.

- A perda do material para reutilização do pó não sinterizado é causada pela sua exposição às fontes de calor do processo (lâmpadas IR, aquecimento da chapa de aço da PF), o que é evidenciado pela sua mudança de cor.



**Figura 5.9 – Ilustração de problemas no subprocesso de deslocamento da PC durante (a) o modo de avanço e (b) modo de retrocesso**

As propostas de melhoria para reduzir ou eliminar os problemas analisados neste subprocesso são apresentadas na tabela 5.6.

**Tabela 5.6 – Propostas de melhoria para o subprocesso de deslocamento da PC**

Propostas de melhoria	Descrição
Propostas de melhoria para redução de problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver um "Procedimento de nivelamento da PC".</li> <li>• Substituir o atual relógio comparador por um transmissor com indicação digital em um painel externo, para o monitoramento da espessura da camada.</li> <li>• Substituir a atual engrenagem fixado ao parafuso da mesa elevadora por outro em boas condições.</li> <li>• Monitorar periodicamente: (i) as possíveis folgas entre o motor de passo e sua base, e entre o motor de passo e a engrenagem fixado ao parafuso da mesa elevadora; (ii) o estado da PC visando detectar irregularidades que afetem o seu nivelamento; (iii) o pó aderido às paredes interiores da PF e da cuba, à superfície da chapa de aço, a ambas superfícies da PC e o acúmulo de pó podem dificultar a normal operação do processo.</li> <li>• Verificar o grau de planicidade da superfície superior da PF e da PC.</li> <li>• Retificar a geometria interior da PF e a chapa grossa de aço.</li> <li>• Reduzir o peso sobre a mesa elevadora ou substituir o motor de passo por um outro de maior torque.</li> <li>• Regular a altura das régua e do depositador de pó visando reduzir a quantidade de pó escoado.</li> <li>• Implementar paredes laterais ao depositador, sobre a PF, para evitar o acúmulo de pó.</li> </ul>
Propostas de melhorias para eliminação de problemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modificar a atual câmara de fabricação para que componentes críticos que não requeiram o não sejam projetados para altas temperaturas estejam fora dessa câmara.</li> <li>• Modificar o mecanismo do depositador de pó para permitir o ajuste fino da altura das régua de espalhamento e nivelamento.</li> <li>• Fixar a PC com a chapa de aço, durante a fabricação de uma peça.</li> <li>• Projetar um depósito para o acúmulo de pó baixo a PF que reduza o pó acumulado sobre a PF e proteja o pó não sinterizado das fontes de calor do processo.</li> </ul>

### 5.1.2 Resultado da análise da variabilidade por subprocesso

Os resultados da análise da variabilidade nos subprocessos do EP, obtidos do desenvolvimento dos passos 3.3 e 3.4 da etapa 3 (capítulo 4), são apresentados a seguir:

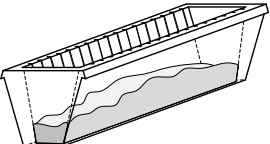
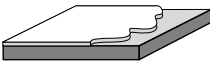
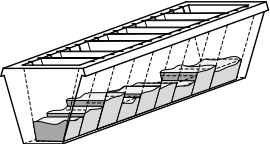
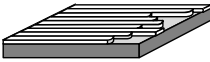
#### 5.1.2.1 Subprocesso de carregamento de pó

A análise da variabilidade do subprocesso de carregamento de pó permitiu obter os seguintes resultados:

- A variabilidade no carregamento do depositador ou componente divisor é devida à variação na quantidade e na distribuição do pó: (i) no interior do depositador, e (ii) no componente divisor, gerando uma camada incompleta ou uma camada com falta de material em uma das faixas de pó, respectivamente, conforme ilustrado na figura 5.10. Essa



variabilidade é decorrente do processo manual de carregamento, acrescentado ao fato de operar com o interior da câmara aquecida e com gases gerados pela própria sinterização, segundo descrito na seção 5.1.1.1. O processo manual de carregamento é também causador das variações de temperatura no interior da câmara e da demora no tempo de fabricação, devido à abertura das portas.

Causa da variabilidade	Ilustração	Efeito no acabamento superficial da camada
Variação na distribuição de pó no interior do depositador		
Variação na quantidade de pó e na distribuição no componente divisor (para FGM)		

**Figura 5.10 – Resumo da variabilidade do subprocesso de carregamento de pó no depositador**

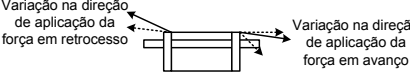
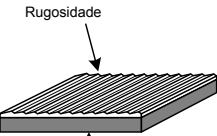
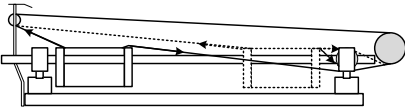
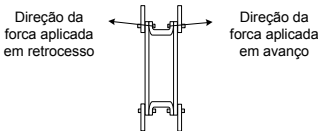
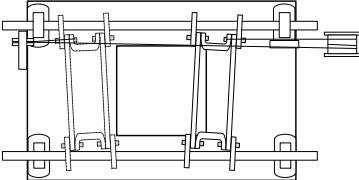
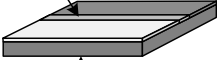
- A processabilidade do material dependerá das características apresentadas pela matéria-prima. Partículas de pó com formas alongadas podem não escoar pelo depositador, e camadas já depositadas podem ser arrastadas pelas próprias régua durante o seu deslocamento. Nesses casos, um mecanismo baseado em um rolo compactador pode ser uma solução mais adequada.
- A quantidade de pó requerida para gerar uma camada, dependerá: (i) da distância entre a base do depositador e a PF, (ii) da altura entre as régua de espalhamento e nivelamento, (iii) do uso do componente divisor; (iv) da diferença de áreas entre o interior da PF e a PC; e (v) da estratégia de deposição utilizada.

As propostas de solução para reduzir ou eliminar a variabilidade no subprocesso de carregamento de pó, encontram-se contidas na tabela 5.1 da seção 5.1.1.1.

### 5.1.2.2 Subprocesso de deslocamento do depositador

A análise da variabilidade do subprocesso de deslocamento do pó permitiu obter os seguintes resultados:

- O depositador apresenta vibrações durante o seu deslocamento, devido a: (i) folgas no sistema de deposição causadas pelo excessivo comprimento dos parafusos de nivelamento, pela elevação das guias lineares para compensar a deformação do depositador causado pela falta de seus 4 parafusos, pela excessiva diferença entre os diâmetros internos das buchas de bronze e o diâmetro externo das guias lineares, e o desgaste no eixo da polia do motor e a largura do mesmo; (ii) atrito entre as guias lineares e o depositador causado pelo pó a elas aderido, pela oxidação apresentada e pela falta de lubrificação nas guias; (iii) variabilidade na aplicação da força de deslocamento do cabo de aço no depositador, causada pela tração em um extremo só, pelo ângulo variável entre o cabo de aço e a linha horizontal, pela irregularidade da superfície da polia do motor, pela folga entre a polia e o eixo do motor, pela dilatação do cabo de aço por aquecimento e pela dupla volta do cabo na polia do motor; (iv) pela elevada velocidade de deposição e falta de controle de partida e parada; e (v) falta de concentricidade entre os eixos centrais das buchas de bronze do depositador. A figura 5.11 ilustra a variabilidade na aplicação da força no depositador e o seu efeito na camada depositada.
- Pós processados industrialmente para equipamentos de SLS apresentam-se adequados para o mecanismo deposição do EP. Pós processados no próprio laboratório com características de qualidade muito afastadas dos processados industrialmente e com baixa fluidez, têm apresentados inapropriados durante os testes de deposição no EP, principalmente por sua reduzida capacidade de escoamento, sendo mais adequado nesses casos um sistema de deposição baseados em um rolo compactador.
- A folga entre o diâmetro interno da bucha e o diâmetro externo das guias lineares é excessiva, se justificada somente pela dilatação térmica. Uma explicação pode-se encontrar na solução implementada no mecanismo de deposição para o seu deslocamento, puxando-o por um único extremo, assim uma folga maior pode evitar os frequentes trancamentos decorrentes da solução implementada. Essa excessiva folga é a principal responsável pela vibração do depositador durante o seu deslocamento, como ilustrado na figura 5.11 a seguir:

Causa da variabilidade	Ilustração	Efeito na camada depositada
Variação no ângulo de aplicação da força em avanço e em retrocesso	 <p>Varição na direção de aplicação da força em retrocesso</p> <p>Varição na direção de aplicação da força em avanço</p>	 <p>Rugosidade</p> <p>PC</p>
Folga entre $\varnothing$ interno da bucha e $\varnothing$ externo da guia linear		
Dilatação do cabo de aço pelo aquecimento causado pelas lâmpadas IR		
Folga entre $\varnothing$ interno da bucha e $\varnothing$ externo da guia linear	 <p>Direção da força aplicada em retrocesso</p> <p>Direção da força aplicada em avanço</p>	
Variação no ângulo de aplicação da força em avanço e em retrocesso		 <p>Região de transição de material não controlada</p> <p>PC</p>
Atrito entre as guias lineares e as buchas de bronze		
Largura da polia do motor		

**Figura 5.11 – Resumo da variabilidade do subprocesso de deslocamento do depositador**

Entre as propostas de solução para eliminar essa variabilidade, encontram-se: (a) projeto de reengenharia do mecanismo de deposição, visando deslocar o depositador desde ambos extremos, aplicando uma força constante na direção de avanço e retrocesso, com controle de partida/parada suave e controle da velocidade, e eliminando a volta dupla do cabo de aço causadora de batimentos abruptos e rupturas do cabo de aço; e (b) projeto de um mecanismo de deposição para pós com baixa fluidez ou capacidade de escoamento e deposição para FGM baseado em um rolo depositador/compactador.

### 5.1.2.3 Subprocesso de geração da camada de pó

A análise da variabilidade do subprocesso de geração da camada de pó, ilustrada na figura 5.12, permitiu obter os seguintes resultados:

- A variabilidade no acabamento superficial da camada de pó, é devida a: (i) vibração do depositador durante o seu deslocamento causado pelas folgas no sistema de deposição, pelo atrito entre depositador e guias lineares, pelo ponto de aplicação da força de deslocamento no

depositador e pela variação da força aplicada ao depositador; (ii) o pó aderido no interior do depositador ou na superfície de trabalho; (iii) a variação na granulometria do pó; e (iv) a aglomeração do pó no interior do depositador ou das subdivisões, causado pela umidade inicial, baixa densidade e forma geométrica alongada dos grãos de pó; A figura 5.12 ilustra essas causas de variabilidade e seus efeitos no acabamento superficial da camada depositada. Foi observado que o sulco gerado pelo depositador e as réguas é maior que o valor de espessura desejada.

- A variabilidade na espessura da camada depositada é devido a: (i) desnivelamento das réguas de espalhamento e nivelamento causado pelo desnivelamento do depositador; (ii) diferença de alturas entre as réguas; e (iii) contração da camada já sinterizada.

- A variabilidade na deposição das faixas de diferentes materiais é devido a: (i) variabilidade na distância de separação entre divisores, causada pela diferença de distância entre os sulcos no componente divisor e a folga entre sulco e divisor; e (ii) variabilidade na região divisória entre as diferentes misturas causada pela elevada altura entre a superfície do depositador e a PF, a elevada diferença de altura entre as réguas, e a vibração do componente divisor durante a deposição do material.

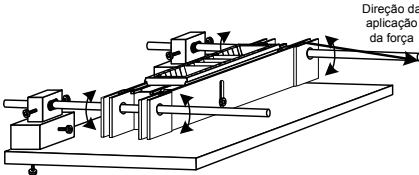
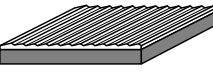
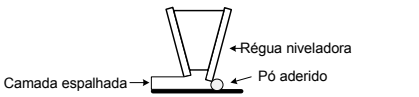
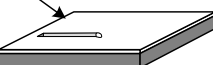


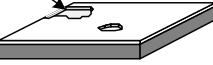

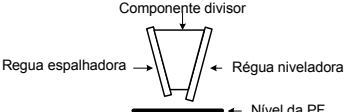
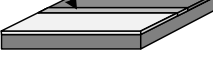

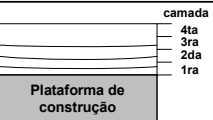
- Geração de uma segunda camada, em ambos os lados da PF, pelo pó acumulado entre cada régua e as paredes do depositador, causado pela vibração do depositador durante a deposição do pó, sendo sua extensão proporcional à quantidade de pó acumulada e o número de deslocamentos do depositador.

Uma proposta de solução para reduzir essa variabilidade requer a implementação da proposta de solução para eliminar a variabilidade no deslocamento do depositador, apresentada na seção 5.1.2.2.

#### 5.1.2.4 Subprocesso de aquecimento

A análise da variabilidade do subprocesso de aquecimento da camada permitiu obter os seguintes resultados:

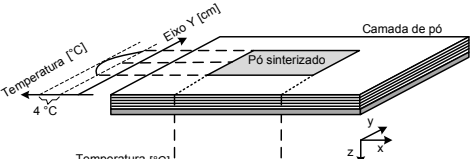

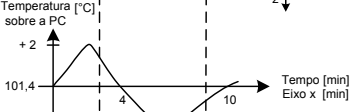

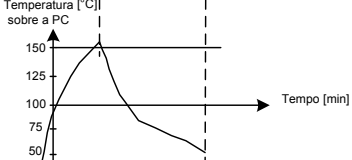

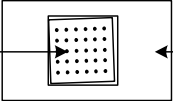

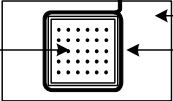

- A camada fabricada apresenta variabilidade microestrutural devido a: (i) aquecimento irregular da camada de pó causado pela projeção radial de calor das lâmpadas IR sobre a PC; (ii) oscilação da temperatura causada pela estratégia de controle (liga/desliga) da resistência elétrica abaixo da PC e pelo desligamento das lâmpadas IR antes da sinterização da camada, sendo a variabilidade microestrutural dependente da EVFL e da temperatura inicial da camada no início da sinterização; (iii) contato da PC com alguma borda interna da cuba aquecida, causando uma variação radial desde o ponto de contato; e

Causa da variabilidade	Ilustração	Efeito no acabamento superficial da camada
<p>Folga entre Ø interno da bucha e Ø externo da guia linear</p> <p>Atrito entre bucha e guia linear</p> <p>Ponto de aplicação da força</p> <p>Tensão irregular do cabo de aço</p>	 <p>Direção da aplicação da força</p>	<p>Rugosidade</p> 
<p>Pó aderido; Impurezas</p>	 <p>Camada espalhada →</p> <p>← Régua niveladora</p> <p>← Pó aderido</p>	<p>Riscos</p>  <p>Camada espalhada</p>
<p>Variação na granulometria do pó</p>	 <p>← Nível da camada nivelada</p> <p>Plataforma de construção</p>	<p>Aspereza superficial</p> 
<p>Aglomerção do pó no depositador (sem divisões)</p>		<p>Espaços vazios</p> 
<p>Aglomerção do pó no depositador (com divisões)</p>		<p>Faixas sem material</p> 
<p>Altura do componente divisor para FGM em relação a régua niveladora</p>	 <p>Componente divisor</p> <p>Regua espalhadora →</p> <p>← Régua niveladora</p> <p>← Nível da PF</p>	<p>Região de transição de material não controlada</p> 
<p>Contração da camada anterior sinterizada</p>	 <p>Camada não sinterizada</p> <p>Camada sinterizada</p> <p>Número de camada</p> <p>4ta</p> <p>3ra</p> <p>2da</p> <p>1ra</p> <p>Plataforma fixa</p> <p>Plataforma de construção</p>	 <p>camada</p> <p>4ta</p> <p>3ra</p> <p>2da</p> <p>1ra</p> <p>Plataforma de construção</p>

**Figura 5.12 – Resumo da variabilidade do subprocesso de geração da camada de pó**

(iv) distribuição irregular da temperatura na cuba causado pelo contato direto da resistência elétrica com as arestas da cuba. A figura 5.13 apresenta graficamente cada situação descrita anteriormente para uma peça quadrada de 50 x 50 mm com EVFL vertical, temperatura da plataforma de 130°C e temperatura ambiente de 160°C, baseada nos experimentos que deram origem aos gráficos das figuras 4.35 e 4.36, sendo a região mais escura indicativa de uma temperatura maior.

