

Cleiton André Comelli

**CONTRIBUIÇÃO PARA A FABRICAÇÃO DE FGM À BASE DE  
Fe-Sn-Ag OBTIDO PELO PROCESSO DE SLM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

Florianópolis  
2017

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

Comelli, Cleiton André

CONTRIBUIÇÃO PARA A FABRICAÇÃO DE FGM À BASE DE Fe-Sn-Ag  
OBTIDO PELO PROCESSO DE SLM / Cleiton André Comelli ;  
orientador, Carlos Henrique Ahrens - Florianópolis, SC,  
2017.

144 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura Aditiva. 3.  
Material com Gradação Funcional. 4. Sinterização Seletiva a  
Laser. 5. Prototipagem Rápida. I. Ahrens, Carlos Henrique.  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Cleiton André Comelli

**CONTRIBUIÇÃO PARA A FABRICAÇÃO DE FGM À BASE DE  
Fe-Sn-Ag OBTIDO PELO PROCESSO DE SLM**

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

Florianópolis, 17 de março de 2017.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof. Dr. -Ing. Paulo Antônio Pereira Wendhausen,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

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

---

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eng. Carlos Henrique Ahrens, pela valiosa orientação, incentivo, apoio e confiança durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. -Ing. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, pelo incentivo e suporte oferecido através do laboratório Magma.

Ao Prof. Dr. -Ing. Aloísio Nelmo Klein, ao Prof. Dr. Eng. Cristiano Binder e ao Prof. Dr. Eng. José Daniel Biasoli de Mello, pelo incentivo e apoio oferecido através do laboratório LabMat.

Aos colegas dos Laboratórios LabMat, Magma, LCME, Usicon, Labconf e Labsolda, pelo apoio e colaboração na realização do trabalho.

Aos amigos do laboratório Nimma, Aloysio, Andres, João, Luiza e Murilo, pelo apoio, companheirismo e conhecimentos compartilhados.

Aos demais colegas e amigos que ofereceram apoio e incentivo durante a realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, pela oportunidade e suporte oferecido para a realização do trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio incondicional.

A todos, muito obrigado.



*“There will come a time when our descendants will be amazed that we did not know things that are so plain to them . . . Many discoveries are reserved for ages still to come, when memory of us will have been effaced. Our universe is a sorry little affair unless it has in it something for every age to investigate . . . Nature does not reveal her mysteries once and for all.”*

—Seneca, *Natural Questions*,  
Book 7, first century



## RESUMO

A fabricação de materiais que apresentam gradientes funcionais (*Functionally Graded Materials - FGM*) exige a variação da estrutura ou composição ao longo da peça. Várias aplicações demandam variações nas propriedades dos materiais, que podem ser obtidas de maneira descontinua, com a utilização de materiais distintos, ou gradativa, com o uso de FGM. A manufatura aditiva (*Additive Manufacturing – AM*) pode ser utilizada para a fabricação de FGM através da fusão ou sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Melting/Sintering – SLM/SLS*). O processo utiliza um laser que incide sobre um material particulado, fundindo ou sinterizando sucessivas camadas que dão forma à peça. Há uma grande dependência entre a qualidade das peças fabricadas e os parâmetros do processo, que devem ser escolhidos em função do material particulado utilizado e das características estruturais desejadas na peça, portanto, é necessário conhecer o comportamento das diversas matérias-primas e suas misturas para aperfeiçoar os resultados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é fabricar um material com gradação funcional de composição por SLM e estudar a consolidação em função dos parâmetros de processamento. Especificamente, o material deverá apresentar gradação nas propriedades tribológicas, propriedade escolhida pela constatação do menor número de publicações encontradas sobre o tema. A gradação será obtida através de uma transição gradual entre um material aplicado em ligas resistentes ao desgaste para um material com maior aplicação em ligas estruturais. Para isto é utilizado o pó de ferro (Höganäs AHC 100.29) e o pó de uma liga de estanho e prata (Heraeus). Os resultados mostraram os parâmetros de processamento obtidos para cada composição de um gradiente discreto de três níveis, partindo do ferro puro e avançando com incrementos de 12,5% em massa do pó da liga de estanho e prata até uma mistura composta por 75% em massa de pó de ferro e 25% em massa do pó da liga de estanho e prata. O trabalho também inclui as medidas da densidade e dureza, que apresentaram aumento em função da adição do pó da liga de estanho e prata no material. A metalografia evidencia uma estrutura heterogênea e a análise tribológica mostrou a redução no coeficiente de atrito em função da adição da liga de estanho e prata para cada composição do FGM.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva, Material com Gradação Funcional, Fusão Seletiva a Laser, Sinterização Seletiva a Laser, Prototipagem Rápida.



## ABSTRACT

The manufacturing of functionally graded materials (FGM) requires a structural or compositional variation throughout the piece. Several applications require material properties variation, which can be achieved in a discontinuous way, with the use of different materials, or gradual, with the use of FGM. The Additive manufacturing (AM) can be used for FGM manufacturing by selective fusion or selective sintering by laser (SLM/SLS). The process uses a laser that focuses on a particulate material, melting or sintering successive layers that give shape to the piece. There is a great dependence between the quality of the manufactured parts and the process parameters, which must be chosen according to the particulate material used and the structural characteristics desired in the part, so it is necessary to know the behavior of the various raw materials and their mixtures to improve the results. In this context, the objective of this work is to fabricate a material with functional grading of composition by SLM and to study the consolidation in function of the processing parameters. Specifically, the material should present gradation in tribological properties, property chosen by the finding of the smallest number of publications on the subject. The gradation will be achieved through a gradual transition between a material applied in wear resistant alloys to one with greater application in structural alloys. To achieve this, iron powder (Höganäs AHC 100.29) and the powder of a tin alloy (Heraeus) are used. The results show the processing parameters obtained for each composition of a three-level discrete gradient, starting from pure iron and advancing with 12.5 wt% increments of tin alloy powder to a mixture composed of 75 wt% Iron and 25 wt% of the tin alloy powder. The work also includes measurements of density and hardness, which increased as a function of tin alloy addition. The metallography shows a heterogeneous structure and tribological analysis showed the coefficient friction reduction as a function of tin alloy addition, for each FGM composition.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Functionally Graded Materials, Selective Laser Melting, Selective Laser Sintering, Rapid Prototyping.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Prótese com gradiente funcional entre titânio e hidroxiapatita. ....	28
Figura 1.2 – Comparação entre lentes: a) Lente curva; b) Lente com gradiente funcional ( <i>Grin</i> ). ....	28
Figura 1.3 – Barreira térmica com gradiente funcional. ....	28
Figura 2.1 – Secção transversal do caule de bambu mostrando a distribuição radial das fibras na espessura. ....	31
Figura 2.2 – Transição entre estruturas esponjosas para compactas em secção de um osso humano. ....	32
Figura 2.3 – Aumento gradual da concentração de carbono em uma superfície submetida ao tratamento de cementação. ....	32
Figura 2.4 – Estruturas com gradação: a) Contínua; b) Discreta. ....	34
Figura 2.5 – Formação de trincas em material com variação abrupta de composição: 1) Nucleação da trinca; 2) Propagação da trinca; 3) Descolamento do material; 4) Cavidade formada. ....	39
Figura 2.6 – Exemplos de próteses produzidas por manufatura aditiva: a) Prótese da base da cavidade ocular; b) Prótese de maxilar. ....	40
Figura 2.7 – Etapas gerais do processo de Manufatura Aditiva. ....	41
Figura 2.8 – Sinterização no estado sólido: a) Partículas empacotadas antes da sinterização; b) Partículas aglomeradas a temperatura acima da metade da temperatura absoluta de fusão; c) Sinterização. ....	43
Figura 2.9 – Sinterização por fase líquida, utilizando ligante diferente do material estrutural: a) Partículas separadas; b) Partículas compósitas; c) Partículas revestidas; d) Prosseguimento da sinterização. ....	44
Figura 2.10 – Representação esquemática de um dispositivo SLS/SLM. ....	45
Figura 2.11 – Visão plana da estratégia de escaneamento <i>refill</i> . ....	48
Figura 2.12 – Representação esquemática da estratégia <i>refill</i> : a) Mecanismo de formação de vazios; b) Etapas de preenchimento e refusão na estratégia <i>refill</i> . ....	49
Figura 2.13 – Regiões diferentes em um sólido formado pelo empilhamento de camadas. ....	50
Figura 2.14 – Técnicas de escaneamento das camadas: a) <i>Chessboard</i> ; b) <i>Islands</i> . ....	50
Figura 2.15 – Janela de processamento para laser operado em modo contínuo. ....	51
Figura 2.16 – Diagrama de fases para o ferro metálico. ....	54
Figura 2.17 – Reticulados cristalinos do ferro: a) Cúbico de corpo centrado; b) Cúbico de face centrada. ....	55
Figura 2.18 – Representação esquemática das transformações alotrópicas do ferro sob um perfil de aquecimento a 1 atm. ....	56
Figura 2.19 – Aspecto micrográfico do ferro. Ataque reativo de água régia. Ampliação: 100 vezes. ....	57
Figura 2.20 – Reticulados cristalinos do estanho: a) Cúbico do tipo diamante; b) Tetragonal de corpo centrado. ....	58
Figura 2.21 – Exemplo de aplicação de metal patente em mancal axial de deslizamento. ....	60

Figura 2.22 – Diagrama de fases do estanho. ....	61
Figura 2.23 – Diagrama de fases Sn-Ag. ....	62
Figura 2.24 – Densidade em função da temperatura para ligas de Sn-Ag nas imediações do eutético. ....	63
Figura 2.25 – Tensão de superfície em função da temperatura para a liga Sn-Ag eutética. ....	63
Figura 2.26 – Diagrama Fe-Sn. ....	64
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia experimental utilizada. ....	68
Figura 3.2 – Máquina SLS/SLM utilizada na fase experimental. ....	69
Figura 3.3 – Esquema simplificado do dispositivo protótipo SLS/SLM. ....	70
Figura 3.4 – Empilhamento de camadas e estratégia de varredura utilizada. ....	74
Figura 3.5 – Disposição dos corpos de prova sobre o substrato de fabricação. ....	75
Figura 3.6 – Operação de medição dos corpos de prova e dimensões medidas. ....	76
Figura 3.7 – Planos de secção dos corpos de prova. ....	78
Figura 3.8 – Peça simples com gradação funcional proposta para fabricação: A) Geometria planejada; B) Distribuição das composições do FGM na peça. ....	80
Figura 3.9 – Peça complexa com gradação funcional proposta para fabricação: A) Geometria planejada; B) Distribuição das composições. ....	80
Figura 4.1 – Marcações produzidas na superfície do substrato de acrílico pelo laser. ....	84
Figura 4.2 – Distância entre linhas marcadas na superfície pelo laser. ....	85
Figura 4.3 – Granulometria do pó de ferro. ....	86
Figura 4.4 – Granulometria do pó de estanho e prata. ....	87
Figura 4.5 – Morfologia do pó de ferro Höganäs AHC 100.29. ....	88
Figura 4.6 – Composição química aproximada do pó de ferro. ....	88
Figura 4.7 – Morfologia do pó da liga de estanho e prata Heraeus. ....	89
Figura 4.8 – Composição química aproximada do pó da liga de estanho e prata. ....	89
Figura 4.9 – Granulometria do Ferro peneirado em peneira com abertura de malha de 106 µm. ....	90
Figura 4.10 – Mistura de 87,5% em peso de pó de ferro e 12,5% em peso de pó da liga de estanho e prata. ....	93
Figura 4.11 – Mistura de 75% em peso de pó de ferro e 25% em peso de pó da liga de estanho e prata. ....	94
Figura 4.12 – Camadas produzidas para avaliação da densidade de energia necessária para o processamento: a) Reprovadas; b) Aprovadas. ....	95
Figura 4.13 – Corpos de prova produzidos com a composição “L” após processamento. ....	97
Figura 4.14 – Corpos de prova produzidas com a composição “M” após processamento. ....	98
Figura 4.15 – Corpos de prova produzidas com a composição “H” após processamento. ....	99
Figura 4.16 – Corpos de prova produzidos sobre substrato de aço inoxidável. ....	99
Figura 4.17 – Influência individual da variação da Potência, velocidade de varredura e distância entre linhas sobre a densidade da composição “L”. ....	100

Figura 4.18 – Influência individual da variação da Potência, velocidade de varredura e distância entre linhas sobre a densidade da composição “M”.....	101
Figura 4.19 – Influência individual da variação da Potência, velocidade de varredura e distância entre linhas sobre a densidade da composição “H”.....	102
Figura 4.20 – Densidade em função da P, u e h para a composição “L”.....	103
Figura 4.21 – Densidade em função da P, u e h para a composição “M”.....	104
Figura 4.22 – Densidade em função da P, u e h para a composição “H”.....	105
Figura 4.23 – Corpos de prova produzidos com parâmetros otimizados para a densidade: a) composição “L”; b) composição “M”; c) composição “H”. .....	106
Figura 4.24 – Superfície do corpo de prova com a composição “L”. .....	107
Figura 4.25 – Superfície do corpo de prova correspondente à composição “M”. .....	108
Figura 4.26 – Trincas na superfície do corpo de prova com a composição “M”. .....	109
Figura 4.27 – Superfície do corpo de prova correspondente à composição “H” do FGM. ....	109
Figura 4.28 – Características da superfície do corpo de prova com a composição “H”.....	110
Figura 4.29 – Corpos de prova cortados e embutidos, preparados para medição da dureza: a) Composição “L”; b) Composição “M”; c) Composição “H”. ....	111
Figura 4.30 – Dureza Brinell das composições “L”, “M” e “H” nos planos xy e xz. ....	111
Figura 4.31 – Endentações feitas no corpo de prova com a composição “L”: a) Plano xy; b) Plano yz.....	112
Figura 4.32 – Endentações feitas no corpo de prova com a composição “M”: a) Plano xy; b) Plano yz.....	113
Figura 4.33 – Endentações feitas nos corpos de prova com a composição “H”: a) Plano xy; b) Plano yz.....	113
Figura 4.34 – Superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “L”: a) Plano xy; b) Plano yz. ....	114
Figura 4.35 – Superfície polida e atacada dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “L”: a) Plano xy; b) Plano yz.....	114
Figura 4.36 – Superfície polida de um corte do corpo de prova com a composição “L” mostrando grãos ferríticos.....	115
Figura 4.37 – Superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “M”: a) Plano xy; b) Plano yz. ....	116
Figura 4.38 – Superfície polida e atacada dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “M”: a) Plano xy; b) Plano yz.....	116
Figura 4.39 – Superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “H”: a) Plano xy; b) Plano yz.....	117
Figura 4.40 – Superfície polida e atacada dos planos vertical e horizontal do corpo de prova com a composição “H”: a) plano xy; b) plano yz.....	117
Figura 4.41 – Coeficiente de atrito para as três composições. ....	118
Figura 4.42 – Peça de geometria simples provida de gradiente funcional entre ferro e liga de estanho e prata. ....	119