- A maior das 5 variabilidades descritas anteriormente é causada pelo uso das lâmpadas IR, que causam um aumento na taxa de resfriamento da camada sinterizada, sendo a intensidade da variação proporcional ao tamanho da peça e ao tempo requerido para sua sinterização.

Causa da variabilidade	Ilustração	Efeito na distribuição da temp.
Projeção radial das lâmpadas IR e refletores direcionais de calor sobre a superfície da camada		 <p>Varição gradual em y</p>
Oscilação da temperatura da resistência elétrica sobre a PC		 <p>Varição gradual em X</p>
Resfriamento da superfície da camada pelo desligamento das lâmpadas IR		 <p>Varição gradual em X</p>
Contato da PC com alguma borda interna da cuba aquecida		 <p>Radial de um canto</p>
Distribuição irregular da temperatura nas bordas da cuba		 <p>Radial dos cantos</p>

**Figura 5.13 – Resumo da variabilidade do subprocesso de aquecimento no interior da câmara de fabricação**

- A variabilidade microestrutural acontecerá para cada camada construída e poderá ser diferente para cada nova camada se: (i) não são mantidas as condições de repetitividade durante a fabricação, e (ii) a PC se desloca livremente (no plano X-Y) durante cada deslocamento do depositador ou durante a descida da PC. Manter essas condições de repetitividade para cada camada fabricada aumentará o tempo total requerido para a fabricação de uma peça, devido ao período de aquecimento e resfriamento da resistência elétrica (9-10 min.), como observado na figura 4.35.

Entre as propostas de solução para reduzir essa variabilidade, encontram-se: (a) substituição dos atuais refletores radiais das lâmpadas IR por refletores parabólicos que rodeiem a camada a ser sinterizada; (b) utilização de uma resistência de maior potência para diminuir o período de oscilação da temperatura, além de utilizar um melhor controle para reduzir a amplitude dessa oscilação; (c) implementação de um controle para as lâmpadas IR durante o subprocesso de sinterização da camada; (d) fixação temporária da PC à chapa de aço por meio de dois pinos; (e) melhora do contato entre a resistência elétrica em espiral e as paredes externas da cuba.

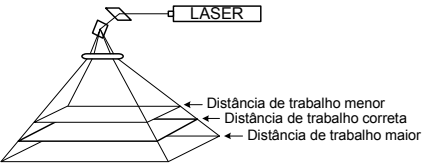
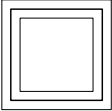
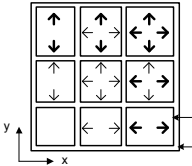
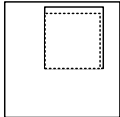
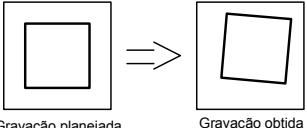

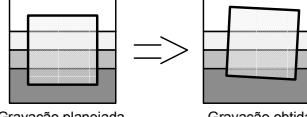

Uma proposta de solução para eliminar essa variabilidade é o projeto novo de uma câmara de aquecimento, através de um fluxo de calor, durante todo o processo de fabricação e com atmosfera controlada.

#### 5.1.2.5 Subprocesso de sinterização da camada de pó

A análise da variabilidade do subprocesso de sinterização da camada de pó permitiu obter os seguintes resultados:

- A variabilidade da potência do Laser na camada fabricada é devida a: (i) variabilidade no tempo de exposição ao feixe do Laser causado pela temporização por *software*, dependente do relógio interno do computador; (ii) gases entre a lente focal e a camada sinterizada, causada pela própria sinterização; e (iii) aumento na temperatura do corpo do Laser causado por sua operação.
- A variabilidade no posicionamento do feixe do Laser sobre a camada de pó é devida a: (i) resolução da placa digital/analógica; (ii) variabilidade no posicionamento dos espelhos; (iii) tempo menor que o requerido para o posicionamento dos espelhos; e (iv) deslocamento da PC entre camadas sinterizadas.

- A variabilidade no dimensionamento de um desenho 2D sinterizado sobre a camada é devida a: (i) variação da distância de trabalho em relação à distância especificada na própria lente (246 mm); (ii) a variabilidade no paralelismo entre a superfície da PF e a superfície da plataforma do cabeçote de marcação, causando deformações no desenho sinterizado; (iii) variabilidade no procedimento de pré-processamento do desenho digital; e (iv) variabilidade no posicionamento e orientação da PF em relação à plataforma do cabeçote de marcação. A figura 5.14 ilustra algumas dessas variabilidades.
- A variabilidade na espessura da próxima camada depositada é devida à contração da camada sinterizada em relação à camada não sinterizada.

Causa da variabilidade	Ilustração	Efeito na camada sinterizada
Variação na distância de trabalho		 <p>Varição no dimensionamento final</p>
Falta de paralelismo entre a PF e a plataforma do cabeçote de marcação	 <p>→ A seta indica a direção do aumento da dimensão → A seta mais escura indica um maior aumento da dimensão</p>	 <p>Varição no dimensionamento segundo a posição do modelo na PC</p>
Ajuste não adequado da posição e orientação da PF em relação à plataforma do cabeçote de marcação	 <p>Gravação planejada      Gravação obtida</p>	 <p>Camada sinterizada</p>
	 <p>Gravação planejada      Gravação obtida</p>	 <p>Camada com FGM sinterizada</p>

**Figura 5.14 – Resumo da variabilidade do subprocesso de sinterização da camada de pó**



- A variabilidade microestrutural da camada sinterizada é devida a: (i) variabilidade da potência do Laser; (ii) variabilidade no posicionamento do feixe do Laser; e (iii) variabilidade da espessura da camada devido à contração da camada anteriormente sinterizada.

Entre as propostas de solução para redução da variabilidade encontram-se: (a) uso do procedimento de pré-processamento padronizado, desenvolvido na etapa 2 da metodologia; (b) verificação/ajuste da distância de trabalho; (c) substituição da atual placa digital/analógica por uma placa de maior resolução (16 bits); d) cálculo da contração da camada sinterizada com o intuito de regular a potência da camada seguinte; e) fixação temporal da PC sobre a chapa de aço; e f) desenvolvimento de um projeto mecânico, para incluir um sistema de posicionamento, nivelamento e orientação da PF em relação à plataforma do cabeçote de marcação.

#### 5.1.2.6 Subprocesso de deslocamento da PC

A análise da variabilidade do subprocesso de deslocamento da PC permitiu obter os seguintes resultados:

- A variabilidade no deslocamento da mesa elevadora é devida a: (i) não proporcionalidade entre o número de passos enviado ao motor de passo e o deslocamento da mesa elevadora, causada pelo próprio mecanismo da mesa; e (ii) perda de passos causada pelo desgaste da engrenagem do parafuso, pela folga entre o motor e sua base, pelo excessivo peso sobre a mesa elevadora, e pelo atrito entre a chapa de aço e as paredes interiores da cuba.
- A variabilidade no nivelamento da superfície da PC em relação à superfície da PF é devida ao deslocamento da PC em relação à chapa de aço, causado por: (i) uso de chapas de nivelamento abaixo da PC; (ii) vibração da PC, causada pelo deslocamento do depositador e pelo deslocamento da mesa elevadora; (iii) redução da área de contato entre a PC e a chapa de aço devido à presença de rebarbas, à deformação dos cantos e curvatura superficial da PC; (iv) acúmulo de pó entre a PC e a chapa de aço; e (v) atrito entre a chapa de aço e as paredes interiores da cuba.
- As dificuldades para monitorar a espessura da camada através do relógio comparador são: (i) dificuldade para a leitura direta da espessura (relógio com medição multivolta); (ii) distância entre o operador e a localização do instrumento; (iii) inadequada iluminação para monitorar a espessura; e (iv) vibração na agulha do relógio gerado em cada passo de deslocamento do relógio.

Entre as propostas de redução da variabilidade encontram-se: (a) substituir o relógio comparador por um instrumento com indicação digital, fora da câmara de fabricação; (b) projetar uma base rígida para o motor de passo; e (c) monitorar a espessura através do relógio comparador ou determinar o número de passos para a camada seguinte, baseado na equação de deslocamento da mesa elevadora e na distância de trabalho.

Uma proposta para eliminar essa variabilidade é desenvolver um projeto eletromecânico de um sistema que garanta o deslocamento vertical da PC, sem atrito entre as paredes da cuba, sem vibrações, com controle da espessura da camada, e cujo mecanismo não esteja exposto ao aquecimento.

## 5.2 Discussões

A seguir são apresentados algumas discussões geradas como resultados da análise obtidos da aplicação da metodologia apresentada no capítulo 4.

### 5.2.1 Discussões em relação aos parâmetros de fabricação

Segundo descrito por Dabbas (2006, p.48-51) tanto o parâmetro de temperatura da plataforma quanto o parâmetro de temperatura do ambiente próximo à PF (temperatura da câmara) têm como objetivo o monitoramento e controle do aquecimento do material depositado.

O parâmetro de fabricação “temperatura da câmara” ou “temperatura ambiente” é usado em processos que tem uma câmara de aquecimento fechada para o armazenamento do calor, que requer um controle da temperatura homogêneo em seu interior e que utilizam vários sensores em diferentes pontos estratégicos da câmara para garantir uma temperatura média. Se a câmara de fabricação do EP fosse uma câmara de aquecimento, todos os seus componentes não metálicos localizados no seu interior se danificariam, ao operar a temperaturas próximas á temperatura de fusão dos materiais utilizados. Portanto o uso do termo temperatura da câmara ou ambiente torna-se inadequado para o EP.

Por outro lado, para monitorar e controlar adequadamente o parâmetro “temperatura superficial da camada” é requerido um sensor de temperatura por radiação medindo diretamente sobre a superfície da última camada depositada, além de um controle das lâmpadas IR antes, durante e depois da sinterização.

Em relação à “Densidade de Energia” (DE), seu cálculo tem sido determinado pela aplicação da equação 5.1, onde P é a potência incidente do Laser [Watts], d o diâmetro do feixe [cm] e v a VVFL, durante o qual o Laser permanece ligado [cm/s].

$$DE = E_p = \frac{P}{d \cdot v} \quad (5.1)$$

Além do erro causado pelo uso da VVFL e o erro induzido pela potência informada no *software*, soma-se o fato que a equação 5.1, utilizada por usuários do EP, é baseada em autores que trabalharam com equipamentos de SLS no qual o Laser (em modo contínuo) é deslocado seguindo uma linha a uma velocidade constante ou deslocando a mesa de trabalho a velocidade constante (LÜ; FUH; WONG, 2001; GIBSON; SHI, 1997; HO; GIBSON; Cheung, 1999). Em outras palavras, considerando que o feixe do Laser grava continuamente enquanto o feixe se desloca, não sendo o caso do EP, por se tratar de um sistema de marcação.

No apêndice C2 é apresentada uma discussão do desenvolvimento da equação da DE para o EP, baseado no seu princípio de funcionamento.

Dos parâmetros de processo não controlados no EP, o parâmetro “distância horizontal e vertical mínima entre spots” se apresenta como a mais promissora, já que sua redução permitiria a sinterização da camada com potências menores e o seu controle permitiria a fabricação de FGM por variação da porosidade. A variação da distância horizontal e vertical mínima requer a reprogramação de todos os algoritmos de processamento do *software* Alpha.

Finalmente, se torna oportuno dizer que as informações mais relevantes, em termos da reprodutibilidade das peças, são os parâmetros do processo, já que esses parâmetros permitem avaliar os resultados, e mesmo reproduzir as peças em outros equipamentos que sejam capazes de controlar os mesmos parâmetros informados na fabricação de uma determinada peça.

## 5.2.2 Discussões em relação à melhoria do EP

Como resultado da aplicação da metodologia foram propostas soluções para cada problema identificado, para cada causa de variabilidade identificada e para cada parâmetro de processo utilizado no EP.

A implementação das propostas de soluções permitirá reduzir ou eliminar cada um dos problemas que o EP apresenta, contudo é preciso considerar que, para garantir uma adequada repetitividade geométrica e microestrutural na fabricação de peças (com ou sem FGM), deve ser observado que: (i) o EP não controla os seus parâmetros de fabricação, somente os comanda; ii) o EP possui somente três instrumentos de medição (relógio comparador, controlador de temperatura com indicação digital e u multímetro com entrada para termopar) para o monitoramento do processo; (iii) o algoritmo do EP não monitora nenhum dos parâmetros de fabricação descritos; sendo o monitoramento de responsabilidade do operador; e (iv) o EP não controla nem monitora todos os parâmetros de processo mínimos necessários (ver a tabela 4.15).

A dimensão da câmara de fabricação e a localização dos mecanismos no interior da câmara e o uso de aquecimento no interior da câmara, têm limitado outras soluções para a deposição da camada de pó e para o deslocamento da PC, pelo que torna-se imperioso reduzir a sua dimensão ou focalizar o aquecimento sobre a camada de pó.

Considerando que o objetivo atual do EP é sua utilização na pesquisa auxiliando na fabricação de peças com e sem FGM para avaliar a processabilidade de novas matérias-primas por intermédio do processo de SLS, torna-se importante munir-se dos instrumentos de medição para todos os parâmetros de processo e de um sistema de aquisição de dados para a sua coleta, que seja independente do computador utilizado para o comando do EP, tornando-se uma importante fonte de consultas para cada peça fabricada.

Finalmente, torna-se necessário dispor de um sistema eletrônico, baseado em microprocessador, para garantir o controle dos parâmetros críticos do processo, como é o caso do TEFL e a estabilidade de sua potência, o que permitirá implementar alarmes durante o processo ou ainda automatizar os subprocessos existentes.

## **6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 Conclusões finais**

O objetivo geral deste trabalho é analisar um equipamento de sinterização seletiva a Laser para a fabricação de peças com gradação funcional de material visando garantir a repetitividade de seu processo de fabricação através da redução da variabilidade de seu processo de fabricação, mediante o emprego de uma metodologia de análise e melhoria de processos. Para atingir esse objetivo foi aplicada uma metodologia, dividida em três etapas, adaptada dos modelos de referência MAMP e ciclo PDCA.

O primeiro objetivo específico proposto: “Identificar e analisar os problemas apresentados em um equipamento de sinterização seletiva a Laser e as causas que os originam, propondo soluções de melhoria”, foi atingido com a aplicação da segunda etapa da metodologia, mediante a identificação de 51 problemas obtidos de reportes e relatos de usuários do equipamento, dando um tratamento sistemático e metodológico a cada um deles para identificar suas causas raízes, utilizando de ferramentas específicas e propondo de soluções de melhoria para a redução ou eliminação desses problemas.

O segundo objetivo específico proposto: “Identificar e analisar as causas que possam estar influenciando na variabilidade do processo de fabricação, propondo soluções para sua redução ou eliminação”, foi atingido com a aplicação da terceira etapa da metodologia, mediante a identificação e análise das causas raízes de variabilidade para cada subprocesso e a análise dos parâmetros de fabricação utilizados no equipamento.

O terceiro objetivo específico proposto: “Identificar e analisar as limitações do equipamento para fabricar peças com gradação funcional de material”, foi atingido durante a aplicação da segunda e terceira etapa da metodologia. Para garantir esse objetivo foi considerado, durante a análise de essas duas etapas, o processo mais completo de fabricação: Uma peça com FGM, fabricada a partir de múltiplos desenhos 2D e com aquecimento da camada durante sua construção.

O quarto objetivo específico: “Propor ou adaptar uma metodologia de análise para o processo de fabricação”, foi atingido com a adaptação dos modelos definidos como referência (ciclo PDCA e MAMP), amplamente descrito no capítulo III.