Figura 4.43 – Região da interface: Composição “L” – Composição “M”. .....	120
Figura 4.44 – Região da interface: Composição “M” – Composição “H”.....	120
Figura A.1 – Placa Arduino® UNO R3 mostrando as diversas conexões de alimentação e comunicação. ....	131
Figura A.2 – Esquema de ligação do driver DRV8834. ....	132
Figura A.3 – Esquema de ligação do módulo MAX6675 no UNO R3 para leitura do sinal do termopar tipo K. ....	133
Figura A.4 – Esquema de ligação dos componentes do sistema de movimentação do funil e monitoramento da temperatura.....	134
Figura A.5 – Sistema de transmissão para movimentação do funil. ....	137
Figura B.1 – Temperatura durante processamento da composição “L” .....	139
Figura B.2 – Temperatura durante processamento da composição “M”.....	140
Figura B.3 – Temperatura durante processamento da composição “H” .....	141
Figura C.1 – Peça complexa com gradiente funcional: a) base; b) topo. ....	143
Figura C.2 – a) Mecanismo de gradiente de temperaturas; b) Diferentes temperaturas .....	144
Figura C.3 – Sessões da peça com geometria complexa: a) Composição “H”; b) Composição “M”; c) Composição “M”; d) Composição “L”.....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos métodos de processamento de FGM. ....	35
Tabela 2.2 – Classificação funcional de FGM. ....	37
Tabela 2.3 – Processos de manufatura aditiva pela ASTM Internacional. ....	42
Tabela 2.4 – Parâmetros que influenciam no processo SLS/SLM. ....	46
Tabela 2.5 – Propriedades do ferro. ....	53
Tabela 2.6 – Propriedades do estanho. ....	59
Tabela 3.1 – Dados característicos dos pós utilizados. ....	72
Tabela 4.1 – Medidas obtidas no teste do sistema de movimentação. ....	83
Tabela 4.2 – Percentis relativos aos valores de movimentação do substrato ....	83
Tabela 4.3 – Valores da largura das linhas. ....	84
Tabela 4.4 – Valores de distância entre as linhas. ....	85
Tabela 4.5 – Resultado da granulometria para o ferro. ....	86
Tabela 4.6 – Granulometria do pó da liga de estanho e prata. ....	87
Tabela 4.7 – Resultado da granulometria para o pó de ferro peneirado. ....	90
Tabela 4.8 – Tempo de escoamento para as misturas dos materiais. ....	91
Tabela 4.9 – Densidade aparente para as misturas dos materiais. ....	92
Tabela 4.10 – Resultado da granulometria para a composição “M”. ....	93
Tabela 4.11 – Resultado da granulometria para a composição “H”. ....	94
Tabela 4.12 – Limites da densidade de energia específica aplicada para cada composição. ....	96
Tabela 4.13 – Limites da velocidade utilizada para cada composição. ....	96
Tabela 4.14 – Parâmetros utilizados para fabricação dos corpos de prova. ....	97
Tabela 4.15 – Parâmetros otimizados de processamento para cada composição do FGM. ....	106
Tabela 4.16 – Densidade dos corpos de prova fabricados com os parâmetros otimizados para a densidade. ....	107



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Assisted Design</i>
CAM	<i>Computer Assisted Manufacturing</i>
CATP	Condições Ambiente de Temperatura e Pressão
CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CFC	Cúbico de Face Centrada
CS	<i>Centrifugal Casting</i>
DJM	<i>Directed Joint Materials</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>
EDS/EDX	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FGM	<i>Functionally Graded Material</i>
GRIM	<i>Gradient-Index</i>
HVOF	<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IHM	Interface homem-máquina
LC	<i>Laser Cladding</i>
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
LPS	<i>Liquid Phase Sintering</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MPIF	<i>Metal Powder Industries Federation</i>
ph	Potencial Hidrogeniônico
PM	<i>Powder Metallurgy</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RM	<i>Rapid Manufacturing</i>
RSM	<i>Response surface methodology</i>
RWT	<i>Reciprocating wear test</i>
SE	<i>Secondary Electrons</i>
SFFM	<i>Solid Freeform Manufacturing</i>
SL	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>

SLS  
SSS  
STL  
VDT

*Selective Laser Sintering*  
*solid-state Sintering*  
*Stereolithography*  
*Vapor Deposition Techniques*

## LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

P	[W]	Potência do laser
u	[mm/s]	Velocidade de varredura do laser
h	[mm]	Distância entre filetes sucessivos ( <i>hatching</i> )
D	[mm]	Espessura de camada
m	[g]	Massa
V	[cm <sup>3</sup> ]	Volume
a	[mm]	Valor médio do lado a do cubo
b	[mm]	Valor médio do lado b do cubo
c	[mm]	Valor médio do lado c do cubo

Alfabeto grego:

$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Densidade volumétrica
$\varphi$	[J/mm <sup>3</sup> ]	Densidade de energia



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	27
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	30
1.2.1	Objetivo geral.....	30
1.2.2	Objetivos específicos.....	30
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>31</b>
2.1	MATERIAIS COM GRADAÇÃO FUNCIONAL.....	31
2.1.1	Origem dos materiais com gradação funcional.....	31
2.1.2	Principais técnicas de fabricação de materiais com gradação funcional.....	33
2.1.3	Materiais compósitos e FGM.....	34
2.1.4	Classificação dos materiais com gradação funcional.....	34
2.1.5	Aplicações de FGM.....	35
2.1.6	Tribologia e FGM .....	37
2.2	MANUFATURA ADITIVA .....	39
2.2.1	Aplicações da manufatura aditiva.....	40
2.2.2	Técnicas de manufatura aditiva .....	41
2.2.3	Fusão e sinterização seletiva .....	43
2.2.4	Parâmetros de processamento em SLS/SLM .....	45
2.2.5	Técnicas aplicadas na AM de FGM .....	47
2.2.6	Materiais obtidos por AM para aplicações tribológicas.....	52
2.3	FERRO METÁLICO.....	53
2.3.1	Propriedades e aplicações do ferro.....	53
2.3.2	Comportamento do ferro a pressão de 1 atm.....	55
2.4	ESTANHO.....	58
2.4.1	Propriedades e aplicações do estanho .....	58
2.4.2	Liga eutética de estanho e prata .....	61
2.4.3	Liga de estanho e ferro .....	64
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>67</b>
3.1	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA.....	67
3.2	PRIMEIRA FASE – AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	69
3.2.1	Características do equipamento utilizado .....	69
3.2.2	Avaliação do sistema de movimentação do substrato de fabricação.....	71
3.2.3	Avaliação do sistema de movimentação do laser.....	71
3.3	SEGUNDA FASE – MATERIAIS UTILIZADOS .....	72
3.3.1	Seleção dos materiais particulados.....	72
3.3.2	Caracterização e preparação dos materiais particulados ...	72

3.4	TERCEIRA FASE – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	73
3.4.1	Definição das janelas de processamento .....	73
3.4.2	Otimização dos parâmetros de processamento para maximização da densidade do FGM .....	73
3.4.3	Avaliação da densidade dos corpos de prova fabricados ....	76
3.4.4	Fabricação de corpos de prova com parâmetros otimizados para maior densidade .....	77
3.4.5	Análise por MEV na superfície dos corpos de prova otimizados para maior densidade.....	78
3.4.6	Análise da dureza em corpos de prova otimizados para maior densidade .....	78
3.4.7	Análise metalográfica em corpos de prova otimizados para maior densidade .....	79
3.4.8	Análise tribológica em corpos de prova otimizados para maior densidade .....	79
3.4.9	Fabricação da peça com FGM.....	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	83
4.1	AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	83
4.1.1	Sistema de movimentação do substrato de fabricação .....	83
4.1.2	Sistema de movimentação do laser.....	84
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	86
4.2.1	Granulometria dos materiais utilizados .....	86
4.2.2	Morfologia e composição das matérias-primas utilizadas ..	88
4.3	PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA OS EXPERIMENTOS .....	89
4.3.1	Peneiramento e caracterização do pó de ferro peneirado... ..	89
4.3.2	Preparação das misturas correspondentes a cada composição do FGM discreto.....	90
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS.....	91
4.4.1	Escoabilidade .....	91
4.4.2	Densidade aparente .....	92
4.4.3	Granulometria .....	92
4.5	DEFINIÇÃO DA JANELA DE PROCESSAMENTO .....	94
4.6	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO OTIMIZADOS PARA MAIOR DENSIDADE.....	96
4.6.1	Fabricação dos corpos de prova.....	96
4.6.2	Efeito dos parâmetros de processamento sobre densidade dos corpos de prova .....	100

<b>4.6.3</b>	<b>Malha de superfícies de resposta para a densidade.....</b>	<b>103</b>
<b>4.7</b>	<b>PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS COM PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA MAXIMIZAR A DENSIDADE.....</b>	<b>106</b>
<b>4.7.2</b>	<b>Densidade dos corpos de prova.....</b>	<b>107</b>
<b>4.7.3</b>	<b>Análise da superfície por MEV.....</b>	<b>107</b>
<b>4.7.4</b>	<b>Dureza dos corpos de prova.....</b>	<b>110</b>
<b>4.7.5</b>	<b>Análise metalográfica dos corpos de prova otimizados.....</b>	<b>114</b>
<b>4.7.6</b>	<b>Análise tribológica dos corpos de prova otimizados.....</b>	<b>117</b>
<b>4.8</b>	<b>FABRICAÇÃO DO FGM.....</b>	<b>119</b>
<b>4.8.1</b>	<b>FGM com geometria simples.....</b>	<b>119</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>121</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>121</b>
<b>5.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A – AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE DEPOSIÇÃO DE PÓ E CONTROLE DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO DE FABRICAÇÃO.....</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE B – MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DA PARTE INFERIOR DOS SUBSTRATOS DE FABRICAÇÃO.....</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE C – FABRICAÇÃO DE PEÇA COMPLEXA COM GRADAÇÃO FUNCIONAL.....</b>	<b>143</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em uma análise criteriosa de estruturas naturais, como caules de plantas, troncos de árvores, ossos de animais, conchas de moluscos entre outros, é possível verificar geometrias ou composições que variam de acordo com as solicitações do ambiente no qual estas estruturas estão inseridas. Esta observação pode ser explicada e atribuída à constante ação de um processo de otimização natural, que busca prover à estrutura o atributo exigido pelo ambiente, seja ele resistência, flexibilidade, dureza ou qualquer combinação destas propriedades, utilizando para isto a menor quantidade de energia possível (MIYAMOTO et al., 1999).

Este interessante recurso existente na natureza tem servido de inspiração tecnológica para a fabricação de estruturas artificiais pelo homem, constituindo-se nos chamados materiais com gradação funcional (*Functionally Graded Materials – FGM*).

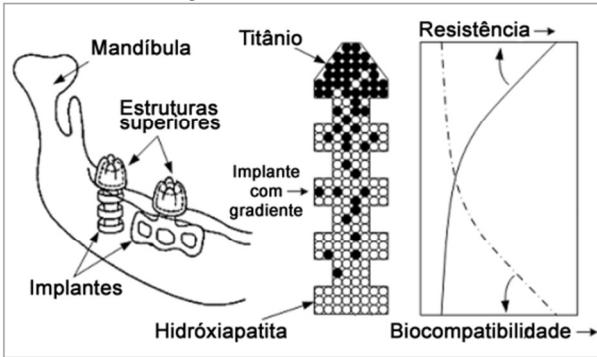
Estes fazem parte de uma classe de materiais de engenharia que exibem propriedades heterogêneas, devido à variação em sua estrutura ou composição, resultando em mudanças nas propriedades químicas, físicas ou configuração geométrica (MIYAMOTO et al., 1999; RABIN; SHIOTA, 1995). A gradação da estrutura em um FGM pode ser discreta (*step-wise*), quando é formada por sucessivos incrementos, ou contínua, quando a transição se apresenta de forma suave no FGM.

Atualmente, os materiais com gradação funcional possuem aplicações em diversas áreas como química, eletrônica, óptica, nuclear, biológica, entre outras (KOIZUMI; NIINO, 1995). Permitem a fabricação de peças diferenciadas, tais como filtros providos de gradientes (BRANCH, 2002), próteses (MISHINA; INUMARU; KAITOKU, 2008) (Figura 1.1), dispositivos GRIN<sup>1</sup> (*Gradient-index*) (BHARTI; GUPTA; GUPTA, 2013) (Figura 1.2) e escudos térmicos (KOIZUMI; NIINO, 1995) (Figura 1.3).

---

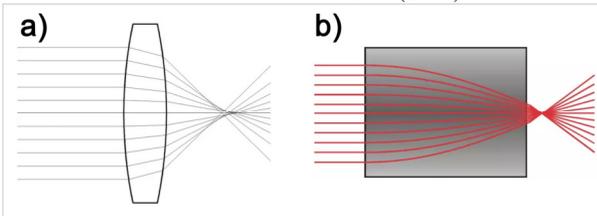
<sup>1</sup> Dispositivos GRIN são elementos nos quais os parâmetros físicos que definem a velocidade de propagação de uma onda são dependentes da posição, forçando a onda a descrever uma trajetória curvilínea (CLIMENTE; TORRENT; SÁNCHEZ-DEHESA, 2014).

Figura 1.1 – Prótese com gradiente funcional entre titânio e hidroxiapatita.



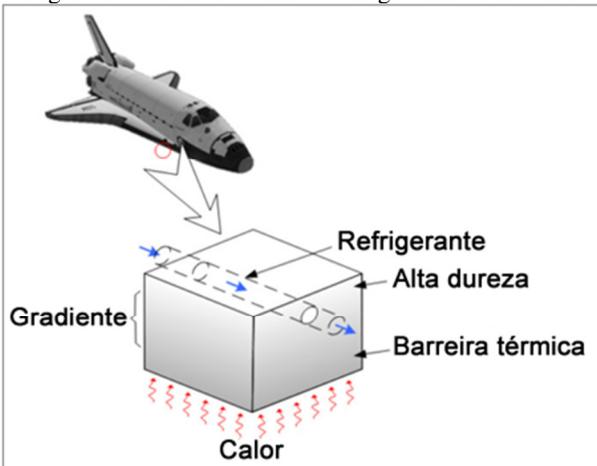
Fonte: Adaptado de BEAL (2005).

Figura 1.2 – Comparação entre lentes: a) Lente curva; b) Lente com gradiente funcional (*Grin*).



Fonte: Adaptado de GRINTECH (2017).

Figura 1.3 – Barreira térmica com gradiente funcional.



Fonte: Adaptado de BEAL (2005).

Antes do advento das tecnologias de projeto e manufatura assistidos por computador (*Computer Assisted Design/Manufacturing – CAD/CAM*) e da manufatura aditiva (*Additive Manufacturing – AM*), a maioria dos métodos de fabricação de FGM eram aplicados principalmente para a obtenção de revestimentos ou peças com geometrias de menor complexidade. A obtenção de peças geometricamente complexas com tal característica era difícil, já que os demais processos apresentavam limitações em termos de automação ou baixa reprodutibilidade (SHISHKOVSKY, 2001)

A AM se destaca como possibilidade de obtenção de FGM graças a particularidades do processo, que através da automação do empilhamento de camadas (*layers*) do material, possibilita dar forma a peças de maneira flexível. Os processos de AM podem ser baseados em técnicas de extrusão de material (FDM), fusão de pós (SLS/SLM/DMLS/EBM), fotopolimerização (SL), jateamento de materiais ou aglutinante (polyjet), laminação de folhas (LOM) ou deposição direta de energia (LENS/EBW) (GAO et al., 2015).

Os processos de AM podem ser utilizados para a criação de praticamente qualquer geometria, sem adicionar custo à fabricação em função da complexidade dos componentes e apresentam vantagens em aplicações que exigem alto grau de customização, como por exemplo, na fabricação de próteses (GAO et al., 2015; VOLPATO et al., 2007).

A utilização da AM para a produção de FGM tem sido tema de diversos trabalhos e sua aplicação permite customizar várias propriedades físicas do material (SHISHKOVSKY, 2001). Aplicações que exigem materiais heterogêneos, expostos a vibrações, atrito ou outros tipos de solicitação mecânica também podem se beneficiar, já que regiões de transição brusca tendem a gerar tensões residuais, que são reduzidas pela transição gradual promovida pelo FGM (JUNG et al., 1997).

Apesar das vantagens na fabricação de FGM por AM, o estudo dos parâmetros de processamento para diferentes composições e a compreensão das propriedades obtidas com novas combinações de matérias-primas ainda apresentam lacunas a serem exploradas. Uma maior compreensão dos efeitos causados pela variação dos parâmetros de processamento e uma abordagem ampla em relação à caracterização dos materiais fabricados podem ser de grande interesse.

Nesse contexto, avaliar aspectos da fabricação de um FGM por manufatura aditiva, incluindo a caracterização das propriedades do material fabricado, é um tema de interesse e com grande potencial a ser explorado.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.2.1 Objetivo geral

Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo geral investigar a influência dos parâmetros de fabricação sobre um material com gradação funcional discreta (FGM) fabricado por fusão seletiva a laser (SLM).

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar a influência dos parâmetros de processamento por SLM para os metais particulados ferro e misturas de ferro com liga de estanho-prata a serem utilizados na fabricação do FGM;
- Determinar parâmetros otimizados de processamento com a técnica SLM para as diferentes composições do FGM proposto, visando a fabricação de peças com alta densidade;
- Avaliar e caracterizar as composições do FGM fabricado pelo processo SLM quanto a microestrutura, dureza e tribologia;
- Fabricar peças contendo FGM discreto entre os dois materiais (ferro e liga de estanho-prata) e avaliar as interfaces entre as composições.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

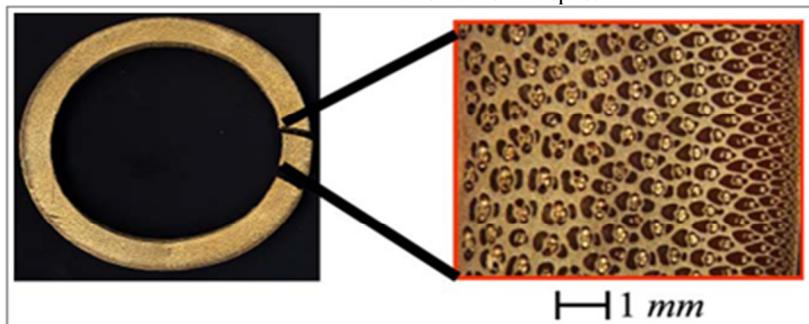
### 2.1 MATERIAIS COM GRADAÇÃO FUNCIONAL

#### 2.1.1 Origem dos materiais com gradação funcional

Apesar do enorme interesse em desenvolver aplicações para materiais com gradação funcional em tecnologias de ponta, estes não são novidade e podem ser encontrados com frequência na natureza.

Analisando plantas como o bambu, troncos de árvores, conchas de moluscos ou a estrutura óssea de diversos animais, é possível notar a presença de uma gradual transição da sua composição e estrutura de acordo com as solicitações às quais esses materiais são submetidos (SILVA; WALTERS; PAULINO, 2006; MIYAMOTO et al., 1999). A secção transversal do caule de um bambu, mostrada na Figura 2.1, serve de exemplo para esta afirmação onde é possível verificar a variação estrutural, que busca conferir maior resistência à planta.

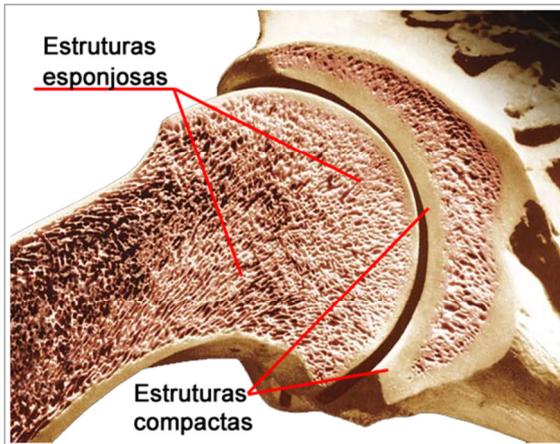
Figura 2.1 – Secção transversal do caule de bambu mostrando a distribuição radial das fibras na espessura.



Fonte: Adaptado de SILVA; WALTERS; PAULINO (2006).

Outro exemplo é a estrutura óssea humana que se comporta de maneira similar. A Figura 2.2 mostra a estrutura interna de um fêmur humano, onde é possível notar a transição gradual entre a estrutura esponjosa, de menor resistência, para a compacta, de maior resistência.

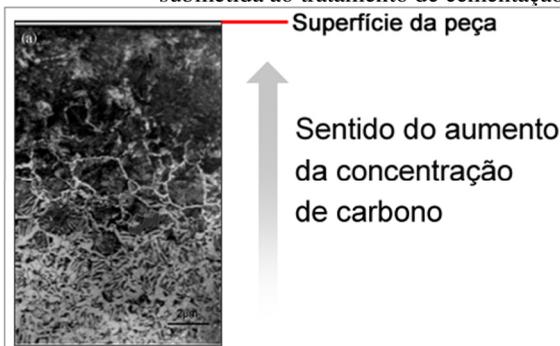
Figura 2.2 – Transição entre estruturas esponjosas para compactas em secção de um osso humano.



Fonte: Adaptado de ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA (2016).

Há muito tempo o homem também produz materiais com gradação funcional. Um bom exemplo são os metais submetidos ao tratamento de cementação, técnica que adiciona carbono por difusão em uma camada próxima à superfície dos aços de baixo carbono para permitir a temperabilidade desta camada. A Figura 2.3 ilustra essa situação, evidenciando a variação gradual da concentração de carbono em uma peça submetida ao tratamento de cementação.

Figura 2.3 – Aumento gradual da concentração de carbono em uma superfície submetida ao tratamento de cementação.



Fonte: Adaptado de LI et al. (2004).

A imagem da Figura 2.3 mostra que há uma concentração máxima de carbono imediatamente abaixo da superfície que diminui gradati-

vamente com a profundidade. Em decorrência da concentração de carbono elevada, a região próxima à superfície se torna temperável e a temperabilidade diminui na mesma proporção que diminui a concentração de carbono. Com o tratamento térmico de têmpera a camada temperável se torna dura, mas o interior permanece dúctil. O componente é capaz de resistir a esforços mecânicos sem quebrar e a superfície do mesmo apresenta maior resistência ao desgaste e tensões residuais compressivas. Tal configuração também pode ser interpretada como um FGM.

### **2.1.2 Principais técnicas de fabricação de materiais com gradação funcional**

As primeiras pesquisas visando à obtenção de materiais com gradação funcional tiveram como objetivo melhorar, inicialmente, as propriedades de materiais compósitos e poliméricos e começaram a ser desenvolvidas em 1972 (MIYAMOTO et al., 1999).

Pesquisas mais específicas, abordando projeto, fabricação e avaliação dos gradientes foram elaboradas na década de 1980, culminando na introdução do termo FGM (*Functionally Graded Materials*) em 1995 (MIYAMOTO et al., 1999).

O aprimoramento das técnicas de fabricação de FGM permitiu o controle local da microestrutura e propriedades do material fabricado. O controle sobre a estrutura do material é importante por permitir a combinação de características não presentes em materiais tradicionais. Em um material projetado especialmente para uma aplicação com demandas variadas, diferentes propriedades são combinadas, resultando em componentes que podem atender a múltiplas funções (RABIN; SHIOTA, 1995).

FGM estão entre os materiais mais complexos produzidos atualmente e suas principais técnicas de fabricação são a deposição de vapor (*Vapor Deposition Techniques - VDT*), a metalurgia do pó (*Powder Metallurgy - PM*), a fundição centrífuga (*Centrifugal Casting - CS*) e a fabricação de forma livre<sup>2</sup> (*Solid Freeform Fabrication Method - SFFM*) (GUPTA; TALHA, 2015).

---

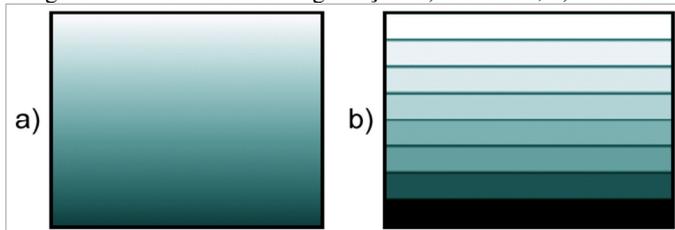
<sup>2</sup> Tecnologia também conhecida por outros termos como prototipagem rápida, impressão 3D, *rapid manufacturing (RM)*, fabricação por adição de camadas entre outros (BEAL, 2005). Neste documento o termo *manufatura aditiva* será empregado, por apresentar uma definição mais abrangente e atual.

### 2.1.3 Materiais compósitos e FGM

Materiais com gradação funcional fazem parte do grupo dos materiais compósitos. Esta classe de materiais apresenta estruturas heterogêneas, caracterizadas por transições entre suas propriedades (KIM et al., 2014).

As transições podem ser classificadas em dois tipos, discretas (*step-wise*) ou contínuas. A Figura 2.4 apresenta os dois exemplos de estruturas com gradação.

Figura 2.4 – Estruturas com gradação: a) Contínua; b) Discreta.



Fonte: Adaptado de MIYAMOTO et al. (1999).

Na estrutura com gradação contínua, as propriedades variam de forma suave e na estrutura com transições discretas, esta variação é formada por vários incrementos (MIYAMOTO et al., 1999).

A principal desvantagem de uniões discretas com variações abruptas é o possível acúmulo de tensões, que podem ser residuais internas ou causadas por esforços externos aplicados ao material. A teoria de materiais com gradação funcional sugere que tais tensões podem ser minimizadas se houver uma transição gradual entre os dois materiais (BEAL, 2005).

### 2.1.4 Classificação dos materiais com gradação funcional

Há várias técnicas de fabricação de materiais com gradação funcional e é possível classificar os tipos de FGM de acordo com a técnica utilizada para sua obtenção.

De acordo com S. Suresh (1998), os materiais com gradação funcional podem ser classificados em duas amplas categorias, sendo a primeira baseada em processos construtivos e a segunda em processos com transporte de massa.

A base para a fabricação de FGM através da manufatura aditiva é formada por alguns processos compreendidos na categoria dos processos construtivos, como a densificação de pós e a adição de laminados.

A Tabela 2.1 apresenta uma classificação mais detalhada, proposta por Miyamoto et al. (1999). A primeira coluna da tabela apresenta o tipo de processo utilizado para a fabricação do FGM e a segunda e terceira coluna apresentam os mecanismos utilizados para consolidar a matéria-prima durante a fabricação do FGM.