Os experimentos realizados durante a análise do EP, visando a identificação das causas de variabilidade dimensional nas peças causada pelo processo de fabricação, permitiram evidenciar que para peças sem FGM: (i) o EP não apresenta variabilidade dimensional no plano xy atribuída à trajetória percorrida pelo feixe do Laser, (ii) o EP não apresenta variabilidade dimensional no plano z quando a espessura da camada é monitorada através do relógio comparador. Já para peças com FGM a variabilidade dimensional entre as diferentes faixas de material no plano xy é atribuída ao deslocamento do depositador (evidenciado na seção 5.1.2.2) e ao deslocamento irregular da PC em relação à chapa grossa de aço (evidenciado na seção 5.1.2.6). As diferenças dimensionais em relação aos valores do modelo computacional são causadas pelo desconhecimento dos fatores de conversão (relacionados ao software do EP e o cabeçote de marcação) entre um modelo computacional dimensionado e o arquivo BMP requerido pelo *software* Alpha e pela falta de procedimentos padronizados.

Em relação à variação da potência do Laser em uma mesma camada, a análise do *software* do EP evidenciou a existência do algoritmo que permite essa funcionalidade, mas que a interface do software não informa. A mesma análise evidencia a incapacidade de variar a potência do Laser atribuída à cor preta do desenho (potência de saída do Laser em 100%). Modificações nesse algoritmo permitiram ajustar a potência máxima do Laser atribuída à cor preta.

Outras modificações no algoritmo de gravação, como resultado da análise do *software* e do hardware do EP, permitiram variar a distância entre dois spots gravados consecutivamente (horizontal e vertical), permitindo explorar novas alternativas para a fabricação de peças com FGM: Peças com variação na sua estrutura usando uma única matéria-prima.

O desenvolvimento de experimentos permitiu evidenciar a necessidade de dispor de instrumentos de medição para cada parâmetro de fabricação, e da necessidade de calibrar o *software* do EP, em relação aos parâmetros de processo por ele informados, constituindo limitações para uma adequada caracterização do produto final. Também foi evidenciada a necessidade de dispor de um sistema de aquisição de dados para registrar os seus parâmetros de fabricação, analisar a influência entre eles, e tomar decisões durante a fabricação. Contudo, essas melhorias não puderam ser implementadas no atual sistema computacional por causa da dependência dos algoritmos do *software* em relação ao relógio interno do computador, considerando que qualquer modificação neles, incluindo a adição de placas de aquisição de dados,

comprometeria os valores dos parâmetros de sinterização por ele informados. A solução final requererá a modificação dos atuais algoritmos e a mudança na atual estrutura de controle.

A presente dissertação também exigiu o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de temperatura utilizado na etapa de experimentação (ver o apêndice B8) e o desenvolvimento de uma nova versão do *software* Alpha (versão 66) com a implementação de todas as propostas geradas pela aplicação da metodologia (ver os apêndices B5 e B7).

A metodologia utilizada forneceu importantes subsídios durante a análise do EP, fornecendo uma estrutura organizada da informação gerada. Sua aplicação metódica e sistemática permitiu fornecer um tratamento individual e padronizado para cada um dos problemas, auxiliando no levantamento do conhecimento, na análise, na avaliação e na proposição de solução.

As principais dificuldades encontradas durante a aplicação da metodologia foram a falta de especificações e detalhamento dos problemas reportados e a falta de informação detalhada dos procedimentos utilizados durante a fabricação de peças.

Finalmente, para a elaboração de um projeto final de melhoria do EP deve se tomar em consideração: (i) o tipo de matéria-prima (matéria-prima especialmente desenvolvida para equipamentos de SLS ou pó moído pelos próprios pesquisadores), (ii) o objetivo da pesquisa (teste de misturação, fabricação de peças com repetitividade, garantir os valores dos parâmetros de fabricação, etc.), (iii) o tipo de ciclo de fabricação (com/sem aquecimento/preaquecimento da camada de pó), e (iv) o tipo de peça a fabricar (baseado em um único/múltiplos desenhos 2D, com/sem FGM).

A presente dissertação deixa como contribuições uma ampla fonte de informação e consulta relacionadas à máquina-protótipo (na forma de compilação de folhas de dados e manuais dos componentes comerciais, na forma de diagramas de processos, de funções, de componentes, de conexões elétricas, de comunicação, de fluxo de dados, e do leiaute das placas eletrônicas, entre outras), relacionadas aos procedimentos de preparação, operação e fabricação, e relacionadas ao princípio de funcionamento do equipamento, informações antes inexistentes e que encontram-se agora disponíveis nesta dissertação.

Também deixam-se como contribuição as análises dos 51 problemas identificados nas teses e dissertações que têm utilizado o equipamento e as propostas para sua redução ou eliminação, as análises das fontes da variabilidade do processo, as análises dos parâmetros de

fabricação utilizados e dos requeridos para uma completa especificação do processo, além da quantificação de sua variabilidade, propondo soluções para sua redução ou eliminação, assim como a equação da potência do Laser em função do sinal de referência ao controlador, a equação da densidade de energia para o EP, e a equação do deslocamento da mesa elevadora em função do número de pulsos.

## 6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como contribuição para trabalhos futuros, tanto para os que utilizem o EP quanto para os que desenvolvem projetos para sua melhoria, deixam-se as seguintes recomendações:

- Desenvolver alternativas para um sistema de carregamento de um depositador de pó, com silo acumulador, para fabricação de peças com FGM por variação do material.
- Desenvolver alternativas para um sistema de deposição de pó baseado em um rolo compactador e divisores para FGM.
- Pesquisar a fabricação de peças com FGM, através da variação da potência do feixe do Laser em uma mesma camada e da variação da distância entre spot consecutivos (vertical e horizontal) em uma mesma camada.
- Aplicar a metodologia descrita no capítulo III na análise de equipamentos de fabricação, em fase de desenvolvimento, não projetados com metodologia de projeto de produtos.



**REFERÊNCIAS**

AGUIAR, S. **Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao programa seis sigma**. Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial, 2002.

ALCÂNTARA, B.B. et. al. **Desenvolvimento de software para o controle do processo de sinterização seletiva a laser**. Xi Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica. Nova Friburgo: Instituto Politécnico da Universidade do Estado de Rio de Janeiro, 2004.

ALCÂNTARA, B.B. **Software Alpha64**. Versão 1.0.53. Arquivo executável, 2006.

AMARAL, D. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

CIMJECT. **Web Site Cimject**. Disponível em: <<http://www.cimject.ufsc.br/inicial.htm>>. Acesso em: junho, 2010.

COSTA, L.; VILAR, Rui. **Laser powder deposition**. Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited. n. 15/04, p.264-279., 2009.

CHEN, Y.Z.; LIN, X.Y.; WANG, Z.X. **Antiplane elasticity crack problem for strip of FGM with mixed boundary condition**. Mechanics research communications. Elsevier Ltd. n. 37, p.50-53, 2010.

CHIU, W.K.; YU, K.M. **Direct digital manufacturing of three-dimensional functionally graded material objects**. Computer-aided design, Elsevier Ltd. n. 40, p.1080-1093, 2008.

CHUA, C.K.; LEONG, K.F.; LIM, C.S. **Rapid prototyping: Principles and Applications**, 2 ed. Singapore: World Scientific Publishing Co. Ltd., 2004.

DABBAS, F. **Sinterização seletiva a laser de compósitos poliamida/hidroxiapatita e polietileno/hidroxiapatita com gradientes funcionais aplicáveis em engenharia de tecidos.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2006.

DAS, S. Selective laser sintering of polymers and polymer-ceramic composites. Ln: B. Bidanda; P.J. Bártolo (eds.) **Virtual prototyping & bio manufacturing in medical applications**, Springer, 2008. cap. 11, p. 229-260.

DEAN, A.; VOSS, D. **Design and analysis of experiments**, New York: Springer-Verlag, 1999.

DINSMORE, P.C.; CABANIS-BREWEN, J. **AMA manual de gerenciamento de projetos** (título original: The AMA handbook of project management). Rio de Janeiro: Brasport livros e multimedia Ltda., 2009.

EVANS, J.R.G.; YANG Sh. **A multi-component powder dispensing system for three dimensional function gradients.** Materials Science and Engineering A, n. 379, p. 351-359, 2004.

EVANS, J.R.G.; YANG Sh. **Metering and dispensing of powder; the quest for new solid freeforming techniques.** Powder Technology, n. 178, p. 56-72, 2007.

EVANS, J.R.G.; YANG Sh. **Solid freeforming and combinatorial research.** Tsingua Science And Technology, vol. 14, n. S1, p. 94-99, 2009.

FAIßT, B. **Laser marking on plastics.** Photonik international. Trade Journal on optical technologies. 2008/1. Stuttgart: AT-Fachverlag GmbH. p. 20-23. 2008.

GALVÃO, C.; MENDONÇA, M. **Análise e melhoria de processos.** , Rio de Janeiro:Qualitymark Ed., 1996.

GEBHARDT, Andreas. **Rapid prototyping.** 1 ed. Munich: Carl Hanser, 2003.

GERMAN, R.M. **Liquid phase sintering**. New York: Plenum Press, 1985.

GIBSON, I.; SHI, D. **Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process**. Rapid Prototyping Journal, vol.3, n.4, p.129-136, 1997.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**. 4 ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

HO, H.C.H; GIBSON, I; CHEUNG, W.L. **Effects of energy density on morphology and properties of selective laser sintered polycarbonate**. Journal of Materials Processing Technology 89-90, p.204-136, 1999.

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia: portaria INMETRO nº 029 de 1995**. INMETRO, SENAI. ed. 5. Rio de Janeiro: Ed. SENAI, 2007.

JACOBS, G. 3D Scanning: Understanding spot size for laser scanning. **Professional Surveyor magazine**. V. 26, Issue 10, Oct, 2006.

JUNIOR, I.M. (cord.) et al. **Gestão da qualidade**. Serie gestão empresarial. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2003.

KANG, S.L.; **Sintering: densification, grain growth & microstructure**, Elsevier Butterworth-Heinemann: Burlington., 2005.

KARAPATIS, N.P.; VAN GRIETHUYSEN, J.P.S.; GLARDON, R. **Direct rapid tooling: A review of current research**. Rapid Prototyping Journal, V.4, n.2, p. 77-89, 1998.

KIEBACK, B.; NEUBRAND, A.; RIEDEL, H. **Processing techniques for functionally graded materials**. Materials science and engineering A, Elsevier B.V. n. 362, p.81-105, 2003.

KIM, H.J, et al. Fabrication of functionally graded bio materials by nano composite deposition system. **Virtual and rapid manufacturing: Advanced research in virtual and rapid prototyping**. London: Taylor & Francis group, 2008.

**KLAUSS, P. Desenvolvimento de dispositivos poliméricos implantáveis para a liberação de fármaco fabricados por sinterização seletiva a laser.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2010

KLAUSS, P.; PAGGI, R. A. Entrevista [Nov. 2009]. Entrevistador: Frank Ajata. Entrevista concedida para o projeto da análise do equipamento protótipo de SLS do laboratório de Cimject/UFSC. (61 min). Florianópolis.

**KRUTH J. P. et al. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing.** Elsevier. Annals of the CIRP. V. 56, n. 2, 2007.

**KULMAN, C. Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes funcionais.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2006.

**KUMAR et al. Direct-write deposition of fine powders through miniature hopper-nozzles for múlti-material solid freeform fabrication.** Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited. V. 10, n. 1, p. 14-23, 2004.

**LEITE, J. L. Sinterização seletiva a laser de blendas de PA12/PEAD, PA6/PA12 e PMMA/PS com gradientes funcionais aplicáveis em componentes anti-fricção.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2007.

**LEITE, A. Gráfico de Pareto.** CEDET – Centro de desenvolvimento profissional e tecnológico. Atualizado em 22/03/2010. Disponível em: <[www.cedet.com.br](http://www.cedet.com.br)>. Acesso em: 28 Sep. 2011.

**LEVY, G.N.; SCHINDEL, R.; KRUTH, J.P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies: State of the art and future perspectives.** Elsevier. CIRP Annals. Manufacturing technology. V. 52, n. 2, p. 589-609. 2003.

LÜ, L.; FUH, J.; WONG Y.S. **Laser-induced materials and processes for rapid prototyping**, Massachusetts: Kluwer academic Publishers, 2001.

Measurement Computer. **Analog output board – User’s manual**. v. 6. 2000. 24p. Disponível em: <<http://www.synrad.com>>. Acesso em: 27 abr. 2011.

MIYAMOTO, Y. et al. **Functionally graded materials: design, processing and applications**, Materials technology series. Massachusetts: Kluwer academic publishers, 1999.

MONTGOMERY, D.C.; **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. (título original: Introduction to statistical quality control, fourth edition) ed. 4. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos editora S.A., 2001.

NORTON; R.L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. (título original: Machine design – An integrated approach) ed. 2. São Paulo: Artmed Editora S.A., 2000.

PAGGI, R. A. **Sinterização seletiva a laser de compósitos com gradiente funcional entre poliamida e nanotubos de carbono aplicáveis no setor aeroespacial**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2008.

PAGGI, R. A. **Rodrigo Acácio Paggi**: entrevista [maio 2010]. Entrevistador: Frank Ajata. Entrevista concedida para o projeto da análise do equipamento protótipo de SLS do laboratório de Cimject/UFSC. (45 min). Florianópolis.

PAHL, G. et al. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. (título original: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung) ed. 1. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 2005.

PARAMESWARAN, V.; SHUKLA, A. **Processing and characterization of a model FGM**. Journal of materials science. Kluwer academic publishers. n. 35, p.21-29, 2000.

PEREIRA, L. **Manual: Placa controladora de motores – Máquina Alpha**, (documento interno). Florianópolis, 2003.

ROBLEDO, H. **Guia médica de la ciencia del láser & anestesia local**. Vigo: Asociación Española del laser estético, 2011.

SALMORIA, G. V. et al. **Rapid manufacturing of polyethylene parts with controlled pore size gradients using selective laser sintering**. Materials Research, v. 10, p. 211-214, 2007.

SANTOS, F. C. Dos. **Desenvolvimento de software para equipamento de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2009.

SEARS, J. W. **Direct Laser Powder Deposition – “State of the art”** New York: Kapl, Inc., Nov. 1999.

STEEN, W.; MAZUMDER, Jyotirmoy. **Laser material processing**. London: Springer-Verlang London Limited, 2010.

Synrad Inc. **UC-1000 Universal laser controller – Operation manual**. (Revised April 1998) Mukilteo: [s.n.], 1998. 2p. Disponível em: <<http://www.synrad.com>>. Acesso em: 10 maio 2011.

Synrad Inc. **SH series marking head: Operation and service manual**. Release: v. 1.2 (1/23/96), Bothell: [s.n.], 1996. 40p.

Synrad Inc. **Synrad’s series 48**. Washington: [s.n.], [200-?]. 2p. Disponível em: <<http://www.synrad.com/48series>>. Acesso em: 29 mar. 2011.

Synrad Inc. **Series 48 lasers – Operator’s manual**. v. 5.4. Release: (12/20/02), Mukilteo: [s.n.], 2002. 68p. Disponível em: <<http://www.synrad.com>>. Acesso em: 27 abr. 2011.

Society of Manufacturing Engineers. **User’s Guide to Rapid Prototyping**, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2004.

VENUVINOD, P.; MA, W. **Rapid prototyping: Laser-based and other technologies**. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2004.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: Tecnologias e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

WERKEMA, M.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. vol. 2. Série ferramentas da qualidade. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de engenharia da UFMG, 1995.

WERKEMA, M. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. vol. 8. Série ferramentas da qualidade. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de engenharia da UFMG, 1996.

WING, Z.N.; HALLORAN, J.W. **Dry powder deposition and compactation for functionally graded ceramics**. American Ceramic Society. Berlin: Springer-Verlag. n. 89, p.3406-3412, 2006.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2009: State of the industry annual worldwide progress report**. Colorado: Wohlers associates, Inc., 2009.

WU, B. et al. **Solid free-form fabrication of drug delivery devices**. Journal of controlled release, Elsevier B.V. n. 40, p.77-87., 1996.

YOKOYAMA, T. Fluidity of powder. In: LINOYA, K.; GOTOH, K.; HIGASHITANI, K. (Ed.) **Powder Technology Handbook**. New York: Marcel Dekker Inc. 1991

## **APÊNDICE A**

**Documentos gerados pela aplicação da metodologia na etapa 1**





## APÊNDICE A1

Questionário:

Tarefa 1.1.1

**Documentação do Sistema SLS de CIMJECT**

O seguinte documento tem por finalidade recolher informação da documentação utilizada na fabricação de peças no atual sistema SLS do laboratório CIMJECT/UFSC e da capacitação dos seus usuários. O presente questionário forma parte da metodologia de pesquisa em andamento “*Análise de um sistema-protótipo de sinterização seletiva a Laser para a manufatura de peças com gradação funcional de material visando repetitividade dos processos*”, trabalho orientado pelos professores C.A. Martin e C. H. Ahrens.