Tabela 2.1 – Classificação dos métodos de processamento de FGM.

Processo	Métodos	
	<b>Processamento de partículas</b>	<b>Empilhamento</b>
Pó		Eliminação de poros
Fibras		Infiltração
Folhas		
<b>Processamento de camadas</b>	<b>Deposição molecular</b>	<b>Deposição mecânica</b>
	Vapor	Laminação
	Elétrica	Spray
<b>Processamento de pré-forma</b>	<b>Difusão</b>	<b>Campos graduados</b>
	Sólida	Térmico
	Líquida	Elétrico
	Vapor	Outros
<b>Processamento de líquido</b>	<b>Decantação</b>	<b>Solidificação</b>

Fonte: Adaptado de MIYAMOTO et al. (1999).

A classificação de Miyamoto é baseada no tipo do material utilizado, que pode ser em partículas, camadas, uma pré-forma ou líquido.

Na categoria baseada em processamento de partículas, na classificação proposta por Miyamoto, estão incluídas as tecnologias de SLS/SLM que podem ser utilizadas para a fabricação de FGM.

Como o processo de fabricação é baseado na adição de camadas, é possível variar os parâmetros de fabricação para cada camada, ou mesmo, estas podem ter suas composições gradualmente alteradas, resultando em uma peça com o gradiente desejado (KIEBACK; NEUBRAND; RIEDEL, 2003).

### 2.1.5 Aplicações de FGM

Em uma grande variedade de aplicações, componentes capazes de combinar características antagônicas são necessários. Por exemplo, há aplicações em que dureza e ductilidade são desejáveis em regiões diferentes de uma peça. Materiais com gradação funcional podem atender a esse tipo de demanda (MAHAMOOD et al., 2012).

A literatura apresenta uma ampla gama de aplicações para FGM, entre elas, componentes para aplicações tribológicas (SU et al., 2013), implantes para liberação de fármacos (YASUKAWA et al., 2005), engenharia tecidual (SHARIFI et al., 2016; CHEN; LIU, 2015), componentes para a indústria aeroespacial (WILLIAMS; STARKE, 2003; FROES, 1989; H; YEOVIL; BA, 1985), condução de calor em moldes (BEAL, 2005), sensoriamento embutido (SCHULTES et al., 2007), entre outros.

A transição gradual em um FGM pode ser aplicada em qualquer situação na qual se busque a redução das tensões causadas pela variação brusca da composição, como em materiais diretamente ligados (*Directly Jointed Material – DJM*). DJM apresentam como desvantagem o favorecimento à formação de trincas, responsáveis por falhas relativamente comuns em alguns componentes de mancais (LEADER, 2001) ou escudos térmicos (COOLEY, 2005; KOIZUMI; NIINO, 1995). Esta desvantagem pode ser reduzida pela transição gradual promovida pelo FGM (JUNG et al., 1997).

Além disto, a utilização de FGM possibilita a otimização de componentes mecânicos, permitindo características físicas alinhadas com as solicitações impostas pela aplicação, (MUMTAZ; HOPKINSON, 2007).

Apesar de não ser possível encontrar várias combinações de propriedades antagônicas em um mesmo material de forma natural, materiais com gradientes funcionais podem ser utilizados para cobrir este tipo de demanda (MAHAMOOD et al., 2012). Além de aplicações estruturais, é possível variar propriedades termodinâmicas, elétricas, químicas, biológicas e até mesmo ópticas.

A Tabela 2.2 apresenta os efeitos alcançados em cada categoria funcional e exemplos de aplicação.

Tabela 2.2 – Classificação funcional de FGM.

<b>Função</b>	<b>Tipo de efeito desejado</b>	<b>Exemplo de aplicação</b>
<b>Estrutural</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rigidez</li> <li>• Resistência</li> <li>• Dureza/Resistência ao atrito</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tanques espaciais de baixo peso</li> <li>• Motores leves de alto desempenho</li> </ul>
<b>Termodinâmica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condução/Difusão térmica</li> <li>• Termoelétricas</li> <li>• Emissividade/Absortividade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condução diferencial em moldes</li> <li>• Laminas de turbinas resistentes ao calor</li> </ul>
<b>Elétricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condução/Isolamento</li> <li>• Dielétricos</li> <li>• Piezoelétricos</li> <li>• Semicondução</li> <li>• Bateria ativa</li> <li>• Termopar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensoriamento embutido</li> <li>• Baterias deformáveis leves</li> <li>• Geração de energia</li> </ul>
<b>Químicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biocompatibilidade</li> <li>• Bioquímicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Próteses</li> <li>• Biossensores</li> <li>• Dispositivos para aporte de medicamentos</li> </ul>
<b>Ópticas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difração/Refração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lentes graduadas (<i>Grim Lenses</i>)</li> </ul>

Fonte: Adaptado de BEAL (2005).

A literatura científica explora várias destas aplicações para diferentes tipos de materiais.

### 2.1.6 Tribologia e FGM

Um campo bastante explorado em diversos trabalhos é a otimização de propriedades tribológicas (MISHINA; INUMARU; KAITOKU, 2008; POMPE et al., 2003; PRCHLIK et al., 2001). Normalmente a face da peça submetida ao atrito deve apresentar propriedades que minimizem os efeitos colaterais do atrito, como desgaste e erosão, enquanto a base deve ser dúctil e resistente.

Segundo a ASTM G40 (2015), o desgaste ou erosão consistem na deterioração de uma superfície sólida, geralmente envolvendo perda progressiva de material, devido ao movimento relativo entre superfícies, entre uma superfície e um fluido, fluido multicomponente, ou colisão de líquidos ou partículas sólidas.

Uma maneira de contornar o desgaste e a erosão é através da utilização de revestimentos dedicados à diminuição destes efeitos.

Materiais compósitos são uma opção e tem sido utilizados para aplicações tribológicas. Normalmente tais materiais são depositados na forma de um revestimento de proteção superficial (NOVAK et al., 2007; PRCHLIK et al., 2001).

Entretanto, em determinadas aplicações os revestimentos podem apresentar falhas, que podem ser relacionadas com incompatibilidades de coeficientes de expansão térmica, módulos de elasticidade e dureza entre os materiais.

As falhas são potencializadas por tensões residuais induzidas pelo processo ou relacionadas com o modo de operação do componente e são responsáveis pela delaminação de camadas depositadas ou trincas interfaciais (MISHINA; INUMARU; KAITOKU, 2008; PRCHLIK et al., 2001).

A Figura 2.5 mostra um exemplo do mecanismo de falha que pode ser observado em alguns tipos de mancal, onde solicitações cíclicas promovem o desenvolvimento de trincas que culminam no descolamento do metal patente<sup>3</sup> em um mancal.

---

<sup>3</sup> O termo metal patente ou metal babbitt, designa ligas baseadas em estanho ou chumbo utilizadas em superfícies de deslizamento. Foram inventadas em 1939 por Isaac Babbitt para utilização em motores a vapor (“Encyclopaedia Britannica”, 2016).

Figura 2.5 – Formação de trincas em material com variação abrupta de composição: 1) Nucleação da trinca; 2) Propagação da trinca; 3) Descolamento do material; 4) Cavidade formada.



Fonte: LEADER (2001).

Quando os revestimentos resistentes ao atrito são produzidos na forma de um FGM, há vantagens relacionadas com a resistência à propagação de trincas e concentração de tensões (NOVAK et al., 2007; PRCHLIK et al., 2001).

Várias propriedades físicas podem ser otimizadas pela utilização de FGM em diversas aplicações. Em materiais submetidos à fricção o revestimento da peça com materiais resistentes ao atrito utilizando FGM pode resultar em diminuição de peso, maior adesão entre os materiais, diminuição das tensões residuais internas, além do aumento na resistência à propagação de defeitos superficiais (MAHAMOOD et al., 2012; NOVAK et al., 2007; PRCHLIK et al., 2001)

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

As primeiras patentes relacionadas com técnicas de manufatura aditiva surgiram no fim dos anos 1980 (D. L. BOURELL, H. L. MARCUS, J. W. BARLOW, 1991; DECKARD, 1990).

Diferente da maioria dos métodos de fabricação até então empregados, a manufatura aditiva não é baseada na remoção de material, mas sim na adição, através da sobreposição de camadas que formam a peça (PATRI K. VENUVINOD, 2004).

### 2.2.1 Aplicações da manufatura aditiva

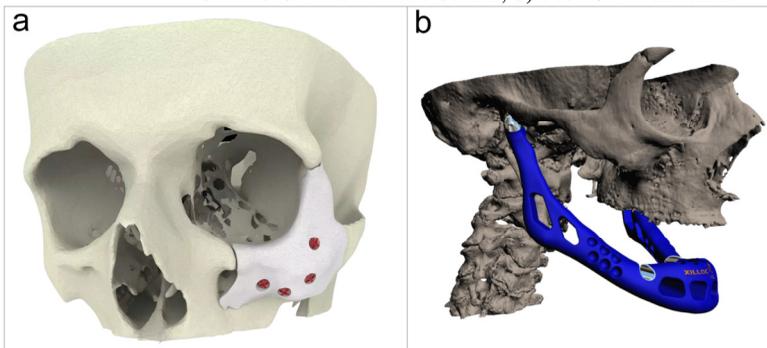
A manufatura aditiva possui grande aplicação na fabricação de produtos que exigem alto grau de customização, baixo volume de produção e elevada complexidade geométrica. Produtos finais são geralmente aplicados na indústria aeroespacial, na automotiva de alta tecnologia e em aplicações biomédicas, exemplos de aplicação onde a complexidade e a possibilidade de baixo volume de produção favorecem a aplicação da AM (GAO et al., 2015).

Além disto, a AM permite fabricar equipamentos e peças com massa reduzida, fator crucial para um maior desempenho e economia nos campos citados.

A indústria aeroespacial já utiliza as técnicas de fusão seletiva a laser (SLM) e por feixe de elétrons (EBM) para produzir peças aplicadas em aeronaves comerciais. Estas tecnologias abriram uma vasta gama de possibilidades, graças à capacidade de processar diversos tipos de ligas particuladas obtendo peças para variadas aplicações (WONG; HERNANDEZ, 2012).

As aplicações medicinais também são vastas e permitem a fabricação de próteses customizadas de alta qualidade, projetadas para o trauma específico sofrido pelo paciente. As próteses podem ser porosas, permitindo inclusive a vascularização e melhorando a interação com o tecido vivo (WONG; HERNANDEZ, 2012). A Figura 2.6 mostra exemplos de próteses que são obtidas com a manufatura aditiva.

Figura 2.6 – Exemplos de próteses produzidas por manufatura aditiva: a) Prótese da base da cavidade ocular; b) Prótese de maxilar.



Fonte: XILLOC-MEDICAL (2016).

Há também aplicações da AM relacionadas com o trabalho de artistas e arquitetos, a possibilidade de fabricar modelos complexos auxilia na demonstração de projetos e testes de funcionalidade.

## 2.2.2 Técnicas de manufatura aditiva

As técnicas de manufatura aditiva normalmente utilizam um sistema computadorizado para controlar o processo de fabricação. Inicialmente uma peça é modelada em 3D com um sistema de projeto assistido por computador (CAD) ou outros equipamentos de engenharia reversa, como digitalizadores ópticos.

Em seguida o modelo tridimensional é convertido em um arquivo que pode ser interpretado pelos equipamentos de AM, normalmente no formato .STL (*Structural Triangular Language*).

No próximo passo o arquivo .STL é importado para um software CAM e matematicamente fatiado em camadas que representam as curvas de nível do modelo.

O último passo é a consolidação de cada camada pelo sistema de AM, formando assim a peça planejada (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2009; VOLPATO et al., 2007). A Figura 2.7 mostra esquematicamente as etapas gerais do processo.

Figura 2.7 – Etapas gerais do processo de Manufatura Aditiva.



Fonte: Adaptado de CAMPBELL et al. (2012).

Por ser baseada no princípio de adição de material, a manufatura de peças por AM ganha em flexibilidade de projeto, diminuindo a necessidade de processos de montagem e possibilitando uma produção mais econômica e rápida de peças customizadas (GAO et al., 2015).

Atualmente, muitas técnicas de manufatura por adição de camada já estão comercialmente disponíveis. A Tabela 2.3 mostra a classificação adotada pela ASTM para cada uma destas técnicas.

Tabela 2.3 – Processos de manufatura aditiva pela ASTM Internacional.

Categoria	Exemplos de tecnologias	Matéria prima	Fonte de energia	Algumas características gerais
Extrusão de material	Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Termoplásticos, suspensões cerâmicas, pastas metálicas	Energia térmica	Máquina de extrusão de baixo custo
	Construção por contornos			Impressão multimaterial
Fusão em leito de pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Polímeros, pós metálicos atomizados, pós cerâmicos	Feixe laser de alta energia	Resolução limitada da peça
	Sinterização direta de metal a laser (DMLS)			Baixa qualidade superficial
	Fusão seletiva a laser (SLM)		Feixe de elétrons	Alta precisão e detalhes
	Fusão por feixe de elétrons (EBM)			Peças com elevada densidade
Fotopolimerização em cuba	Estereolitografia (SL)	Foto polímeros, Cerâmicas (Alumina, Zircônia, PZT)	Luz ultravioleta	Alta resistência e rigidez
				Manipulação e reciclagem do pó
				Estruturas de ancoragem e suporte
				Peças com elevada densidade
Jateamento de materiais	<i>Polyjet</i> / Impressão a jato de tinta	Foto polímeros, ceras	Energia térmica/ cura pela ação da luz	Alta resistência e rigidez
				Alta velocidade de construção
				Boa resolução da peça
				Sobre cura - forma escaneada por linha
Jateamento de aglutinante	Impressão indireta a jato de tinta	Pó polimérico, (gesso, resina), pó cerâmico, pó metálico	Energia térmica	Alto custo de suprimentos e materiais
				Impressão multimaterial
				Boa qualidade superficial
				Baixa resistência da peças
Adição de laminados	Manufatura laminar de objetos (LOM)	Filme plástico, Folha metálica, Fita cerâmica	Feixe de laser	Impressão de objetos coloridos
				Requer pós-processamento de infiltração
				Ampla seleção de materiais
				Alta porosidade nas peças acabadas
Deposição direta de energia	Fabricação de forma final a laser (LENS) Soldagem por feixe de elétrons (EBW) <i>Laser Cladding (LC)</i>	Pó ou filamentos	Feixe de laser, elétrons ou plasma	Boa qualidade superficial
				Baixo custo de material, máquina e processamento
				Dificuldade para remover sobras de material
				Utilizado no reparo peças danificadas/desgastadas
				Impressão de materiais com FGM
				Requer pós-processamento

Fonte: Adaptado de GAO et al. (2015).