Preencher a opção mas acertada segundo sua experiência pessoal:

1) Há quanto tempo você trabalha com o sistema SLS do laboratório de CIMJECT?

- Menor a 6 meses.
- Entre 6 e 12 meses.
- Mais de 12 meses.

2) Que tipo de peças em polímero tem você fabricado no sistema SLS?

- Peças com geometrias simples (quadrado, triangulo, circulo).
- Peças com geometrias complexas.
- Peças com material homogêneo. Indicar material:
- Peças com gradiente de material. Indicar materiais ou misturas:
- Peças fabricadas com pré-aquecimento prévio.
- Indicar a temperatura de preaquecimento:  °C
- Outro. Especificar:

3) Indique o tipo de documentos (fornecidos pelo fabricante) que você conhece?

- Catálogo do sistema, de peças ou partes do sistema.
- Manual da operação do sistema ou equipamentos do sistema.
- Não conheço nenhum tipo de documento fornecido pelo fabricante.

4) Indique quais dos seguintes tipos de documentação não fornecidas pelo fabricante você conhece do sistema SLS?

- Manual da operação do sistema.
- Manual ou instrutivo dos procedimentos.
- Diagrama dos processos ou dos sistemas envolvidos.
- Diagramas dos sistemas elétricos.
- Outro. Especificar:

5) Além dos documentos descritos anteriormente, que outros documentos têm lido respeito do funcionamento do sistema?

- Manuais de equipamentos similares.
- Dissertações/Tésis. Identificar:
- Outros. Especificar:

6) De quem você recebeu a qualificação para operar o equipamento SLS?

- Aluno de pós-graduação (mestrando/doutorando).
- Mestrado / Doutorado.
- Engenheiro.
- Professor do laboratório de CIMJECT.
- Outro. Especificar:
- Não recebi capacitação.

7) Se recebeu capacitação no uso do sistema, quanto foi o tempo de duração?

- Menos de 1 hora.
- Entre 1 e 5 horas.
- Entre 10 a 20 horas.
- Mais de 20 horas.

Indicar o ano da capacitação:

8) Como é que você capacitou-se pessoalmente para operar o equipamento SLS?

- Leitura de documentação fornecida pelo fabricante.
- Leitura de documentação fornecida pelo laboratório CIMJECT.
- Leitura de Dissertações/Tesis sobre o tema.
- Por meio de pesquisas na internet sobre equipamentos similares.
- Outros. Especificar:

9) No uso do equipamento SLS de CIMJECT, como se qualifica você?

- Usuário novo.
- Usuário intermediário.
- Usuário experiente.

Muito obrigado a você pela sua cooperação e o tempo dedicado no presente questionário.

Tabela A1: Resumo da evolução do equipamento-protótipo do laboratório Cimject (continua)

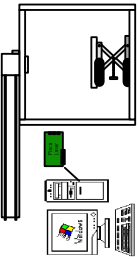
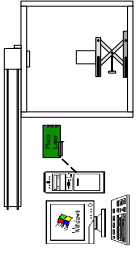
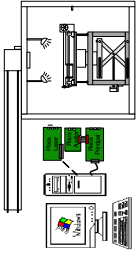
Projeto	Equipamento de gravação a Laser 2D	Equipamento de SLS-3D	Equipamento de SLS-3D com FGM e preaquecimento
Ilustração do EP			
Ano	2002	2004 (aprox.)	2006
Objetivo do Projeto	Gravação de uma imagem em chapas cerâmicas	Fabricação de peças poliméricas 3D por camadas	Fabricação de peças poliméricas 3D por camadas, com FGM e preaquecimento.
Função do Equipamento	Gravar uma imagem feita em um sistema CAD na superfície de uma chapa cerâmica	Fabricar peças poliméricas 3D por meio da sinterização de camadas de pó de acordo com um desenho 2D, feito em um sistema tipo CAD, para cada camada	Fabricar peças 3D poliméricas por meio da sinterização de camadas de pó e preaquecimento prévio, com variação gradual dos materiais constituintes, de acordo com um desenho 2D, feito em um sistema tipo CAD.
Elementos Principais	PC com <i>software</i> Lasercontrol Laser CO <sub>2</sub> Cabeçote de marcação Placa I/O digital/analógica Mesa elevadora	PC com <i>software</i> Alpha50 Laser CO <sub>2</sub> Cabeçote de marcação Placa I/O digital/analógica Mesa elevadora	PC com <i>software</i> alpha64, Laser CO <sub>2</sub> Cabeçote de marcação, Placa I/O digital/analógica, Plataforma fixa e de construção, Mesa elevadora deslocada por motor, Depositador de pó com componente divisor, Sistema de deposição de camadas, Placa de controle (motores), Lâmpadas IR, Resistência elétrica para aquecimento, Controlador de temperatura.

Tabela A1: Resumo da evolução do equipamento-protótipo do laboratório Cimject (conclusão)

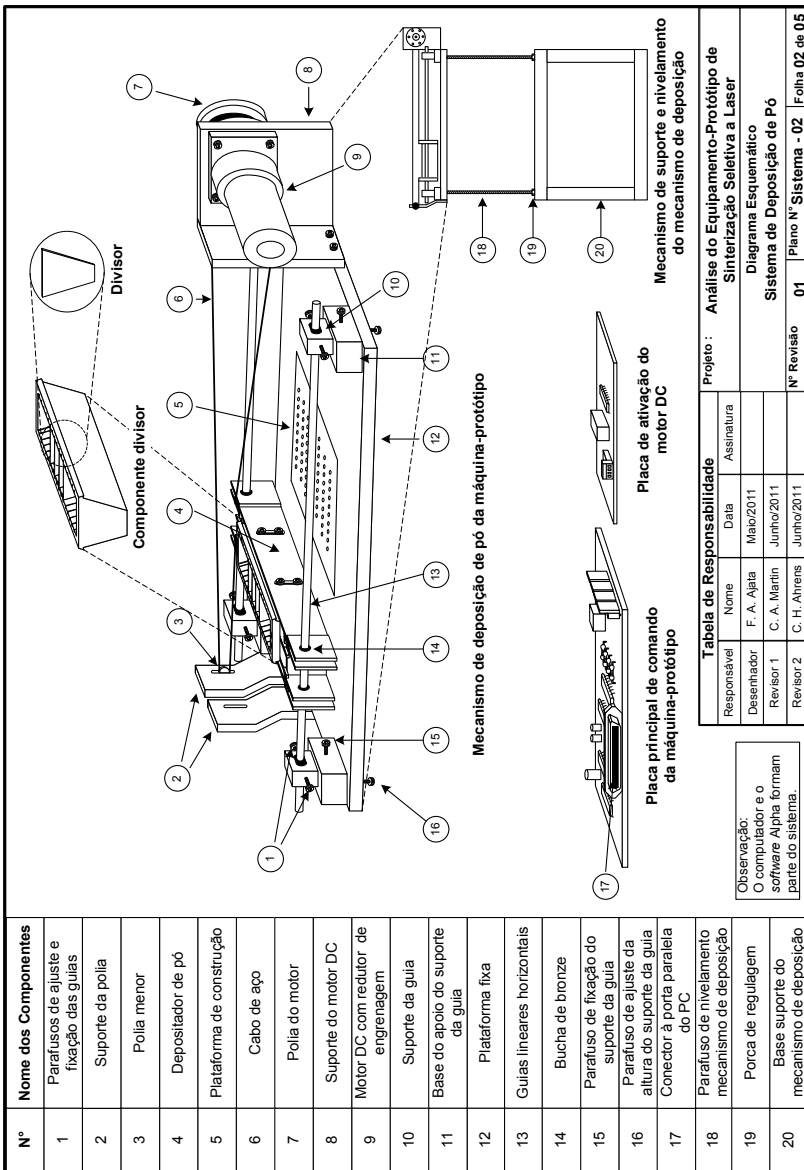
Projeto	Equipamento de gravação a laser 2D	Equipamento de SLS-3D	Equipamento de SLS-3D com FGM e preaquecimento
Desenvolvimentos feitos	Interface de usuário para ingresso dos parâmetros de processo. Estrutura de suporte para o Laser e o cabeçote de marcação.	<i>Software</i> da máquina (Alpha50).	Sistema de deposição de pó. Componente divisor. Sistema de aquecimento com resistências elétricas. Placa de controle dos motores. <i>Software</i> da máquina com melhoras (Alpha64). Câmara de aquecimento isolada.
Descrição das peças fabricadas	Não fabrica peças, só grava.	Peças 3D em múltiplas camadas, em um só material polimérico.	Peças 3D em múltiplas camadas, com variação gradual discreta (largura ajustável) de material polimérico por camada e com preaquecimento.
Controle manual	Posicionamento x,y da chapa cerâmica Regulagem da distância de trabalho	Deposição do pó. Espalhamento de pó. Posicionamento da mesa elevadora.	Ajuste do espaçamento e deposição do pó no depósito. Liga/desliga: lâmpadas IR.
Controle automático	Controle da trajetória do feixe do Laser, no cabeçote de marcação, de acordo com a imagem prévia. Regulagem da potência do Laser.	Controle da trajetória do feixe do Laser, no cabeçote de marcação, de acordo com um desenho prévio. Regulagem da potência do Laser.	Controle da trajetória do feixe do Laser, no cabeçote de marcação, de acordo com um desenho prévio. Regulagem da potência do Laser. Deslocamento do depósito de pó. Deslocamento da PC. Controle da temperatura por meio de resistências elétricas
Fonte	Prof. Alexandre Lago (LabMat/UFSC) Kulman (2006) Leite (2007) Reuniões de trabalho.	Reuniões de trabalho.	Dabbas (2006) Kulman (2006)

Tabela A2: Ferramenta 5W1H - Subprocessos que acontecem no EP

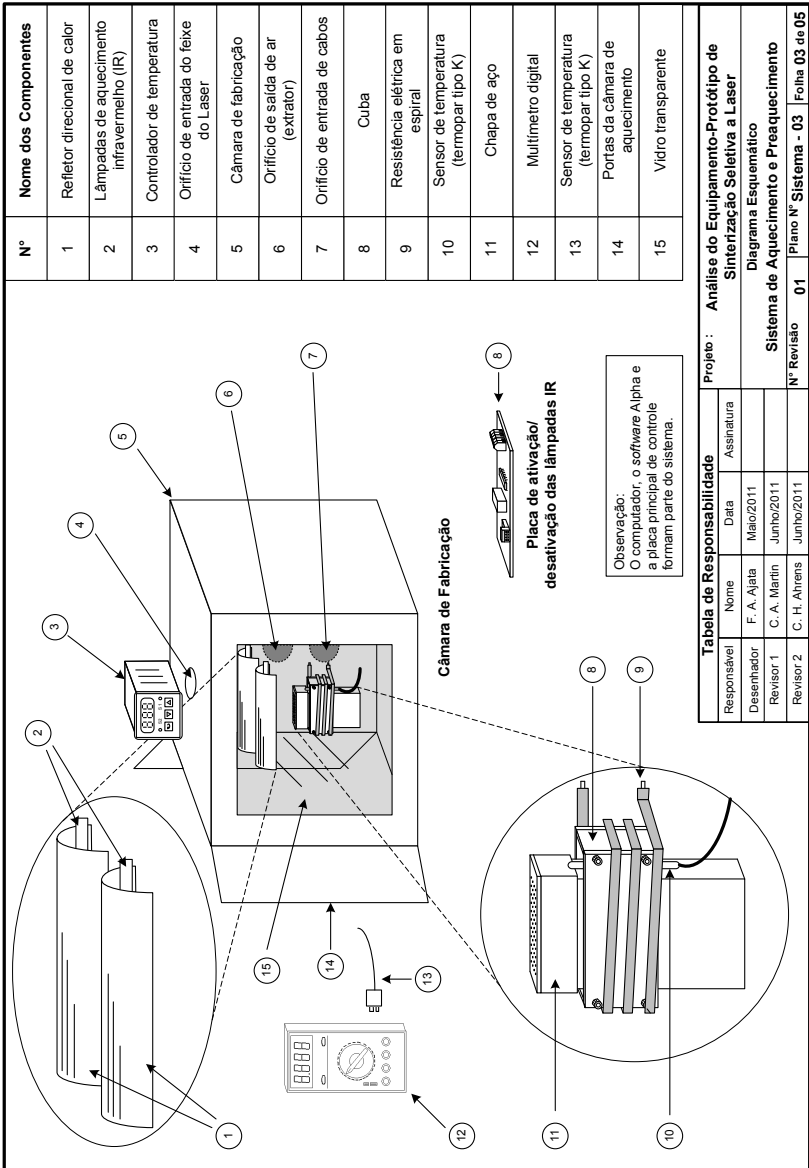
Que (What)	Quem (Who)	Quando (When)	Onde (Where)	Por Que (Why)	Como (How)
Que subprocessos acontecem no EP?	Que ou quem realiza o subprocesso ?	Quando ocorre o subprocesso?	Onde ocorre o subprocesso ?	Por que ocorre o subprocesso ?	Como é realizado o subprocesso ?
Enchimento de material no depositador	O operador	No início do processo e cada vez que o depositador fica sem pó	No depositador de pó	Porque é a matéria de entrada ao processo	Manualmente, por meio de uma espátula
Deposição de uma camada	O depositador de pó	Quando a opção é clicada na tela do PC, e o depositador estiver com pó	Sobre a plataforma de construção	Porque o processo sinteriza camada por camada	Pelo deslocamento do depositador e pela ação da gravidade
Aquecimento da plataforma de construção	O controlador de temperatura	Durante todo o processo de construção	No redor da cuba de construção	Para requerer uma menor energia do laser e evitar empenamentos e distorções	Pela geração de calor de uma resistência elétrica
Preaquecimento da camada de pó	As lâmpadas IR	Quando a opção é clicada na tela do PC, depois de gerada a camada e antes da sinterização	Sobre a plataforma de construção	Para acelerar o aquecimento sobre a camada devido à abertura das portas	Pelo calor gerado pela radiação das lâmpadas IR
Sinterização do pó	O Laser de CO <sub>2</sub>	Quando a opção “gravar” é clicada na tela do PC	Sobre a plataforma de construção	Para unir as partículas de pó poliméricas	Pela energia calorífica gerada pelo feixe do Laser
Deslocamento do feixe do Laser	O cabeçote de marcação	Quando a opção “gravar” é clicada na tela do PC	No cabeçote de marcação	Para sinterizar o pó da camada segundo o desenho do PC	Pela refração do feixe do Laser em um jogo de espelhos
Deslocamento da plataforma de construção	A mesa elevadora	Quando a opção “movimentar a plataforma” é clicada na tela do PC	No cabeçote de marcação	Para sinterizar o pó da camada segundo o desenho do PC	Pela refração do feixe do Laser em um jogo de espelhos
Aspiração de pó	O usuário	Quando a peça esteja completamente construída	Sobre a plataforma de construção	Para retirar o pó sobrando	Com o uso de uma aspiradora externa
Retiro da peça da plataforma	O usuário	Quando a peça esteja completamente aspirada	Na plataforma de construção	Para pós-processamento	Retirando a plataforma de construção junto ao pó remanente

<b>PLANO DE FABRICAÇÃO</b>																																																	
Projetista : _____																																																	
Nome arquivo : _____																																																	
Data:                    /                    /																																																	
<b>1.0 Informação básica: (Preencha os espaços correspondentes)</b>																																																	
1.1 Tipo de peça a fabricar: <input type="checkbox"/> Sem FGM <input type="checkbox"/> Com FGM	1.2 Tipo de geometria : <input type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Complexas																																																
1.3 Uso de divisores? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	1.4 Número de divisores _____ Espaçamento                    _____																																																
1.5 Aquecimento previo? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	1.6 Temp. Plataforma _____ [°C] 1.7 Temp. Ambiente                    _____ [°C] 1.8 Temp. Resf. Laser                    _____ [°C]																																																
1.9 Espessura das camadas da peça : _____ [mm]																																																	
1.10 Direção do FGM: <input type="checkbox"/> Eixo X <input type="checkbox"/> Eixo Z		1.11 Estratégia de varredura do Laser <input type="checkbox"/> .prezigV <input type="checkbox"/> .prezigH																																															
1.12 Dimensão <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">da base</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">da peça</div> </div>																																																	
Comprimento                    _____ [mm]                    _____ [mm]																																																	
Largura    _____ [mm]                    _____ [mm]																																																	
Espessura    _____ [mm]                    _____ [mm]																																																	
1.13 Rango da granulometria : _____ - _____ [mm]																																																	
1.14 Material da base : _____																																																	
1.15 Distância de trabalho : _____ [mm]																																																	
<b>2.0 Para fabricação de peças sem FGM</b>																																																	
Material a utilizar : _____																																																	
Potência do laser : _____ [%]																																																	
Velocidade do feixe do Laser : _____ [mm/s]																																																	
N° camadas a fabricar : _____																																																	
Distancia entre divisores : _____ [mm] (100 mm por defeito)																																																	
<b>3.0 Para fabricação de pecas com FGM ( Eixo X )</b>																																																	
<b>Parâmetros de fabricação</b>																																																	
Material base : _____																																																	
Material de adição : _____																																																	
Velocidade do feixe do Laser : _____ [mm/s]																																																	
N° de camadas a fabricar : _____																																																	
N° de misturas requeridas : _____																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Subdepósito</th> <th style="width: 15%;">Separação [mm]</th> <th style="width: 15%;">Material Base [%]</th> <th style="width: 15%;">Material de Adição [%]</th> <th style="width: 15%;">Potência Laser [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					Subdepósito	Separação [mm]	Material Base [%]	Material de Adição [%]	Potência Laser [%]	1					2					3					4					5					6					7					8				
Subdepósito	Separação [mm]	Material Base [%]	Material de Adição [%]	Potência Laser [%]																																													
1																																																	
2																																																	
3																																																	
4																																																	
5																																																	
6																																																	
7																																																	
8																																																	



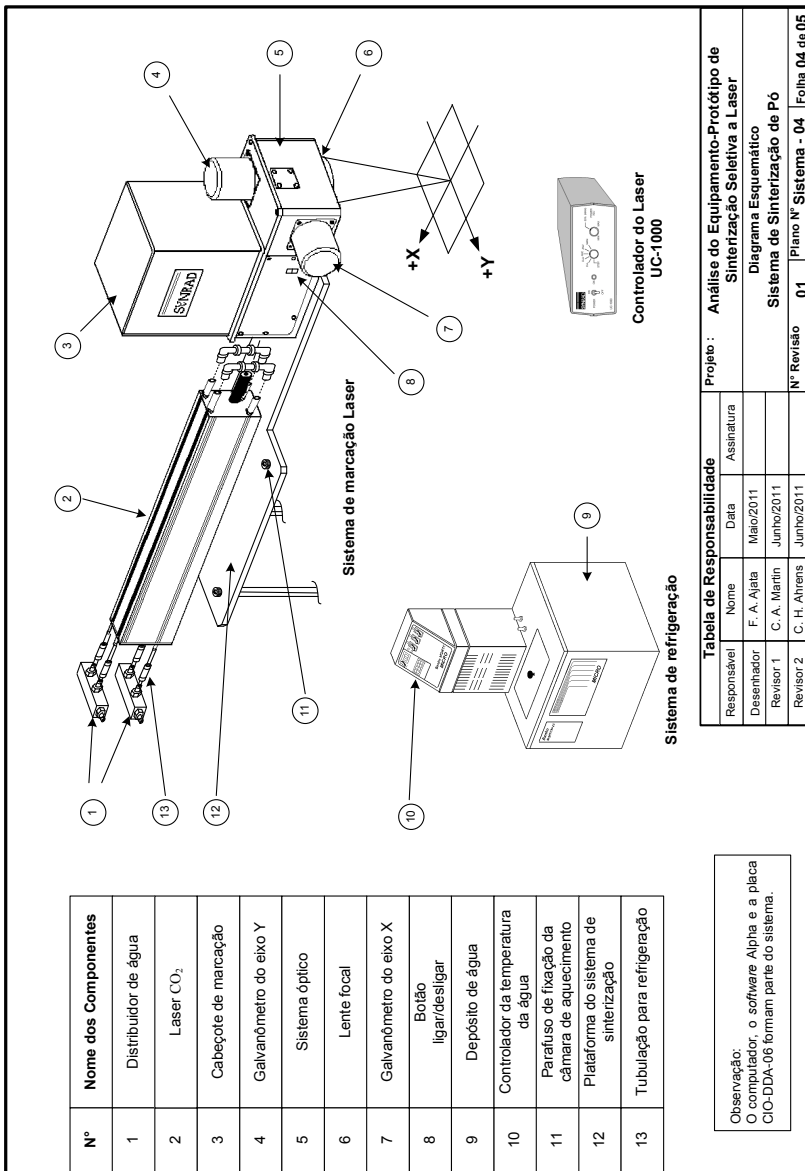


N°	Nome dos Componentes
1	Parafusos de ajuste e fixação das guias
2	Suporte da polia
3	Polia menor
4	Depositor de pó
5	Plataforma de construção
6	Cabo de aço
7	Polia do motor
8	Suporte do motor DC
9	Motor DC com redutor de engrenagem
10	Suporte da guia
11	Base do apoio do suporte da guia
12	Plataforma fixa
13	Guias lineares horizontais
14	Bucha de bronze
15	Parafuso de fixação do suporte da guia
16	Parafuso de ajuste da altura do suporte da guia
17	Conector à porta paralela do PC
18	Parafuso de nivelamento mecanismo de deposição
19	Porca de regulagem
20	Base suporte do mecanismo de deposição



N°	Nome dos Componentes
1	Refletor direcional de calor
2	Lâmpadas de aquecimento infravermelho (IR)
3	Controlador de temperatura
4	Orifício de entrada do feixe do Laser
5	Câmara de fabricação
6	Orifício de saída de ar (extrator)
7	Orifício de entrada de cabos
8	Cuba
9	Resistência elétrica em espiral
10	Sensor de temperatura (termopar tipo K)
11	Chapa de aço
12	Multímetro digital
13	Sensor de temperatura (termopar tipo K)
14	Portas da câmara de aquecimento
15	Vidro transparente

Projeto : Análise do Equipamento-Protótipo de Sinterização Seletiva a Laser		
Diagrama Esquemático		
Sistema de Aquecimento e Preaquecimento		
N° Revisão	01	Plano N° Sistema - 03 Folha 03 de 05



N°	Nome dos Componentes
1	Plataforma de construção
2	Chepa de aço
3	Mesa elevadora (plataforma móvel)
4	Suporte magnético
5	Relógio comparador
6	Parafuso para ajuste de nível
7	Engrenagem
8	Motor de passo
9	Suporte do motor de passo
10	Chepa tubulada
11	Conector da porta paralela do computador

**Mecanismo de deslocamento da plataforma de construção**

**Placa principal da máquina-protótipo**

Tabela de Responsabilidade		Projeto : Análise do Equipamento-Protótipo de Sinterização Seletiva a Laser	
Responsável	Nome	Data	Assinatura
Desenhador	F. A. Ajala	Maio/2011	
Revisor 1	C. A. Marth	Junho/2011	
Revisor 2	C. H. Ahrens	Junho/2011	

Sistema de Deslocamento da Plataforma de Construção  
N° Revisão 01 | Plano N° Sistema - 05 | Folha 05 de 05

Observação:  
O computador, o software Alpha e a placa principal de controle formam parte do sistema.

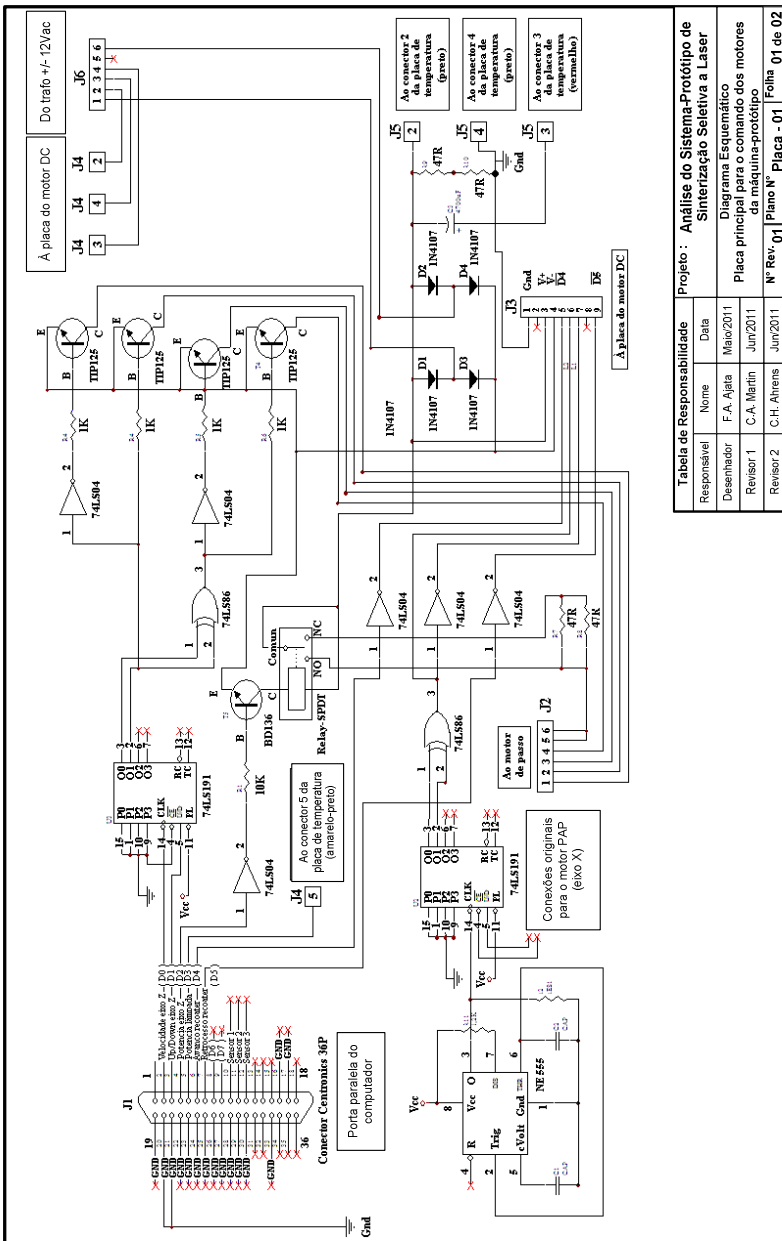


Tabela de Responsabilidade		Projeto : Análise do Sistema-Protótipo de Sintonização Seletiva a Laser	
Responsável	Nome	Data	
Desenhador	F.A. Ajala	Maior2011	Diagrama Esquemático
Revisor 1	C.A. Martin	Jun2011	Placa principal para o comando dos motores da máquina-protótipo
Revisor 2	C.H. Athens	Jun2011	Nº Rev.º 01   Plano Nº 01   Folha 01 de 02

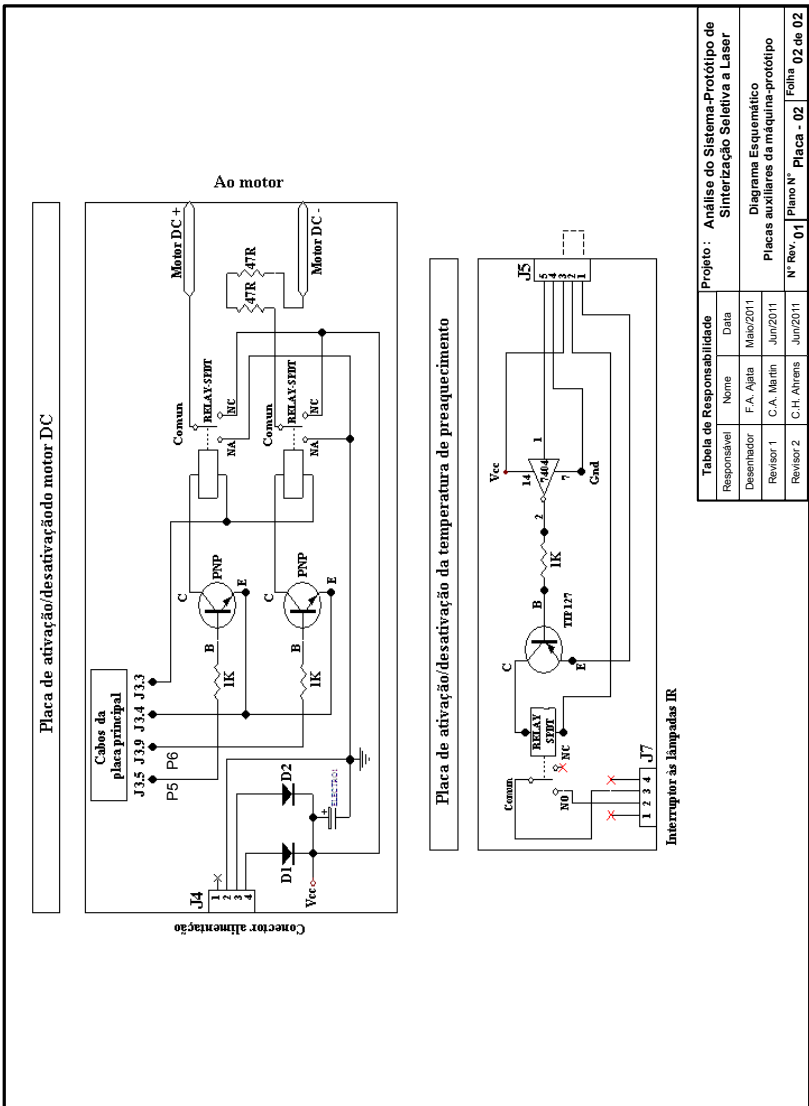
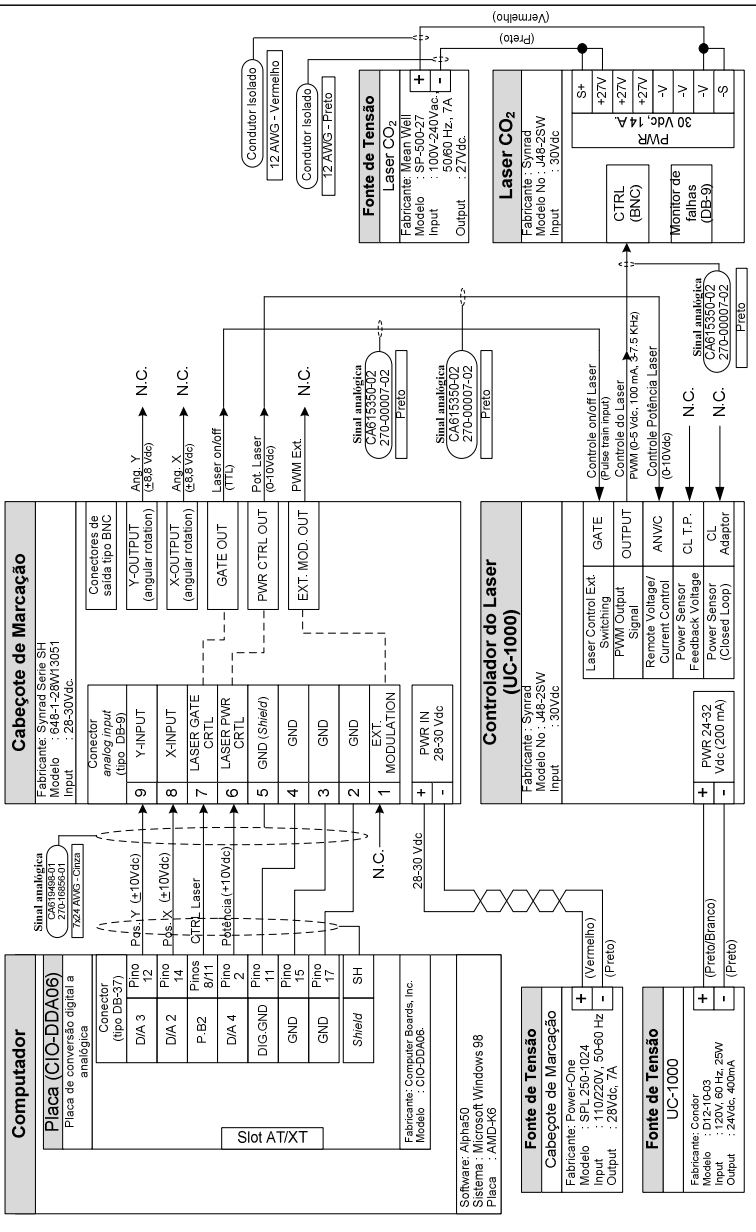
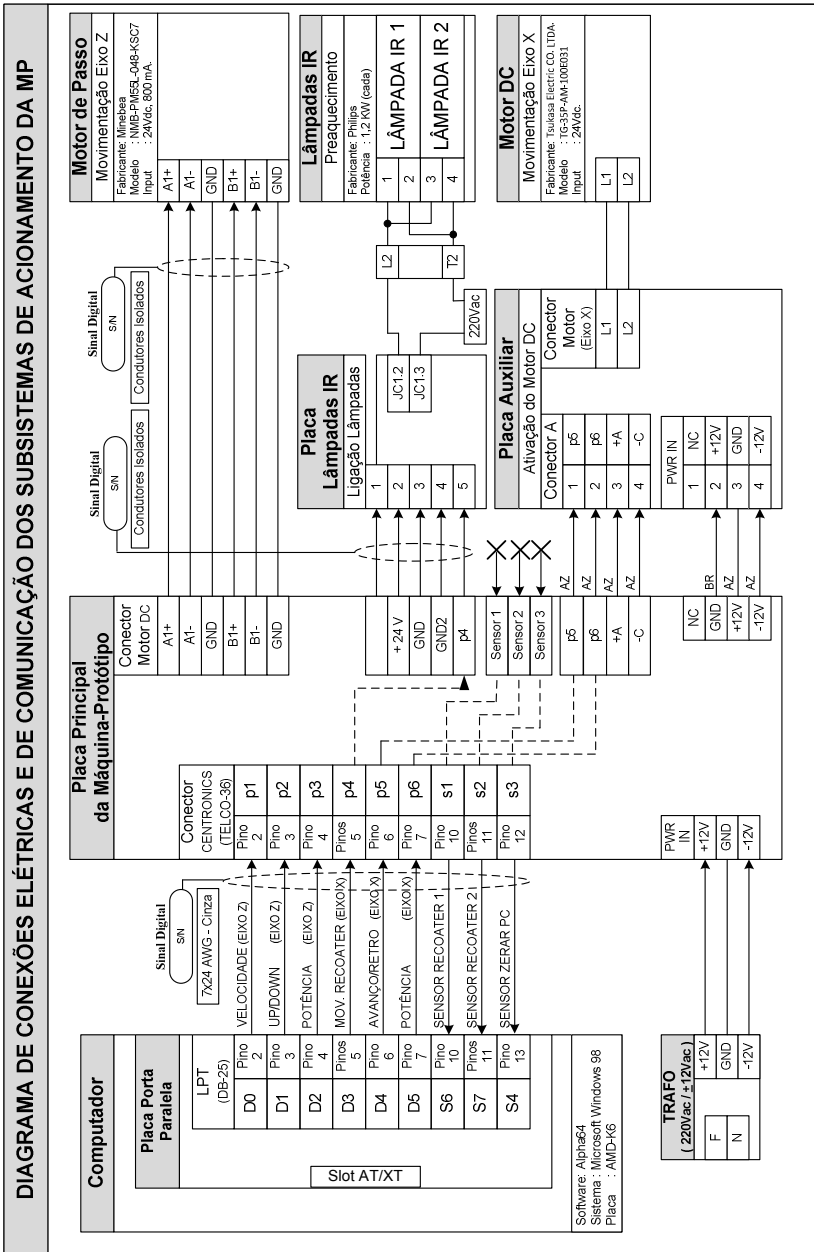