### 2.2.3 Fusão e sinterização seletiva

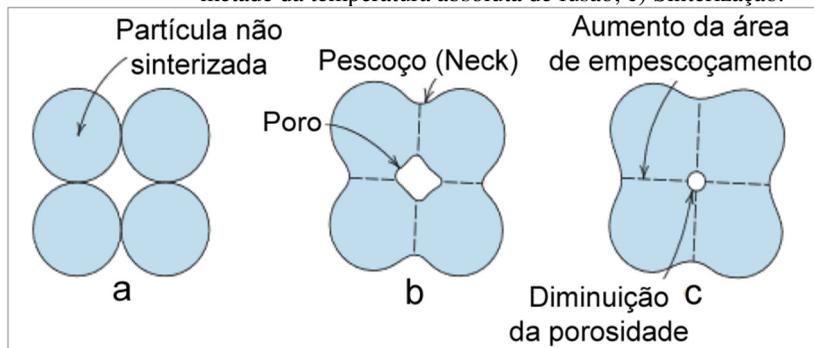
A categoria baseada na fusão de camadas de pós geralmente utiliza uma fonte de energia do tipo feixe de luz laser ou feixe de elétrons para fundir ou sinterizar de maneira seletiva o material e é considerada uma das mais versáteis (KRUTH et al., 2007).

Inicialmente a técnica foi aplicada para sinterização de materiais poliméricos e atualmente é aplicada também na fabricação de peças cerâmicas e metálicas. Entre as técnicas mais populares dessa categoria estão a sinterização ou fusão seletiva a laser (SLS/SLM) e a fusão por feixe de elétrons (EBM), com as quais é possível produzir peças com elevadas densidade e resistência mecânica (GAO et al., 2015).

Segundo Kruth et al. (2007), a utilização do laser como fonte de energia para consolidação de materiais particulados torna possível o processamento de uma ampla gama de cerâmicas, polímeros, metais ou compósitos. Ainda segundo o autor, os materiais processados por SLS/SLM apresentam vários mecanismos de consolidação, sendo que a adesão das partículas, composição e estrutura da peça final é dependente, entre outros fatores, das propriedades do pó ou mistura de pós.

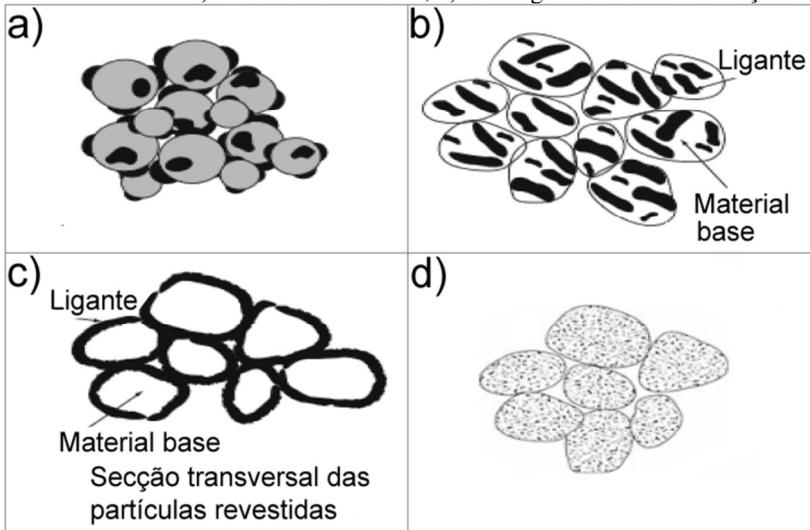
A principal diferença entre as técnicas SLS e SLM é o mecanismo de consolidação entre as partículas. Enquanto a técnica SLS é baseada em sinterização no estado sólido (*SSS – Solid State Sintering*) – Figura 2.8, sinterização por fase líquida (*LPS – Liquid Phase Sintering*) – Figura 2.9, e ligação induzida quimicamente, a SLM funde completamente as partículas (*full melting*) para promover a consolidação (KRUTH et al., 2005).

Figura 2.8 – Sinterização no estado sólido: a) Partículas empacotadas antes da sinterização; b) Partículas aglomeradas a temperatura acima da metade da temperatura absoluta de fusão; c) Sinterização.



Fonte: Adaptado de GIBSON; ROSEN; STUCKER (2015).

Figura 2.9 – Sinterização por fase líquida, utilizando ligante diferente do material estrutural: a) Partículas separadas; b) Partículas compósitas; c) Partículas revestidas; d) Prosseguimento da sinterização.



Fonte: Adaptado de GIBSON; ROSEN; STUCKER (2015).

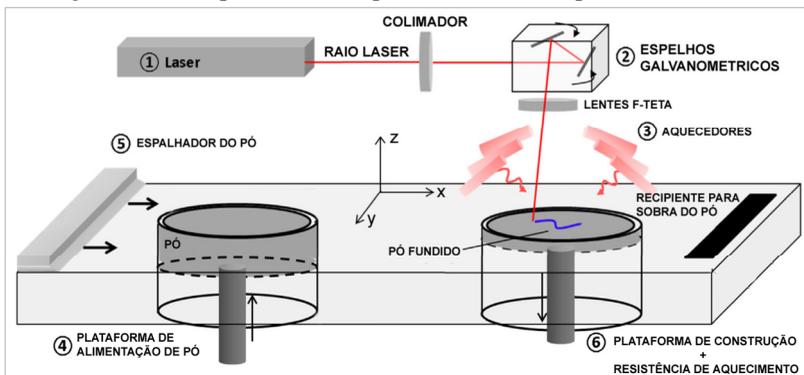
A principal vantagem das técnicas SLS e SLM é a variedade de materiais que podem ser processados, além de ser possível reutilizar o pó que não foi sinterizado ou fundido no processo.

Entre as principais limitações estão a precisão, que é limitada pelo tamanho das partículas e diâmetro do feixe laser, bem como a necessidade de evitar a esferoidização do pó quando fundido (*balling*<sup>4</sup>) e oxidação de materiais metálicos, processando o pó preferencialmente em uma atmosfera inerte ou controlada, geralmente, utilizando argônio ou nitrogênio (WONG; HERNANDEZ, 2012).

A Figura 2.10 mostra um esquema simplificado com os principais componentes de um sistema de sinterização ou fusão seletiva a laser.

<sup>4</sup> *Balling* consiste na esferoidização do metal fundido devido a instabilidades termodinâmicas e cinéticas. É resultado de uma baixa molhabilidade e é potencializado pela presença de óxidos e impurezas. Sua presença pode provocar o bloqueio do sistema espalhador de pó (GU et al., 2012; LI et al., 2012; KRUTH et al., 2004).

Figura 2.10 – Representação esquemática de um dispositivo SLS/SLM.



Fonte: Adaptado de PEYRE et al. (2015).

O laser é gerado em uma fonte e o feixe de luz resultante é direcionado para um dispositivo colimador. Em seguida, um conjunto de espelhos galvanométricos direciona o feixe de acordo com a geometria da camada que está sendo construída.

Lasers de Nd:YAG (comprimento de onda de  $1,061 \mu\text{m}$ ) e  $\text{CO}_2$  (comprimento de onda de  $10,6 \mu\text{m}$ ) podem ser utilizados para o processamento do material particulado, entretanto, lasers de Nd:YAG apresentam vantagens para o processamento de metais, já que o comprimento de onda destes possibilita maior absorção da energia pelos materiais metálicos. As potências normalmente variam de 100W a 500W (LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003), com alguns equipamentos atingindo 1KW de potência (SING et al., 2016).

Após o processamento da camada, a plataforma de construção se movimenta na direção negativa do eixo z o equivalente a espessura de uma camada. Em seguida, uma nova camada de pó é espalhada e o procedimento se repete. Normalmente o pó de cada camada é espalhado a partir da plataforma de alimentação até a plataforma de construção por um dispositivo espalhador. O conjunto pode contar ainda com elementos aquecedores do pó em processamento.

#### 2.2.4 Parâmetros de processamento em SLS/SLM

A qualidade dos materiais fabricados por manufatura aditiva é função de várias condições de fabricação, sendo afetada, por exemplo, pelas características da matéria-prima utilizada (tipo e morfologia) ou pelos parâmetros de processamento aplicados.

Esta complexidade do processo exige extensa pesquisa sobre o tema, até que o processo possa ser aplicado de forma viável para uma grande variedade de matérias-primas (KRUTH et al., 2007).

Um exemplo é o processamento de pós que apresentam variações de composição. Cada composição terá um conjunto de parâmetros ótimos de processamento, significando que durante a fabricação da peça, cada composição deve ser processada com parâmetros específicos, para que se possa obter o melhor conjunto de características desejadas no material da peça fabricada.

Os diversos parâmetros associados com o processamento por SLS/SLM podem ser divididos em dois grupos, o primeiro relacionado com a matéria-prima e o segundo, relacionado com o processo (YADROITSEV; BERTRAND; SMUROV, 2007; KRUTH et al., 2005; CHILDS; HAUSER; BADROSSAMAY, 2004; SIMCHI, 2004; TAYLOR, 2002), como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Parâmetros que influenciam no processo SLS/SLM.

<b>Parâmetros</b>	
<b>Relacionados ao material</b>	<b>Relacionados ao processo</b>
<b>Propriedades e composição química</b>	Potência e tipo do laser
<b>Propriedades térmicas</b>	Comprimento de onda do laser
<b>Propriedades óticas</b>	Diâmetro do feixe laser
<b>Propriedades Metalúrgicas</b>	Velocidade de varredura do laser
<b>Propriedades Mecânicas</b>	Distância entre filetes sucessivos
<b>Propriedades Reológicas</b>	Espessura da camada
<b>Granulometria das partículas</b>	Estratégia de preenchimento das camadas
<b>Morfologia das partículas</b>	Controle atmosférico

Fonte: Adaptado de BEAL (2005).

Como os parâmetros apresentam variações para cada sistema de AM, devido a características óticas, tipo do laser, propriedades do material particulado, entre outras, uma maneira mais precisa e prática de comparação entre eles é a densidade de energia específica.

De acordo com OLAKANMI (2013), a densidade de energia específica é definida por

$$\varphi = \frac{P}{u \times h \times D} \quad (2.1)$$

onde  $\phi$  é a densidade de energia específica [J/mm<sup>3</sup>], P é a potência aplicada pelo laser [W], u é a velocidade de varredura do feixe laser [mm/s], h corresponde a distância entre cada linha consecutiva do laser (*hatching*) [mm] e D é a espessura da camada [mm].

### 2.2.5 Técnicas aplicadas na AM de FGM

Apesar do grande volume de trabalhos sobre fabricação aditiva disponível na literatura, técnicas e parâmetros aplicados no processamento de materiais com gradiente funcional (FGM), ainda demandam maior investigação (GAO et al., 2015; MUMTAZ; HOPKINSON, 2007).

Como já mencionado, entre as diversas técnicas de AM, a baseada em SLS/SLM é considerada como sendo uma das melhores opções para o desenvolvimento de novos materiais com FGM (MAHAMOOD et al., 2012). Entretanto, esta técnica ainda apresenta restrições ou limitações, sendo que as principais estão relacionadas com a eliminação ou minimização de trincas, distorções, porosidades e segregação entre os componentes do FGM fabricado (MUMTAZ; HOPKINSON, 2007).

Estes defeitos podem ser minimizados com a utilização de parâmetros otimizados e algumas técnicas de processamento diferenciadas, como observado em alguns trabalhos.

Em se tratando de materiais metálicos e utilizando um equipamento de fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting – SLM*) com otimização dos parâmetros e utilização da técnica *refill*, BEAL (2005), obteve um gradiente entre aço ferramenta e cobre, partindo de 100% de aço ferramenta até uma concentração de 50% de cobre e 50% aço ferramenta, buscando melhorar a condução térmica em regiões específicas de um molde para injeção.

MUMTAZ; HOPKINSON (2007) utilizando o mesmo processo, obtiveram um FGM entre Waspaloy<sup>®5</sup> e zircônia, partindo de 100% de Waspaloy<sup>®</sup> até 90% de Waspaloy<sup>®</sup> e 10% de Zircônia, buscando melhorar a adesão da zircônia no Waspaloy<sup>®</sup> através da diminuição das tensões interfaciais, alcançada pela utilização de um gradiente entre os dois materiais.

---

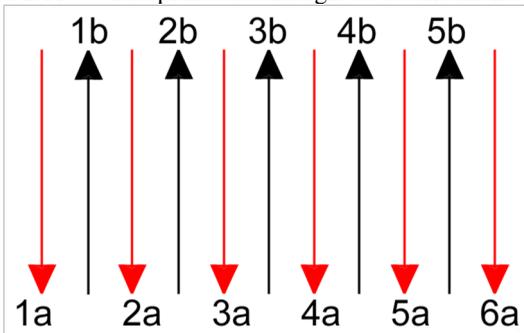
<sup>5</sup> O Waspaloy<sup>®</sup> é uma liga baseada em níquel para aplicações em alta temperatura, muito aplicada em peças de motores a jato. A zircônia é uma cerâmica muito utilizada para isolamento térmico desses componentes (MUMTAZ; HOPKINSON, 2007).

MAHAMOOD; AKINLABI (2015) empregaram a técnica de deposição de metal a laser (*Laser Metal Deposition – LMD*) e produziram um gradiente entre Ti6Al4V e TiC, partindo de 0% de TiC até 50% de TiC e 50% de Ti6Al4V. Os resultados mostraram que parâmetros otimizados para cada composição do gradiente apresentaram melhores resultados de dureza e resistência ao desgaste, quando comparados com o FGM produzido com parâmetros fixos.

### 2.2.5.1 Técnica *refill*

A técnica de *refill*, representada pela Figura 2.11, é uma técnica de escaneamento utilizada para aumentar a densidade das peças fabricadas. A técnica é baseada no reenchimento de vazios eventualmente formados pela contração do material ao solidificar ou pela expulsão (*spattering*) das partículas de pó pela interação com a energia do laser.

Figura 2.11 – Visão plana da estratégia de escaneamento *refill*.



Fonte: Adaptado de MUMTAZ; HOPKINSON (2007).

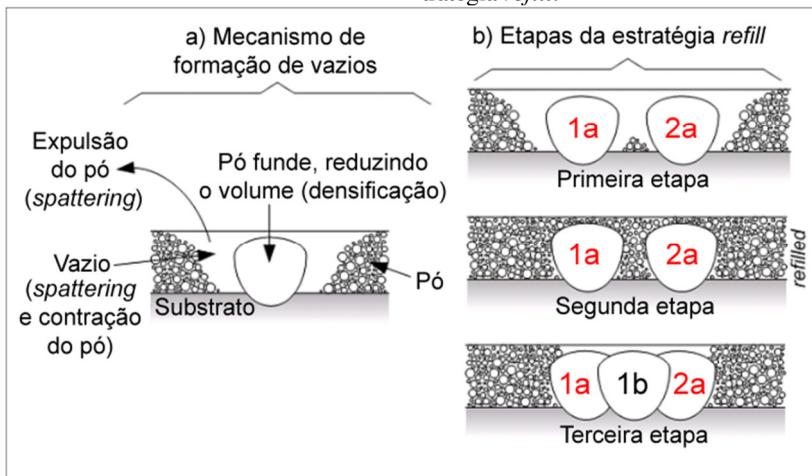
Nesta técnica a energia do laser processa cada camada em três etapas. Na primeira etapa, após o espalhamento do material, o primeiro conjunto de linhas é processado. Em decorrência do coalescimento das partículas sob estas trajetórias (1a, 2a, 3a, 4a, 5a, e 6a), se formam vazios entre as linhas processadas pelo laser.

Na segunda etapa, uma nova camada de pó é espalhada, sem que haja movimentação do substrato de fabricação, preenchendo os vazios formados na etapa anterior.

A terceira etapa consiste no processamento das regiões preenchidas na segunda etapa (linhas 1b, 2b, 3b, 4b e 5b) completando assim a varredura da camada.

A Figura 2.12 mostra, de forma esquemática, o mecanismo de formação dos vazios na cama de pó e as três etapas da estratégia *refill*.

Figura 2.12 – Representação esquemática da estratégia *refill*: a) Mecanismo de formação de vazios; b) Etapas de preenchimento e refusão na estratégia *refill*.



Fonte: Adaptado de BEAL (2005).

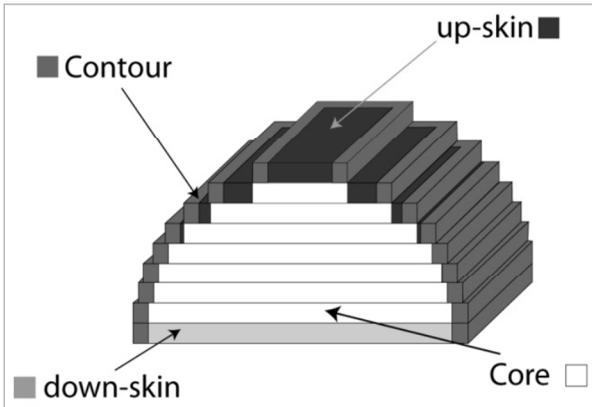
Entre os trabalhos que utilizaram esta técnica estão os trabalhos de BEAL (2005) e o de MUMTAZ; HOPKINSON, (2007) que buscou aumentar a densidade das peças fabricadas, alcançando densidades relativas de 99,66%.

#### 2.2.5.2 Técnica de escaneamento por ilhas e xadrez

Outras duas técnicas utilizadas para melhorar a qualidade das peças fabricadas são o escaneamento por ilhas (*Islands*) e xadrez (*Chess-board*). Nestas técnicas a camada que está sendo processada é dividida em diversas seções quadradas que são processadas individualmente, permitindo uma customização dos parâmetros de acordo com a região da camada processada (INSIDEMETALADDITIVEMANUFACTURING, 2015).

Para isto o software fatia o sólido e classifica as regiões de cada camada, como ilustrado na Figura 2.13, em *core*, para regiões do interior da peça, *contour*, para regiões de contorno da peça, *down-skin*, para partes inferiores (em balanço) da peça e *up-skin*, para regiões da peça que não terão outras camadas sobrepostas. Com isto, parâmetros refinados para cada uma destas regiões podem ser utilizados, melhorando as propriedades da peça fabricada (MANFREDI et al., 2013).

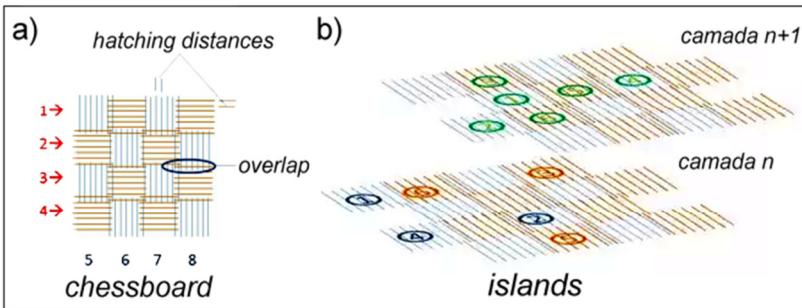
Figura 2.13 – Regiões diferentes em um sólido formado pelo empilhamento de camadas.



Fonte: MANFREDI et al. (2013).

No preenchimento *chessboard* os quadrados com hachura horizontal são processados primeiramente, seguidos pelos quadrados com hachura vertical, em uma analogia com o tabuleiro de xadrez. Já na técnica *islands* os quadrados são processados de maneira aleatória. A Figura 2.14 mostra as duas técnicas e a segmentação das camadas.

Figura 2.14 – Técnicas de escaneamento das camadas: a) *Chessboard*; b) *Islands*.



Fonte: Adaptado de INSIDEMETALADDITIVEMANUFACTURING (2015).

Os principais parâmetros configuráveis são a dimensão da lateral do quadrado, o *hatching* e o *overlap*, que é a sobreposição dos quadrados, para garantir que todas as partículas sejam processadas.

### 2.2.5.3 Otimização de parâmetros de processamento

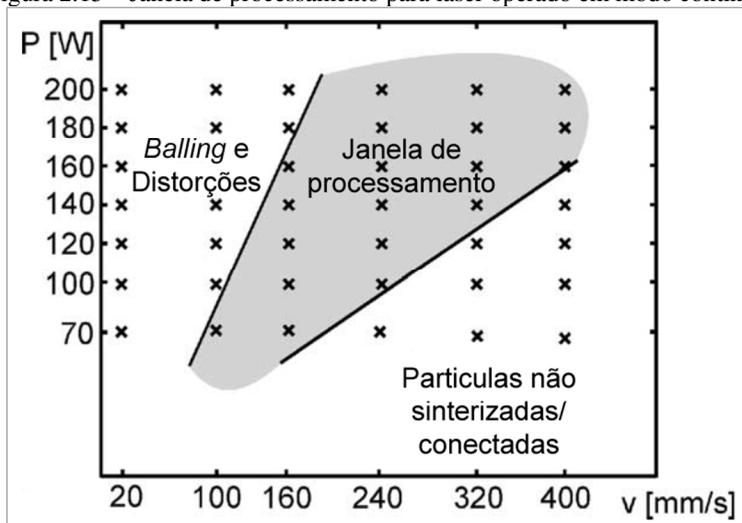
A possibilidade de variação dos parâmetros de potência do laser, velocidade de varredura do laser, espessura de camada de pó depositado e distância entre linhas processadas fornecem a flexibilidade necessária para a produção de FGM. Um exemplo desta flexibilidade é observada no trabalho de YADROITSEV et al. (2007), que fabricaram um FGM com quatro composições distintas.

Na primeira composição foi utilizada uma liga de cobalto, denominada Stellite 12, mais FeCu e WC/Co, na segunda composição, Stellite 12 mais FeCu, na terceira composição, aço inoxidável 430L e na quarta composição, somente Stellite 12. A sequência representa uma concepção típica de FGM, com variadas composições, cada uma processada com parâmetros específicos, resultando em propriedades específicas para cada região do material fabricado.

Para cada matéria-prima utilizada em SLM é possível associar um conjunto de parâmetros de processamento. Na Figura 2.15 é possível verificar o conjunto de parâmetros utilizados por KRUTH et al., (2004) para uma mistura de 50% em peso de Fe, 20% em peso de Ni, 15% em peso de Cu e 15% em peso de  $Fe_3P$ . O tamanho de grão utilizado foi 60  $\mu m$  para o Fe, Cu e  $Fe_3P$  e abaixo de 5  $\mu m$  para o Ni.

A região que permite o processamento é representada pela área escurecida no gráfico e é a janela de processamento.

Figura 2.15 – Janela de processamento para laser operado em modo contínuo.



Fonte: Adaptado de KRUTH et al. (2004).

Para cada potência do laser, a janela de processamento é delimitada por duas fronteiras. À esquerda são observadas as regiões onde o *balling* ou distorções ocorrem, inviabilizando o processamento. Na direita a região é delimitada pela falta de sinterização ou conexão entre as partículas. Ambas as regiões estão vinculadas à densidade de energia específica aplicada; se a densidade de energia específica aplicada for muito baixa, as partículas não sofrerão fusão ou sinterização, por outro lado, se a densidade de energia específica for excessivamente elevada, o material sofrerá distorções ou *balling*.

### **2.2.6 Materiais obtidos por AM para aplicações tribológicas**

Apesar da existência de trabalhos disponíveis na literatura abordando a obtenção de peças providas de FGM e fabricadas por SLS/SLM, estudos relacionados com as propriedades tribológicas aparecem em menor número e não foram encontrados trabalhos que abordassem especificamente a fabricação de FGM por SLM para esta aplicação.

Um exemplo de FGM aplicado em tribologia foi explorado por PRCHLIK et al. (2001), embora não tenham utilizado SLS/SLM para processar o material particulado. Os autores investigaram as propriedades tribológicas de FGM fabricados por spray de plasma e por injeção a alta velocidade de oxigênio e combustível (*high velocity oxy-fuel – HVOF*), utilizando os materiais Mo-Mo<sub>2</sub>C/aço inoxidável e WC-Co/aço inoxidável, ambos empregados em componentes submetidos ao atrito.

Com a grande variedade de materiais particulados disponíveis atualmente, é possível explorar diversas combinações de materiais e aplicações para FGM fabricado por AM, nesse contexto, a fabricação e análise de um FGM com propriedades tribológicas, obtido através de SLM pode contribuir para o estado da arte da tecnologia de AM.

Este contexto motivou o estudo da viabilidade de fabricação de um material com transição gradual de propriedades, explorado neste trabalho.

Para isto, dois materiais particulados foram escolhidos para processamento utilizando SLM, o primeiro sendo ferro puro e o segundo, uma liga baseada em estanho e prata, com base nas justificativas apresentadas no Capítulo 3.

## 2.3 FERRO METÁLICO

### 2.3.1 Propriedades e aplicações do ferro

O ferro é um elemento de transição do grupo VIII da tabela periódica dos elementos. O nome do elemento é proveniente do Latim *ferrum* (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1997). É um elemento metálico, maleável e dúctil, apresentando no estado sólido uma densidade específica de  $7,87 \text{ g/cm}^3$ .

O ferro apresenta grande atividade química, se combinando com muita facilidade com carbono, oxigênio, enxofre ou silício e formando assim, carbonetos, óxidos, sulfetos e silicatos, respectivamente.

É facilmente magnetizável em temperatura ambiente e de difícil magnetização em temperaturas superiores a  $790 \text{ }^\circ\text{C}$ . A Tabela 2.5 apresenta as principais propriedades deste material.

Tabela 2.5 – Propriedades do ferro.

Símbolo	Fe
Número atômico	26
Massa atômica	55,85 u
Densidade específica	$7,87 \text{ g/cm}^3$
Valência	2, 3, 4, 6
Ponto de fusão	$1535 \text{ }^\circ\text{C}$
Ponto de ebulição	$2750 \text{ }^\circ\text{C}$
Abundância na crosta da Terra	4,6%

Fonte: Adaptado de CHRISTIE; BRATHWAITE (1997).