DIAGRAMA DE CONEXÕES ELÉTRICAS E DE COMUNICAÇÃO DO SUBSISTEMA DE SINTERIZAÇÃO









## **APÊNDICE B**

**Documentos gerados pela aplicação da metodologia na etapa 2**



## APÊNDICE B1

Tabela B1: Listagem dos experimentos desenvolvidos na etapa 2 da metodologia

<b>N° Exp.</b>	<b>Nome do experimento</b>
1.1.1	Medição do tempo requerido para: encher o depositador com divisores para FGM.
1.2.1	Determinação da quantidade de matéria-prima: a) requerida para encher completamente o depositador; b) da primeira camada depositada sobre a PC; c) espalhada fora da PC, acima da plataforma fixa; d) escorregada baixo a PF; Para diferentes alturas do depositador, em relação à PF.
1.2.2	Determinação do pó acumulado para 10 deslocamentos de avanço e retrocesso do depositador, para diferentes alturas em relação da PF.
1.2.3	Repetição do exp 1.2.1 e 1.2.2 com uma redução da diferença entre a área interior da PF e a área da PC.
1.2.4	Determinação do tempo de abertura das portas e o número de divisões do depositador e a largura dos divisores
1.2.5	Determinação do mínimo volumem de pó para gerar uma camada base.
1.2.6	Determinação do mínimo volumem de pó para gerar uma camada de 200 um.
1.2.3	Determinação do número de camadas geradas com o depositador completamente enchido (espessura de 200 um).
2.1.1	Determinação da velocidade de avanço e retrocesso do depositador, para diferentes condições de carga.
2.1.2	Determinação do deslizamento lineal do depositador para diferentes condições de carga.
2.1.3	Determinação da força requerida para deslocar o depositador em avanço e retrocesso, para diferentes condições de carga.
3.1.1	Medição da espessura da camada de pó depositada.
3.1.2	Determinação da influência do pré-processamento do pó na deposição.
3.2.1	Medição da distância entre a superfície da PF e a borda inferior da régua niveladora.
3.3.1	Caracterização da superfície de uma camada de pó nivelada.
3.3.2	Caracterização de uma camada de pó nivelada, com FGM.
3.3.3	Medição da largura numa faixa de 10 mm.
4.1.1	Determinação da velocidade e do tempo de aquecimento e resfriamento da câmara de aquecimento e PC produto da ação da resistência elétrica.
4.1.2	Determinação da oscilação da temperatura em torno a uma temperatura de referência produto da ação do controlador de temperatura sobre a resistência elétrica.

4.1.3	Variação da temperatura sobre a PC produto da ação da resistência elétrica.
4.1.4	Determinar a influência da ligação do extrator de ar na temperatura no interior da câmara de aquecimento, com a resistência elétrica ligada.
4.1.5	Determinação da velocidade de aquecimento e resfriamento da câmara de aquecimento produto da ação conjunta das resistências elétricas e das lâmpadas IR, simulando o processo de aquecimento e preaquecimento.
4.1.6	Determinação da variação da temperatura no interior da câmara de aquecimento segundo o tempo de abertura das portas, produto da ação das resistências elétricas.
4.1.7	Determinação da redução da temperatura no interior da câmara, produto da ligação do soprador da lente focal do cabeçote de marcação.
4.2.1	Determinação da velocidade de aquecimento e resfriamento da câmara de aquecimento produto da ação das lâmpadas IR
4.2.2	Variação da temperatura sobre a PC produto da ação das lâmpadas IR.
5.1.1	Medição do tempo de resfriamento do sistema de refrigeração do Laser, em torno a uma temperatura de referência.
5.1.2	Determinação do efeito da frequência de operação do controlador do Laser (UC-1000) no gravado dum desenho.
5.1.3	Avaliação das condições de operação dos dois controladores do Laser.
5.1.4	Medição do sinal de potência de saída do cabeçote de marcação (PWR CTRL OUT) e do sinal de ligação e desligação do Laser (Gate OUT).
5.1.5	Medição do sinal de potência de saída do controlador Laser UC-1000 (OUTPUT).
5.1.6	Medição da potência fornecida pelo Laser, para diferentes valores indicados pelo <i>software</i> Alpha.
5.1.7	Medição da corrente e tensão fornecida pela fonte de alimentação do Laser para uma condição determinada.
5.1.8	Medição das formas de onda desde a placa CIO-DDA06 até o Laser para uma condição de parâmetros estabelecida.
5.2.1	Determinação da relação entre o comprimento numa linha fornecida (em <i>pixels</i> ) e o comprimento da linha gerada (em mm), nos eixos X e Y.
5.2.2	Determinação da repetitividade na marcação de um desenho na PC.
5.2.3	Determinação do paralelismo e ângulo de rotação entre a PF e o sistema de espelhos.
5.2.4	Medição dos sinais de saída da placa CIO-DDA06 visando determinar: - a máxima voltagem do deslocamento horizontal (Pos.X) de saída da placa I/= D/A para um desenho conhecido; - a máxima voltagem do deslocamento vertical (Pos. Y) de saída da placa I/= D/A para um desenho conhecido. - a relação da potência selecionada no <i>software</i> Alpha50, com o sinal gerada pela placa I/0 - D/A (potência), para diferentes valores de parâmetros.

5.3.1	Determinação da distância de trabalho do cabeçote de marcação (distância focal)
5.3.2	Determinação do efeito da variação da distância de trabalho no dimensionamento da peça do teste - 5.2.2.
5.4.1	Medição do grau de redução de uma camada de pó (PA12) de espessura conhecida, para parâmetros conhecidos.
6.1.1	Determinação da relação de deslocamento por passo na subida e na descida da PC.
6.1.2	Determinação do deslocamento da PC, usando chapas duplas para nivelação nos cantos, para 10 deslocamentos do depositador e o deslocamento da própria PC.
6.1.2	Determinação do desnivelamento da PC respeito da PF
6.1.3	Determinação do efeito da temperatura sobre o relógio comparador.
7.2.1	Determinação da relação da janela principal de trabalho do módulo "controle alpha FGM" do <i>software</i> Alpha, e da área de gravação na PC.
7.2.2	Determinação da relação da janela especificada como "área de trabalho", do módulo "controle Alpha FGM" do <i>software</i> Alpha, e da sua área de gravação na PC.
7.2.3	Determinação da precisão teórica dos desenhos gravados, e do erro induzido pelo arredondamento da resolução.
7.3.1	Medição do tempo de gravação dum desenho de 10 mm x 10 mm, com o programa rodando em dois computadores diferentes.
7.4.1	Determinação da velocidade de gravação de um desenho de 50 mm x 50 mm.



## APÊNDICE B3

### Tipos de erros no pré-processamento de um modelo digital

(Referidos ao procedimento de pré-processamento de um modelo digital)

a) Erro de posição do desenho (na plataforma de construção):

Acontece quando: (i) o desenho desejado não encontra-se centrado na folha de trabalho (passo 3.3), e (ii) o desenho não encontra-se centrado em relação aos espaços em branco (ver figura B3.2).

O *software* Alpha centra a folha com o desenho BMP gerado pelo usuário, na tela de trabalho, antes da geração do arquivo TXT (com a estratégia da varredura do Laser), motivo pelo qual é preferível gerar um desenho centrado, do qual serão obtidos os valores da posição que serão salvos no arquivo de texto.

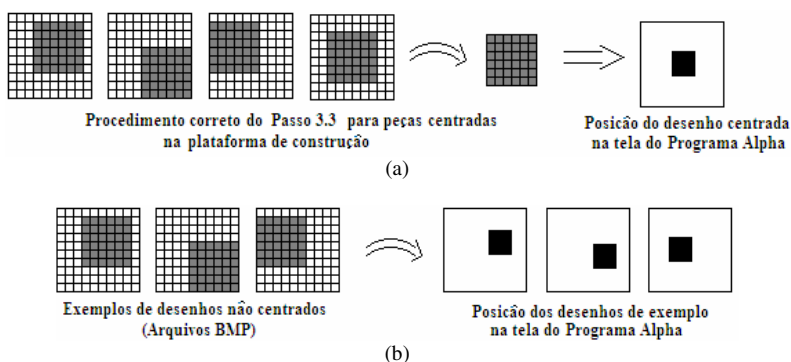


Figura B3.1: Procedimento para geração de desenhos centrados na PC (a) procedimento correto, (b) procedimento errado

Para construir uma peça a partir de desenhos 2D centrados, em relação a um eixo, não executar o passo 3,3 a fim que sejam usados as medidas projetadas no *software* CorelDraw, conforme ilustrado na figura a seguir:

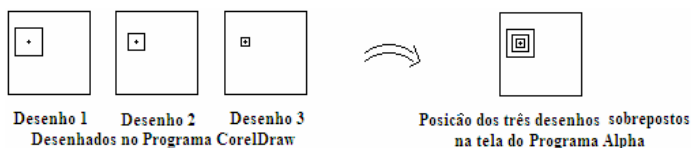


Figura B3.2: Procedimento para geração de desenhos em um mesmo eixo

b) Erro no dimensionamento (da camada):

Acontece quando: (i) a dimensão ou a resolução da folha de trabalho, no passo 2.2, são diferentes as especificadas; (ii) não é feito o desenho quadrado sem recheio, no passo 1.3, com as dimensões máximas da folha de trabalho.