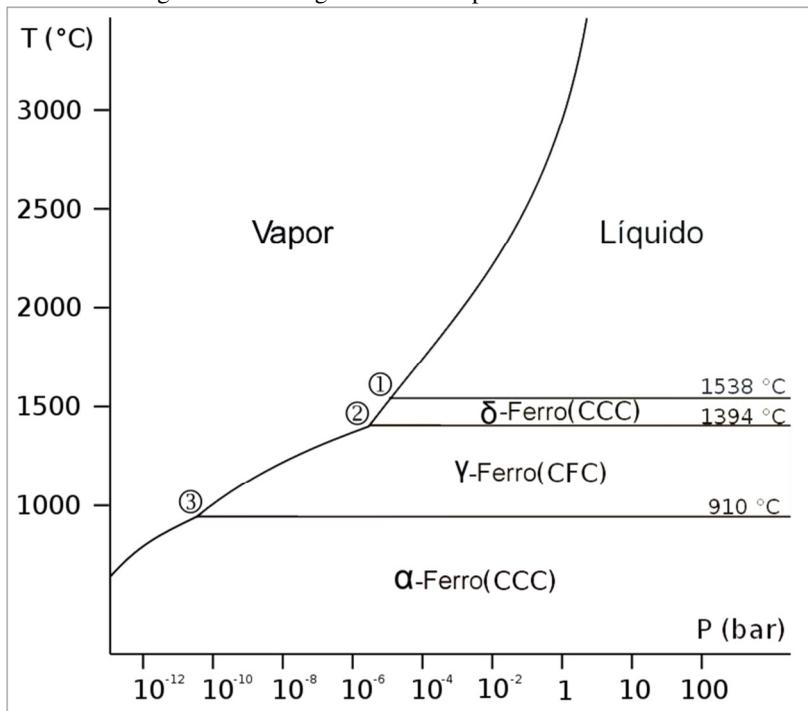
Quando exposto a atmosfera ambiente o ferro oxida, formando a ferrugem, um óxido de ferro hidratado quebradiço de coloração avermelhada. Trata-se de um processo eletroquímico (galvânico) de oxidação promovida pelo oxigênio (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1997).

O ferro é o metal com maior aplicação na sociedade moderna, sendo utilizado extensivamente na construção civil, em diversos tipos de transportes, na grande maioria dos eletrodomésticos, em vários tipos de maquinário, ferramentas, entre outros.

A maior parte do ferro é utilizado após processamento, geralmente na forma de ferro fundido ou aço (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1997).

O ferro apresenta alotropia, como pode ser observado no diagrama de fases (Pressão-Temperatura) para o ferro metálico na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Diagrama de fases para o ferro metálico.



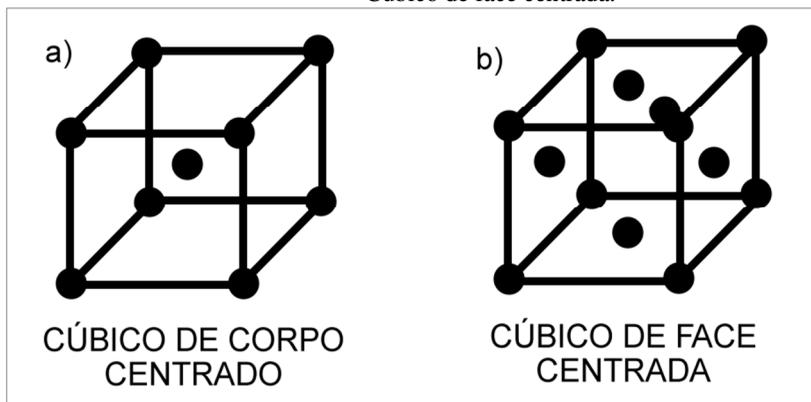
Fonte: Adaptado de WIKIPEDIA (2015).

A análise do diagrama possibilita observar que o ferro apresenta três fases sólidas, separadas e distintas: o Fe- $\alpha$  (alfa), o Fe- $\gamma$  (gama) e o Fe- $\delta$  (delta). Cada uma das três fases apresenta particularidades, sendo que o Fe- $\gamma$  apresenta estrutura CFC (cúbica de face centrada) enquanto o Fe- $\alpha$  e o Fe- $\delta$  apresentam a mesma estrutura CCC (cúbica de corpo centrado).

O diagrama mostra ainda as linhas de fronteira, onde as duas fases coexistem, além de três pontos, nos quais coexistem três fases diferentes: (1) líquido, vapor e Fe- $\delta$ , (2) vapor, Fe- $\delta$  e Fe- $\gamma$ , (3) vapor, Fe- $\gamma$  e Fe- $\alpha$ .

A Figura 2.17 apresenta as estruturas observadas nos estados alotrópicos do ferro, permitindo observar o posicionamento espacial dos átomos de ferro.

Figura 2.17 – Reticulados cristalinos do ferro: a) Cúbico de corpo centrado; b) Cúbico de face centrada.

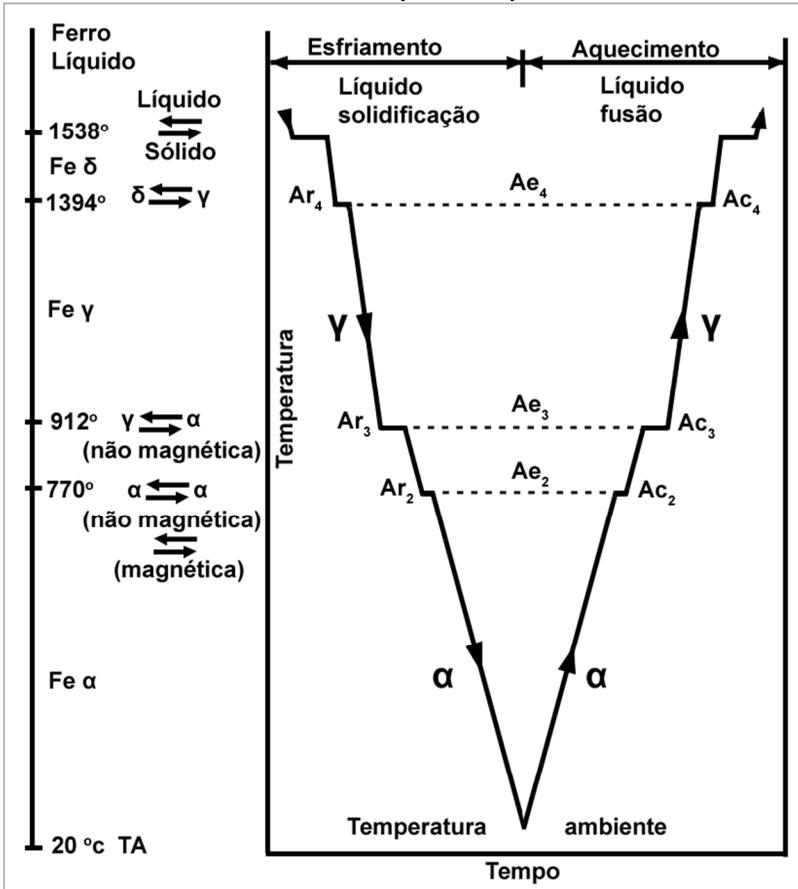


Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (1986).

### 2.3.2 Comportamento do ferro a pressão de 1 atm

O comportamento do ferro durante o aquecimento sob pressão constante de 1 atm (101.325 Pa) é representado pela Figura 2.18, onde à direita estão as curvas de resfriamento e aquecimento, indicando os pontos de transformações e as fases presentes.

Figura 2.18 – Representação esquemática das transformações alotrópicas do ferro sob um perfil de aquecimento a 1 atm.



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2012).

O ferro apresenta a forma sólida CCC até a temperatura de 910 °C, entretanto, antes de atingir essa temperatura, o ferro supera o ponto Curie<sup>6</sup> ao atingir a temperatura de 770 °C (1043,15 K), deixando de ser facilmente magnetizável.

<sup>6</sup> O ponto Curie corresponde à temperatura na qual o elemento sofre um rearranjo nos spins dos elétrons de cada átomo, alterando suas propriedades magnéticas. Quando esse fenômeno se considerava corresponder a uma nova forma alotrópica, o ferro era chamado “beta” (CHIAVERINI, 2012).

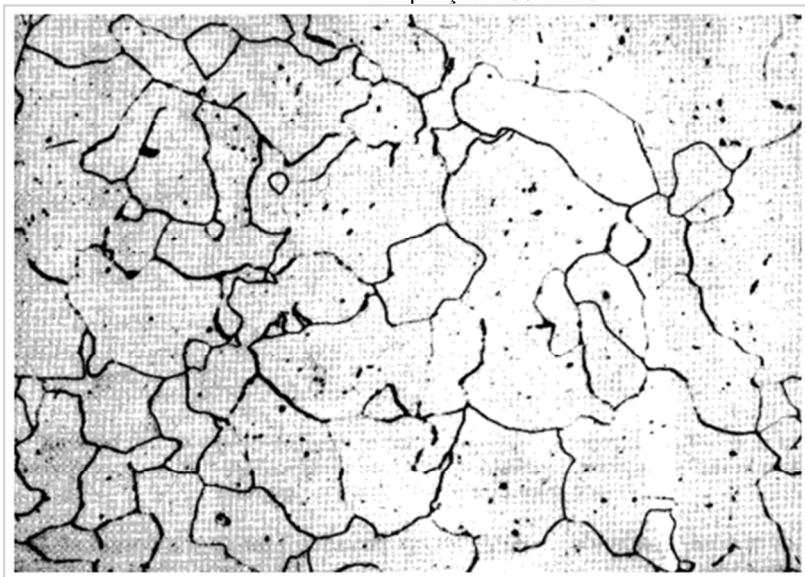
Quando o ferro atinge a temperatura de  $912\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sua estrutura cristalina sofre uma transformação, passando da forma CCC para a forma CFC e dando origem a fase  $\gamma$ , que se mantém até a temperatura de  $1394\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Prosseguindo com o aquecimento, o ferro sofre nova transformação, onde agora sua estrutura cristalina volta a ser CCC, dando origem ao Fe- $\delta$ . Esta fase, apresenta o parâmetro de rede maior quando comparado com o Fe- $\alpha$ .

A partir da temperatura de  $1538\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o ferro se torna líquido, alcançando o ponto de ebulição aos  $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A análise micrográfica do ferro permite verificar o arranjo dos grãos de ferrita presentes em sua microestrutura. A Figura 2.19 apresenta o aspecto microográfico do ferro.

Figura 2.19 – Aspecto microográfico do ferro. Ataque reativo de água régia.  
Ampliação: 100 vezes.



Fonte: CHIAVERINI (2012).

Na Figura 2.19 a ferrita é representada pelas regiões claras e os contornos de grãos, que definem os limites de cada grão, pelas linhas escuras.

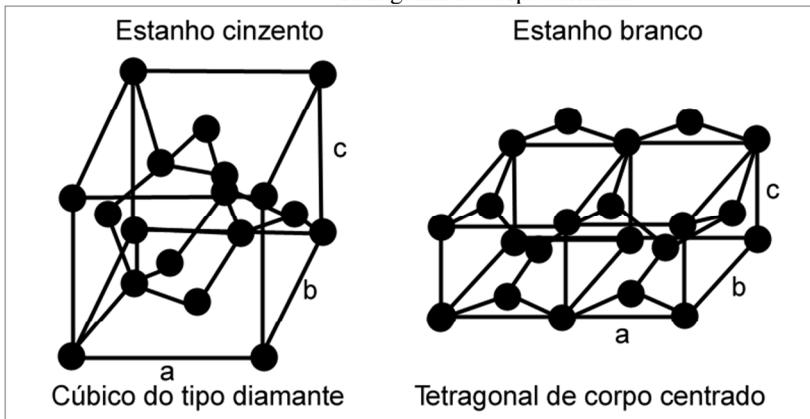
## 2.4 ESTANHO

### 2.4.1 Propriedades e aplicações do estanho

O estanho é um elemento do grupo IV A (ou 14) da tabela periódica dos elementos. O termo estanho é derivado do Latim *stannum*. É um dos primeiros elementos metálicos utilizados pelo homem desde a antiguidade e é utilizado como um dos elementos que compõe o bronze (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1996)

O estanho apresenta três formas alotrópicas, sendo duas principais, o estanho branco ( $\beta$ ), ou estanho comum, e o estanho cinzento ( $\alpha$ ), observado em temperaturas abaixo de 13,2 °C. A Figura 2.20 apresenta as estruturas cristalinas para os dois estados alotrópicos do estanho, permitindo observar o posicionamento espacial dos átomos.

Figura 2.20 – Reticulados cristalinos do estanho: a) Cúbico do tipo diamante; b) Tetragonal de corpo centrado.



Fonte: Adaptado de FIORUCCI; BENEDETTI FILHO; OLIVEIRA (2012).

Quando aquecido acima de 161 °C o estanho apresenta uma terceira forma alotrópica mais quebradiça, denominada estanho rômboico ( $\gamma$ ) que se funde a 231,8 °C (FIORUCCI; BENEDETTI FILHO; OLIVEIRA, 2012).

Nas CATP (condições ambientes de temperatura e pressão –  $P = 1 \text{ atm}$ ,  $T = 25 \text{ °C}$ ) possui densidade específica de  $7,29 \text{ g/cm}^3$ , se apresentando na forma  $\alpha$ . Nesse estado possui uma coloração branca prateada, é um metal macio, maleável e apresenta uma estrutura cristalina tetragonal.

A Tabela 2.6 apresenta as principais propriedades do estanho (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1996).

Tabela 2.6 – Propriedades do estanho.

Símbolo	Sn
Número atômico	50
Massa atômica	118,69 u
Densidade específica	5,77 / 7,29 g/cm <sup>3</sup>
Valência	4, 2
Ponto de fusão	231,9 °C
Ponto de ebulição	2270 °C
Abundância na crosta da Terra	2,5 ppm

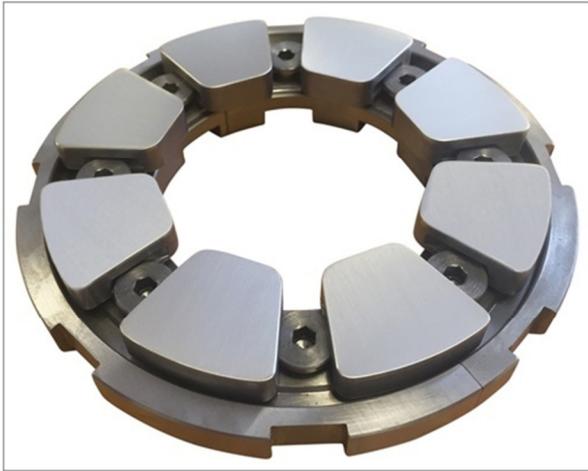
Fonte: Adaptado de CHRISTIE; BRATHWAITE (1996).