APÊNDICE B4

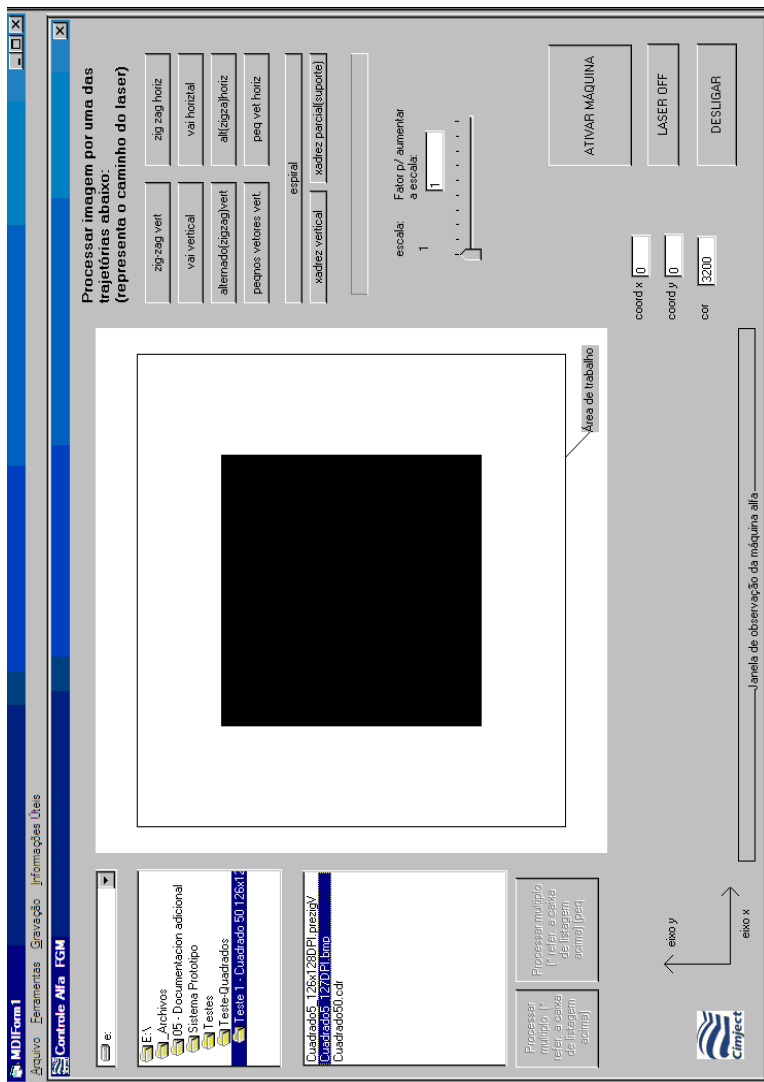


Figura B4.1 : Módulo de planejamento da trajetória do software Alpha64

## APÊNDICE B5

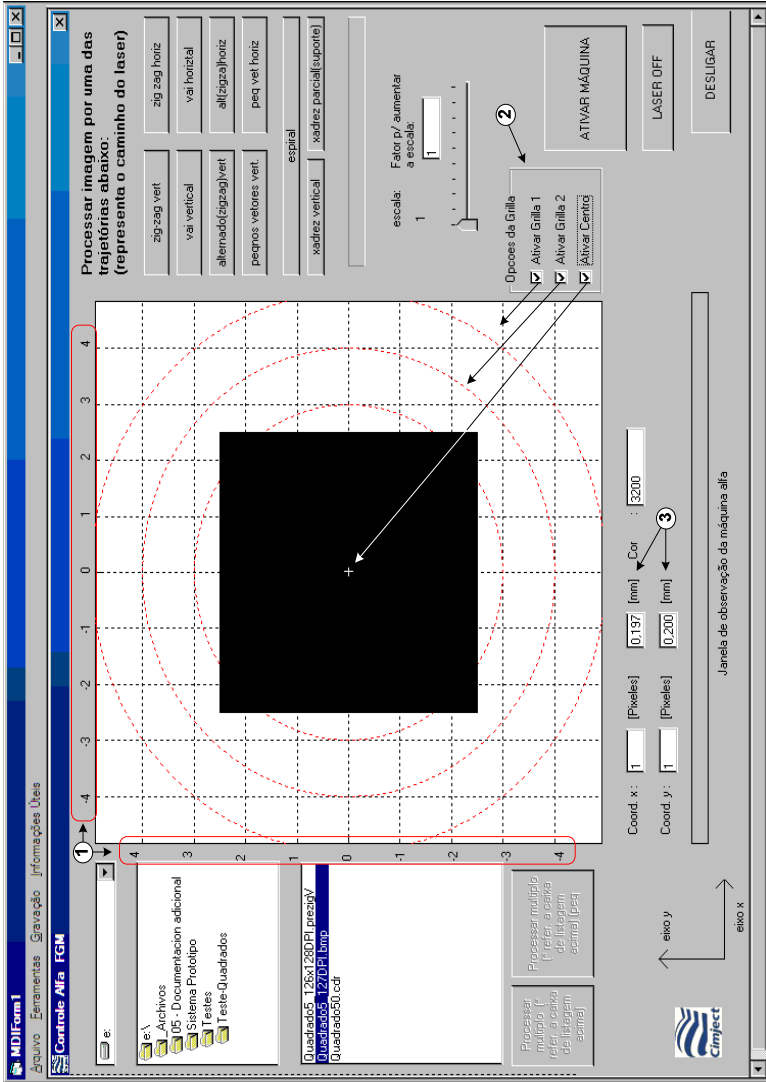


Figura B5.1 : Módulo de planeamento da trajetória do software Alpha66

## APÊNDICE B6

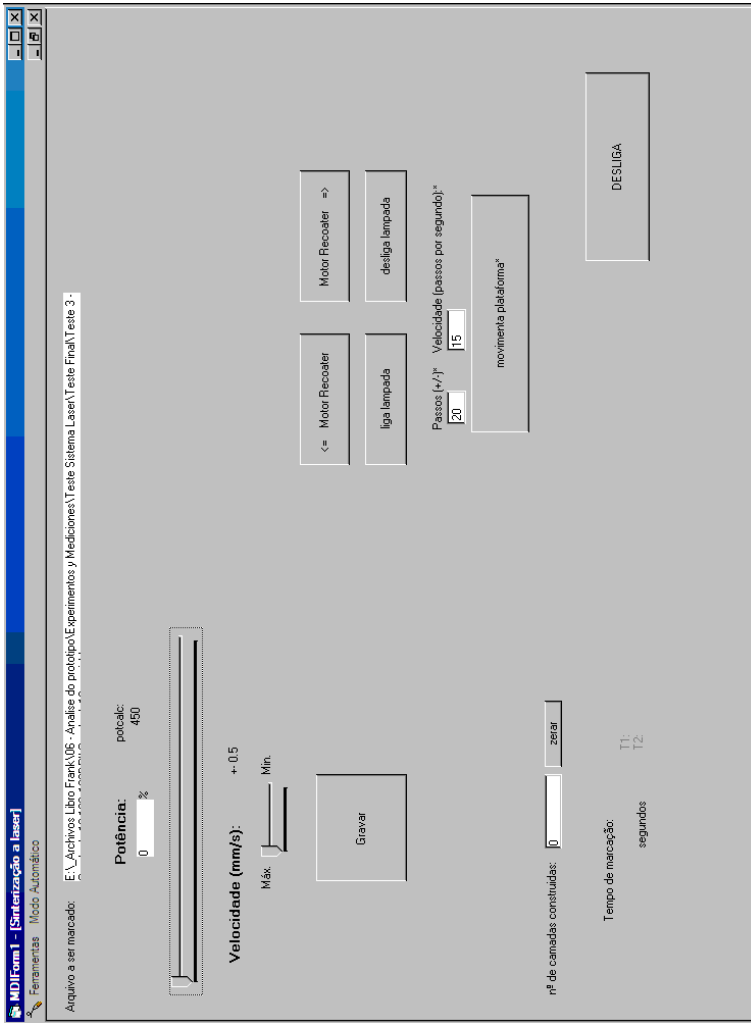


Figura B6.1 : Módulo de sinterização a Laser do software Alpha64

**Software da Máquina de Sinterização, Seletiva a Laser com FGM - Alpha [Módulo - Fabricação e controle dos parâmetros do processo]**

Arquivo a ser marcado: E:\Sistema Prototipo\teste\teste\teste\teste\teste 2 - Quadrado 50

1. Abrir Arquivo TXT

2. Ferramentas

3. Opção da potência para a camada:
 

- Fixa (definida pelo usuário)
- Variável (segundo a cor do desenho)

 Tipo de feixe do laser:
 

- Pulsante
- Contínuo

4. Fim da Sinterizacao

5. Gravar

6. Eixo X: 515.4853474 [???] Eixo Y: 538.0602 [???] Pot.: 750 [???]

7. Informação do processo:
 

- Tempo de processamento: 151.4688 [s]
- Velocidade de processamento: 83.007209 [mm/s]
- Tempo com o laser aceso: 57.4375 [s]
- Distância percorrida pelo laser: 1.2573 [mm]
- Velocidade Variável Eletiva: 218.898803 [mm/s]
- Estat.:

8. Potência do Laser: 10 % (potolac: 750)

9. Velocidade de Deslocamento do Laser [mm/s]: 56.95 + 0.5

10. Deslocamento do Depositor:
 

- <= Motor Recocar
- Motor Recocar =>

11. Ligação das Lâmpadas Incandescentes:
 

- Liga lâmpada
- Desliga lâmpada

12. Deslocamento: 20 [mm] Passos (+/-) 15 [Passos/s] Velocidade: 15 [Passos/s]
 

- Deslocamento: 20 [mm] (eixo Z)
- Velocidade: 15 [Passos/s]

13. N.º de passos no motor P.A.P.: 0 zerar

14. LASER OFF

15. SAIR DO PROGRAMA

16. Cálculo da Densidade de Energia:
 

- Dímetro efetivo do feixe do laser: 0.25 [mm]
- Potência nominal do laser: 20 [W/pts]
- Potência max. medida do laser: 23.0 [W/pts]
- Velocidade de varredura eletiva: 218.898803 [mm/s]
- Densidade de energia direta: 0.140474100387796 [W.s/mm<sup>2</sup>]
- Densidade de energia 1/ta aprox.: 0.036546568042631 [W.s/mm<sup>2</sup>]
- Densidade de energia calculada: 4.2039552490257E-02 [W.s/mm<sup>2</sup>]
- Densidade de energia estimada: 7.6975372509526E-02 [W.s/mm<sup>2</sup>]

17. N.º de camadas constituídas: 1

18. N.º de passos deslocados: 0

19. Movimentar a plataforma\*

20. Calcular

Figura B7: Módulo de fabricação e controle dos parâmetros do processo do software Alpha66

## APÊNDICE B8

Tabela B2: Características do sistema de monitoramento e aquisição de dados

Projetos	Descrição
Placa de aquisição de dados para o Equipamento-Protótipo	
Sistema de monitoramento, aquisição de dados, e comunicação com o computador	<p>Sistema baseado na placa Arduino Duemilanove (ATmega168), com 14 entradas/saídas digitais e 6 entradas analógicas.</p> <p>Periféricos adicionais: (i) display alfanumérico 16x2, (ii) 6 sensores LM35, (iii) 2 sensores de fim-de-percurso, (iv) sensor LDR, (v) buzzer, e (vi) cabo USB.</p>
Cronômetro por contato	<p>Sistema com 2 cronômetros independentes, com base de tempo de 1<math>\mu</math>s em formato mm:ss:000</p> <p>Visualização no número do cronômetro e do tempo.</p> <p>Início e fim por contato através de fim-de-percurso.</p> <p>Comunicação com o PC para transferência e armazenamento de dados. Visualização de dados por meio do software Excel.</p>
Sistema de monitoramento e aquisição de temperatura	<p>Sistema de aquisição para 6 sensores de temperatura (LM35) por USB, com faixa de temperatura de 0 até 150°C e taxa de amostragem de 1 s. Opção de monitoramento por display LCD e buzzer para alarme.</p> <p>Armazena temperatura e o tempo em formato mm:ss</p> <p>Comunicação com o PC para transferência e armazenamento de dados. Visualização de dados por meio do software Excel.</p>
Sistema de detecção de led aceso.	<p>Sistema de detecção do led aceso do controlador de temperatura, baseado em um sensor LDR, com o intuito de detectar a ativação/desativação da resistência elétrica.</p> <p>Armazena o evento no formato mm:ss.</p> <p>Comunicação com o PC para transferência e armazenamento de dados. Visualização de dados por meio do software Excel.</p>

## **APÊNDICE C**

**Princípio de funcionamento do EP e determinação do cálculo da  
densidade de energia**



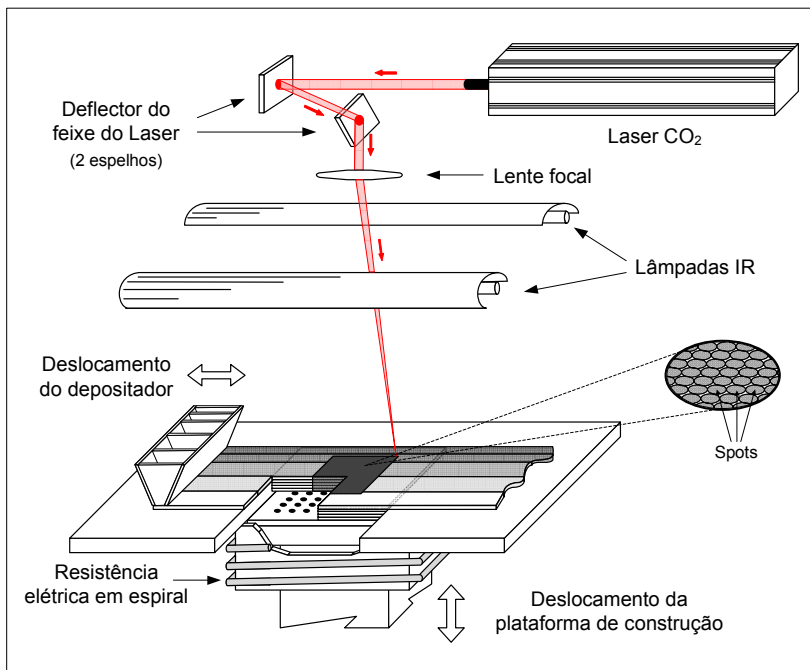
## APÊNDICE C1

**Princípio de funcionamento do EP**

O EP é um equipamento de fabricação aditiva baseado na técnica de SLS cujo princípio de funcionamento é ilustrado na figura C1.1.

Enquanto que um equipamento de SLS tradicional que gera a camada com auxílio de um rolo compactador, o EP gera a camada por deposição do pó através de um depositador que se desloca sobre a PC, espalhando o pó e nivelando-o por meio de régulas fixadas ao depositador. A divisão interna do depositador permite conter diferentes materiais, dessa forma pode ser gerado camadas com gradação de material.

O EP permite o aquecimento da PC por meio de uma resistência elétrica em espiral e o preaquecimento da superfície da camada depositada por meio de duas lâmpadas IR.



**Figura C1.1: Princípio de funcionamento do EP**



Alguns sistemas convencionais de SLS utilizam sistemas de movimentação para deslocar o Laser ou a superfície de trabalho, limitando a dinâmica e a resolução dimensional (SYNRAD, 1996). No EP a sinterização seletiva da camada é realizada por: (i) o posicionamento do feixe do Laser através de um sistema deflector constituído de dois espelhos galvanométricos comandados pelo computador; e (ii) a regulagem da potência do Laser por modulação da largura do pulso (PWM).

O posicionamento dos espelhos é comandado pelo *software* Alpha para cada píxel do modelo 2D a gravar (definido para cada camada) e na ordem estabelecida pela EVFL contido em um arquivo digital.

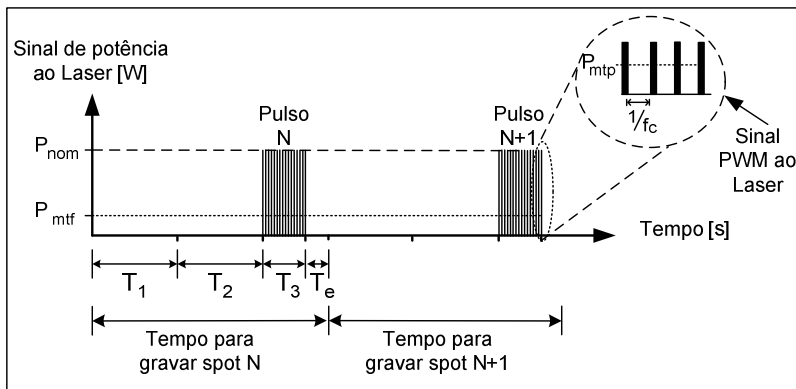
A diferença dos equipamentos de SLS convencionais que deslocam o feixe do Laser a uma velocidade constante durante a sinterização da camada (denominada VVFL), no EP a sinterização acontece com o feixe do Laser fixo em um ponto, fornecendo energia durante um determinado tempo (TEFL), logo do qual os espelhos são deslocados (a uma velocidade definida pelo próprio controlador) a um novo ponto na superfície da camada. Essa velocidade será denominada Velocidade de Deflexão<sup>15</sup> (FAIßT, 2008) sobre a Superfície de Trabalho (VDST), sendo zero durante a sinterização e diferente de zero durante o deslocamento dos espelhos a uma nova posição. A figura C1.1 ilustra o efeito da marcação do Laser sobre a camada de pó gerando um spot para cada pixel do desenho desejado (exceto o pixel de cor branca).

O EP utiliza um Laser de CO<sub>2</sub> excitado por Rádio Frequência (RF), que pode ser operado em forma contínua (CW-*Continuous Wave*) ou pulsada segundo a aplicação desejada. Por ser o EP baseado no *software* de gravação “Lasercontrol”, o Laser opera em modo pulsado (única forma de variar a potência com o controlador UC-1000). O *software* Alpha gera o sinal de referência da potência do Laser ao controlador, segundo o valor (%) fornecido pelo usuário, que gera o sinal para o comando da potência do Laser, como foi ilustrado na figura 4.13.

A figura C1.2 foi obtida a partir da informação do manual do próprio controlador (SYNRAD, 1998) e dos algoritmos de programação do *software* Alpha64.  $T_1$  e  $T_2$  são os tempos que o *software* espera para garantir que os espelhos se desloquem,  $T_3$  é o tempo em que o Laser permanece ligado e  $T_e$  é o tempo de espera para garantir o desligamento do Laser. A frequência de oscilação  $f_c$  é a frequência de operação do

---

<sup>15</sup> O conceito velocidade de deflexão é utilizado nos equipamentos de marcação com Laser.



**Figura C1.2: Sinal de controle da potência do Laser**

controlador do Laser (3KHz, 5KHz ou 7,5KHz) e o valor da potência nesse intervalo é proporcional ao valor de tensão gerada pela placa ligada ao computador.

Segundo constatado nos algoritmos do *software* Alpha  $T_1=T_2$ ,  $T_1/2 \leq T_3 \leq 5T_1$ , e  $T_e=T_1/4$ .

A figura C1.2 permite concluir que: (i) cada *spot* é gerado a partir de um único trem de pulsos de duração  $T_3$ , modulado à frequência de operação do controlador; e (ii) a velocidade de marcação (gravação) é definida por  $T_3$ , já que  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_e$  são constantes.  $T_3$  é associado à velocidade selecionada pelo usuário no *software* Alpha.

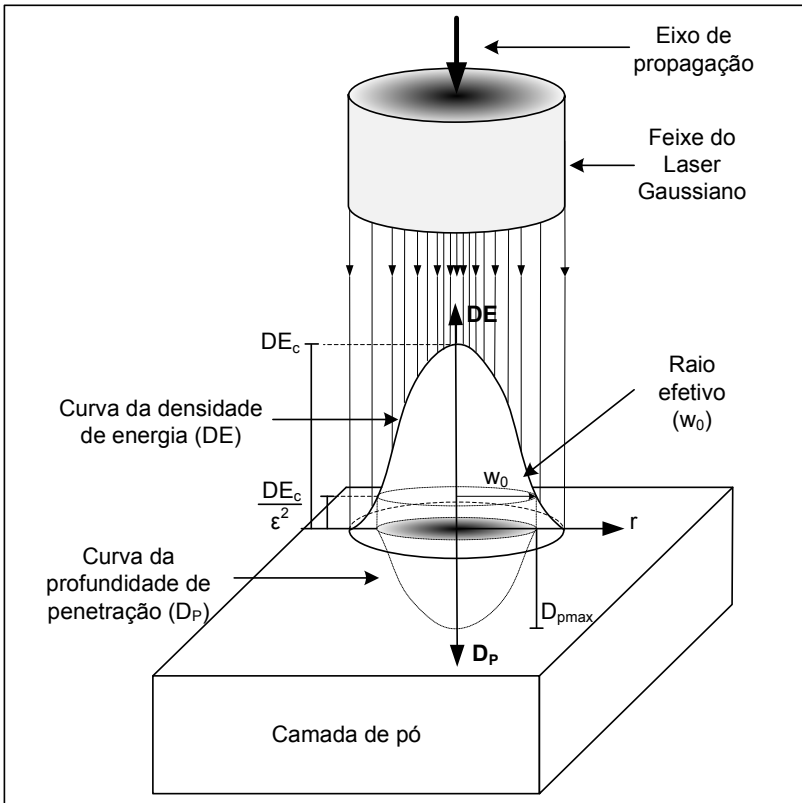
Depois de sinterizada a camada, a PC é deslocada de um valor igual à seguinte camada até formar a peça final pela adição sucessiva de camadas.

Baseado na informação exposta pode-se dizer que o EP é um equipamento de SLS baseado no princípio de marcação com Laser, comandado por *software*, requerendo a localização de cada spot a ser gravado, a potência a ser aplicada e o TEFL para cada spot do desenho a ser gravado e para cada camada.

## APÊNDICE C2

**DETERMINAÇÃO DO CÁLCULO DA  
DENSIDADE DE ENERGIA PARA O EP**

A figura C2.1 ilustra um feixe de Laser incidindo normalmente ao plano da superfície de uma camada de pó, gerando um único spot.



**Figura C2.1: Ilustração de um feixe de Laser normal ao plano da superfície de uma camada**

Adaptado de Fisher JC (1987, apud. Robledo, 2011) e Lü, Fuh e Wong (2001)

A Densidade de Energia (DE) é determinada a partir de sua definição básica: energia (E) aplicada por área irradiada ( $A_I$ ) pelo feixe do Laser. A energia aplicada corresponde à Potência (P) emitida pelo Laser, pelo tempo (t) de aplicação dessa potência. A área irradiada pelo

Laser corresponde à área de um círculo de raio  $w_0$  (raio efetivo para um feixe de Laser Gaussiano), como apresentado na equação C.1.

$$DE = \frac{E}{A_l} = \frac{P \cdot t}{\pi \cdot w_0^2} \quad (C.1)$$

A seguir serão apresentadas 2 formas de obter a DE: (1) a partir de um único trem de pulsos, e (2) a partir do tempo de fabricação da camada.

1) Determinação da DE aplicada a um único spot ( $DE_s$ ).

Considerando que: (i) o *software* do EP comanda um único trem de pulsos para gravar cada spot; (ii) o raio efetivo do feixe do Laser é  $r=w_0=d_e/2$ , sendo  $d_e$  seu diâmetro efetivo; e (iii)  $E_{tp}$  (energia do trem de pulsos) como sendo a potência média do trem de pulsos ( $P_{mp}$ ) aplicada durante o tempo de gravação de um spot ( $T_{tp}$ ), obtêm-se a equação da DE para um único spot trem de pulsos a seguir:

$$DE_s = \frac{E_{tp}}{A_l} = \frac{P_{mp} \cdot t_{tp}}{\pi \cdot r^2} = \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \frac{P_{mp} \cdot t_{tp}}{d_e^2} \quad (C.2)$$

Considerando que no interior do círculo de diâmetro ( $2w_0$ ) o feixe do Laser transmite 86,36% de sua energia total (ROBLEDO, 2011), determina-se que a equação da DE efetiva para um único trem de pulsos pode ser expressa por:

$$DE_{s\_ef} = (0,8636) \cdot \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \frac{P_{mp} \cdot t_{tp}}{d_e^2} = 1,1 \cdot \frac{P_{mp} \cdot t_{tp}}{d_e^2} \quad (C.3)$$

Para o cálculo da Potência Teórica ( $P_{teo}$ ) aplicada em um trem de pulsos durante a sinterização de um spot no EP, esta foi definida em função da: (i) equação de primeira ordem (equação C.4) apresentada na figura 4.28; (ii) equação da Porcentagem da Potência Real ( $\%P_{real}$ ) comandada ao controlador do Laser (equação C.5) em função do Valor Digital (VD) enviada à placa digital/analógica, considerando a resolução de 12 bits; e (iii) equação 4.1 apresentada na subtarefa 3.4.2.2, na qual VD corresponde à variável PotênciaCalculada, sendo  $P_{nom}$  a potência nominal do Laser (25 Watts),  $\%P_{63,2\%}$  a porcentagem da potência real comandada para atingir 63,2% da  $P_{nom}$ ,  $\%P_i$  a porcentagem da potência real que cruza o eixo X, e  $\%P_{Alpha}$  a porcentagem da potência comandada pelo *software*.

$$P_{teo} = P_{nom} \times \left[ 1 - e^{-\frac{(P_i - P_i)}{P_{63,2\%} - P_i}} \right] = P_{nom} \times \left[ 1 - e^{-\frac{(\%P_{real} - \%P_i)}{\%P_{63,2\%} - \%P_i}} \right] \quad (C.4)$$

$$\%P_{real} = 100 \times \left( \frac{VD}{4095} \right) \quad (C.5)$$

$$VD = PotênciaCalculada = (\%P_{Alpha} \times 30 + 450) \quad (C.6)$$

Substituindo C.6 em C.5, obtém-se:

$$\%P_{real} = 100 \times \left( \frac{\%P_{Alpha} \times 30 + 450}{4095} \right) \quad (C.7)$$

e substituindo C.7 em C.4, obtém-se:

$$P_{teo} = P_{nom} \times \left[ 1 - e^{-\frac{\left[ 100 \times \left( \frac{\%P_{Alpha} \times 30 + 450}{4095} \right) - \%P_i \right]}{\%P_{63,2\%} - \%P_i}} \right] \quad (C.8)$$

substituindo os valores de  $\%P_{63,2\%}$  e  $\%P_i$ , obtidos da mesma figura 4.1, determina-se a potência teórica do Laser do EP, a partir da equação:

$$P_{teo} = P_{mtp} = P_{nom} \times \left[ 1 - e^{-\frac{\left[ 100 \times \left( \frac{\%P_{Alpha} \times 30 + 450}{4095} \right) - 5 \right]}{38 - 5}} \right] \quad (C.9)$$

Para a determinação de  $t_{tp}$  obtém-se os valores do TEFL gerados pelo próprio algoritmo do *software* Alpha, os que corresponde ao valor de  $T_3$  da figura C1.2 do apêndice C1, que é determinada segundo a velocidade do Laser selecionada, segundo apresentada na tabela C.1.

**Tabela C1 – Determinação do valor de  $T_3$  a partir da informação de velocidade do Laser selecionada no *software* Alpha**

Vel. Laser [mm/s]	56,95	50,01	44,45	39,86	36,32	33,37	30,07	28,61	26,79	25,18
$T_3$ [ms]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Para considerar a redução de 29% do valor da base de tempo original, segundo foi concluído na subtarefa 3.4.2.2, inclui-se o fator 0,71. Dessa forma o  $t_{tp}$  pode ser definido da seguinte forma:

$$t_{tp} = (0,71) \times T_3 \quad (\text{C.10})$$

O diâmetro efetivo ( $d_e$ ) do feixe do Laser dependerá do tipo de distribuição da potência do feixe e da lente utilizada para concentrar o feixe do Laser. No caso do EP, a distribuição da potência é gaussiana e o  $d_e$  é de aprox. 250  $\mu\text{m}$ , considerada a uma distância de  $1/e^2$  (SYNRAD, 1996).

Aplicando as equações C.9 e C.10 na equação C.3, obtêm-se a equação da  $DE_{s\_ef}$  para o *software* Alpha:

$$DE_{s\_ef} = 1,1 \times \frac{P_{nom} \times \left[ 1 - e^{-\frac{\left[ 100 \times \left( \frac{\% P_{Alpha} \times 30 + 450}{4095} \right) - 5 \right]}{38 - 5}} \right] \times (0,71) \times T_3}{d_e^2} \quad (\text{C.11})$$

2) Determinação da DE a partir do tempo de fabricação de uma camada ( $DE_{tf}$ ).

A equação da DE efetiva para uma camada sinterizada a partir do tempo de fabricação ( $DE_{ef}$ ) pode ser determinada pela equação:

$$DE_{ef} = 1,1 \times \frac{P_{mtp} \times t_{ts}}{N_{spots} \times d_e^2} \quad (\text{C.12})$$

sendo  $P_{mtp}$  a potência média do trem de pulso aplicada à camada e  $t_{ts}$  o **tempo total de sinterização** com o Laser ligado.

Considerando  $t_{tf}$  como o **tempo de fabricação** da camada, fornecido pelo próprio *software* Alpha,  $t_{ts}$  pode ser determinado a partir da figura D1.2 como:

$$t_{ts} = (0,71) \times T_3 \times N_{spots} \quad (\text{C.13})$$

enquanto que

$$t_{tf} = (0,71) \times (2T_1 + T_3 + T_e) \times N_{spots} \quad (\text{C.14})$$

sendo  $N_{\text{spots}}$  o número total de spots gravados em uma camada,  $T_3$  definida na tabela C.1, e  $T_1$ ,  $T_e$  determinados a partir do próprio algoritmo do *software* como:

$$T_1 = (\text{espera\_loop}) \times (\text{base\_tempo}) = 20 \times 0,1 [\mu\text{s}] = 2 [\mu\text{s}] \quad (\text{C.15})$$

$$T_e = (\text{espera\_loop}) \times (\text{base\_tempo}) = 5 \times 0,1 [\mu\text{s}] = 0,5 [\mu\text{s}] \quad (\text{C.16})$$

De C.13 e C.14, pode-se escrever  $t_{\text{ts}}$  em função de  $t_{\text{tf}}$ , como sendo:

$$t_{\text{ts}} = \left[ \frac{T_3}{(2T_1 + T_3 + T_e)} \right] \times t_{\text{tf}} \quad (\text{C.17})$$

No caso da  $P_{\text{mfr}}$  queda definida pela equação C.9 e  $t_{\text{tf}}$  é determinada pela equação C.14.

Aplicando as equações C.9 e C.17 na equação C.12, obtêm-se a seguinte equação da  $DE_{\text{eff}}$  para o *software* Alpha:

$$DE_{\text{eff}} = 1,1 \times \frac{P_{\text{nom}} \times \left[ 1 - e^{-\left[ \frac{100 \times \left( \frac{\% P_{\text{Alpha}} \times 30 + 450}{4095} \right) - 5}{38 - 5} \right]} \right] \times \left[ \frac{T_3 \times t_{\text{tf}}}{(2T_1 + T_3 + T_e)} \right]}{N_{\text{spots}} \times d_e^2} \quad (\text{C.18})$$

Observe-se que a equação C.12 poderia ser escrita como:

$$DE_{\text{eff}} = (0,8636) \cdot \frac{E_{\text{if}}}{A_l} = 1,1 \cdot \frac{P_{\text{mfr}} \cdot t_{\text{tf}}}{N_{\text{spots}} \cdot d_e^2} \quad (\text{C.19})$$

sendo  $P_{\text{mfr}}$  a potência média durante todo o tempo de fabricação, ou seja, considerando o tempo do Laser ligado e desligado, e  $t_{\text{tf}}$  o tempo total de fabricação apresentado no ponto (1). Dessa forma a equação da  $DE_{\text{eff}}$  pode ser expressa por:

$$DE_{\text{eff}} = 1,1 \times \left\{ \left[ \frac{T_3}{(2T_1 + T_3 + T_e)} \right] \times P_{\text{nom}} \times \left[ 1 - e^{-\left[ \frac{100 \times \left( \frac{\% P_{\text{Alpha}} \times 30 + 450}{4095} \right) - 5}{38 - 5} \right]} \right] \right\} \times \frac{t_{\text{tf}}}{N_{\text{spots}} \times d_e^2} \quad (\text{C.20})$$

sendo as equações C.18 e C.20 as mesmas, ordenadas de forma diferente. A figura C1.2 do apêndice C1 ilustra a diferença entre a  $P_{mf}$  e  $P_{mtp}$ .

Observa-se que a equação a equação C.11 da DE para um único Spot e a equação C.20 da DE em função do tempo de fabricação são iguais ( $DE_{s\_ef} = DE_{etf}$ ), substituindo a equação C.14 em C.20.

Finalmente a equação C.19 poderia ser reescrita da forma:

$$DE_{etf} = 1,1 \cdot \frac{P_{mf} \cdot t_{tf}}{N_{spots} \cdot d_e^2} = 1,1 \cdot \frac{P_{mf}}{d_e \cdot \left( \frac{d_e \cdot N_{spots}}{t_{tf}} \right)} = 1,1 \cdot \frac{P_{mf}}{d_e \cdot (v_{mf})} \quad (C.21)$$

sendo  $v_{mf}$  a velocidade media de fabricação da camada (diferente da VVFL), que é fornecida pelo *software* Alpha, tendo que ser corrigida pelo fator (0,71) (segundo apresentado na subarefa 3.4.2.2).

A equação C.21 é de forma similar à equação 5.1 (ver a seção 5.2.1), mas envolve conceitos muito diferentes.



## APÊNDICE C3

**Tabela C2 – Resumo das especificações do equipamento-protótipo**

Especificações	
Processo	Sinterização seletiva a Laser
Tipo de peças fabricadas	Peças com geometria simples, com/sem FGM
Tipo de FGM fabricado	FGM em faixas paralelas de pó (no eixo y)
Forma de deposição	Por gravidade
Forma de geração de FGM	Por divisão do depositador
Tipo de Laser	CO <sub>2</sub>
Potência nominal do Laser (W)	25
Tamanho diâmetro feixe (mm)	0,250
Máxima velocidade de fabricação (mm/s)	50
Resolução eixo X (mm)	0,201
Resolução eixo Y (mm)	0,198
Volume de trabalho, XYZ (mm x mm x mm)	98,2 x 98,2 x 10
Distância focal desde o cabeçote de marcação (mm)	246
Número máximo de materiais	10
Volume max. do depositador (mm) <sup>2</sup>	744,2
Volume max. do componente divisor	785,1
Velocidade de deposição do pó (mm/s)	86,4 ± 1,3
Temperatura máxima da câmara (°C)	170
Dimensão da câmara de fabricação, XYZ (Largura x Altura x Comprimento)	595 x 540 x 585 mm
Dimensão do equipamento, XYZ (Largura x Altura x Comprimento)	2000 x 850 x 800 mm
Formato do arquivo de dados da peça	BMP, JPG
Unidade de controle de dados	AMD-K6 III Windows 98