O estanho é um metal não tóxico, com baixo ponto de fusão, boa fluidez e molhabilidade quando fundido. Pode ser polido e utilizado como revestimento de outros metais, promovendo proteção contra corrosão (GA; MOSER; PSTRUS, 2004; CHRISTIE; BRATHWAITE, 1996).

Quando exposto ao oxigênio o estanho forma uma fina camada de óxido de estanho estanque, que protege o material contra a continuidade da corrosão. O estanho é atacado por ácidos fortes, mas é especialmente resistente na presença de água ou fluidos de pH neutro, característica que explica sua utilização como revestimento de latas (folhas-de-flandres) utilizadas para conservas de alimentos (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1996).

O estanho possui ampla aplicação em ligas submetidas ao atrito, também conhecidas como metal patente, metal branco ou metal Babbit (“Encyclopaedia Britannica”, 2016). Um exemplo de aplicação é o da Figura 2.21 que mostra um mancal axial que utiliza metal patente nas superfícies de deslizamento.

Figura 2.21 – Exemplo de aplicação de metal patente em mancal axial de deslizamento.



Fonte: KINGSBURY (2016).

O metal patente é utilizado na forma de uma fina camada na superfície da sapata do mancal. Este tipo de metal é caracterizado por sua grande resistência ao desgaste adesivo<sup>7</sup>.

Além disto, o estanho é utilizado em solda macia (Sn, Pb), na produção de bronze (Sn, Cu), metal peltre<sup>8</sup> (e.g. Sn, Sb, Cu), metais para sinos (bronze), e para obtenção de ligas com baixo ponto de fusão.

Além das aplicações já citadas, o estanho também é utilizado em ligas de titânio na indústria aeroespacial e com nióbio, na forma de supercondutor quando mantido em temperaturas menores que 18 K.

Quando a temperatura do estanho branco (fase  $\beta$ ) de alta pureza é mantida abaixo de 13,2 °C há a lenta formação do estanho  $\alpha$ , que nesta forma se apresenta como um pó cinzento amorfo, com densidade de 5,77 g/cm<sup>3</sup>, menor se comparada com o estanho branco (CHRISTIE; BRATHWAITE, 1996).

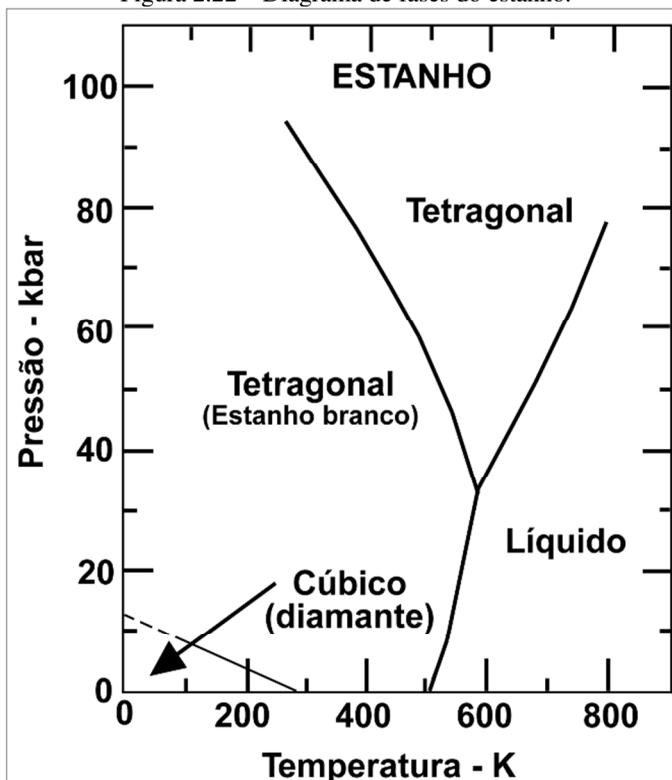
---

<sup>7</sup> Desgaste devido à ligações localizadas entre superfícies sólidas em contato levando a transferência ou perda de material em ambas superfícies. Quando o desgaste adesivo se torna severo ele leva ao *Galling*, caracterizado pela formação de marcas macroscópicas na superfície.

<sup>8</sup> Peltre é uma liga de estanho muito utilizada na fabricação de utensílios domésticos e litúrgicos, como copos, pratos etc. (FIORUCCI; BENEDETTI FILHO; OLIVEIRA, 2012).

Nesta variedade o estanho forma ligações covalentes, semelhante ao diamante. A Figura 2.22 mostra o diagrama de fases para o estanho.

Figura 2.22 – Diagrama de fases do estanho.



Fonte: Adaptado de YOUNG (1975).

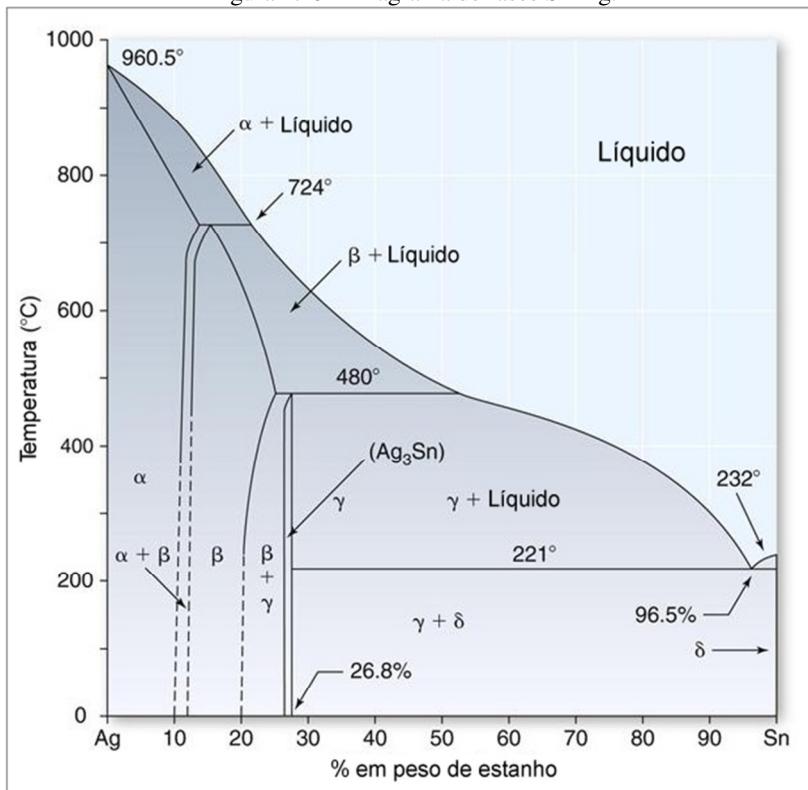
## 2.4.2 Liga eutética de estanho e prata

Como citado no item anterior, o estanho forma ligas com diversos materiais.

As ligas de estanho e prata são utilizadas em aplicações de brasa-gem livre de chumbo (*lead-free solder alloys*), especialmente na indústria eletrônica, onde as propriedades do metal fundido são de grande importância para a qualidade do processo. Grande parte das pesquisas são direcionadas para a composição eutética, com 3,5% de prata na composição da liga (FIMA, 2011).

O diagrama de fases binário entre os dois elementos é apresentado na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Diagrama de fases Sn-Ag.

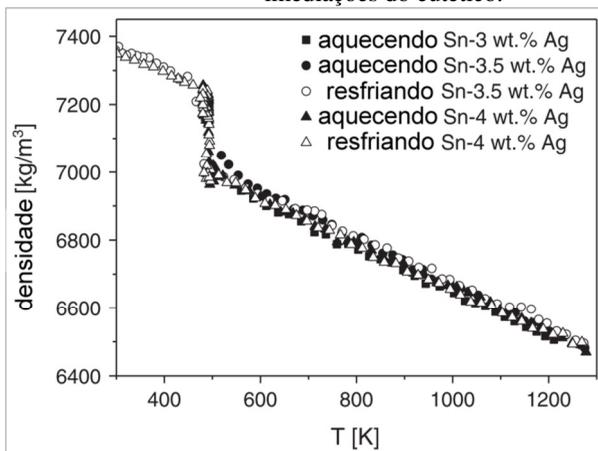


Fonte: Adaptado de POCKETDENTISTRY (2015).

No ponto eutético a liga de estanho e prata apresenta a temperatura de fusão de 221 °C. O aquecimento da liga apresenta diferentes efeitos em sua densidade, (YAGODIN et al., 2012; FIMA, 2011; GANCARZ et al., 2011), molhabilidade (OHIRA; FUJII; MORISADA, 2014; FIMA, 2011; GA; MOSER; PSTRUS, 2004) e viscosidade (GANCARZ et al., 2011).

Estudos desenvolvidos por YAGODIN et al., (2012) mostraram que há uma diminuição na densidade das ligas em função do aumento da temperatura, como observado na Figura 2.24. Esta figura apresenta as relações obtidas durante o aquecimento e resfriamento da liga para a composição eutética e próximas da composição eutética. Todas as composições analisadas apresentaram menores densidades em função do aumento da temperatura.

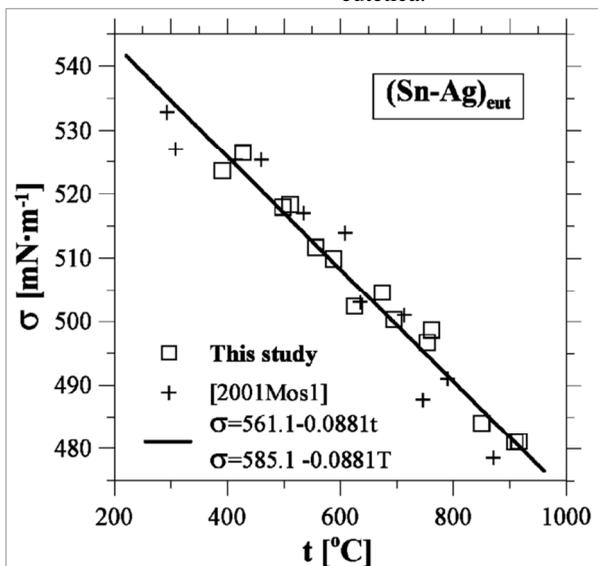
Figura 2.24 – Densidade em função da temperatura para ligas de Sn-Ag nas imediações do eutético.



Fonte: YAGODIN et al. (2012).

De acordo com o estudo de GA; MOSER; PSTRUS, (2004), a tensão de superfície diminui com o aumento da temperatura. A Figura 2.25 mostra essa relação para a liga eutética de Sn-Ag.

Figura 2.25 – Tensão de superfície em função da temperatura para a liga Sn-Ag eutética.



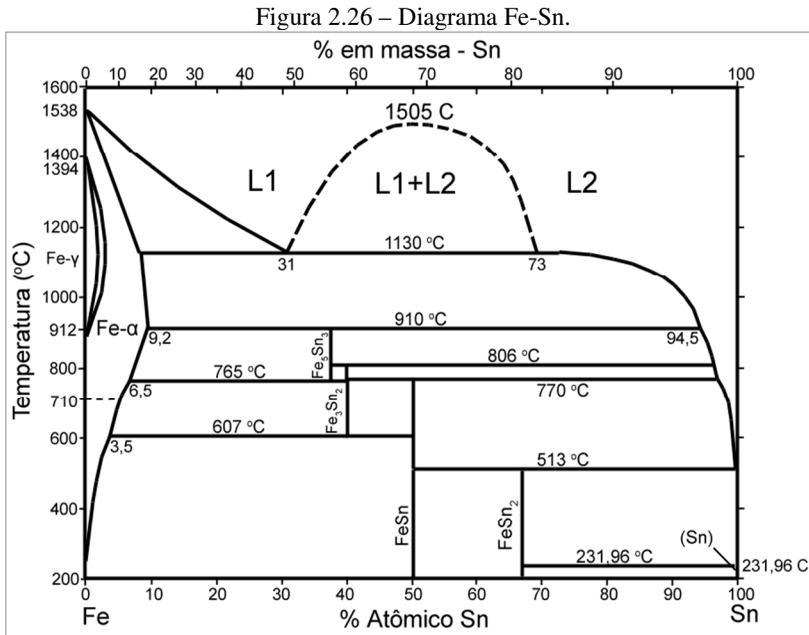
Fonte: GA; MOSER; PSTRUS (2004).

De acordo com GA; MOSER; PSTRUS, (2004) a diminuição da tensão de superfície promove um aumento da molhabilidade da liga. Entretanto, ainda segundo os autores, é preciso considerar que na presença de oxigênio, quanto maior a temperatura e quantidade de estanho na liga, maior a velocidade de formação de uma camada de óxido ( $\text{SnO}$  e  $\text{SnO}_2$ ) sobre a superfície do estanho fundido.

Diferente do estanho, a camada de óxidos de estanho tem maior tenacidade, diminuindo assim a molhabilidade e tornando de grande importância a utilização de uma atmosfera protetora durante o processamento do material por SLM (GA; MOSER; PSTRUS, 2004).

### 2.4.3 Liga de estanho e ferro

Além da prata, o estanho também pode formar liga com o ferro. O diagrama da Figura 2.26 exhibe as fases possíveis para a combinação dos dois elementos.



Fonte: Adaptado de (HARI KUMAR; WOLLANTS; DELAEY, 1996).

O diagrama mostra que misturas de ferro com estanho, contendo até aproximadamente 50% em massa de estanho, formam uma fase lí-

quida homogênea (L1). Para maiores quantidades de estanho (~50 a 80%) a fase líquida é composta por duas fases distintas (L1 e L2).

A mistura entre os dois elementos apresenta diversas fases sólidas estáveis e metaestáveis. Para quantidades de estanho abaixo de aproximadamente 68% em massa e temperaturas abaixo de 600 °C, a mistura solidifica em um composto metálico denominado Fe-Sn.



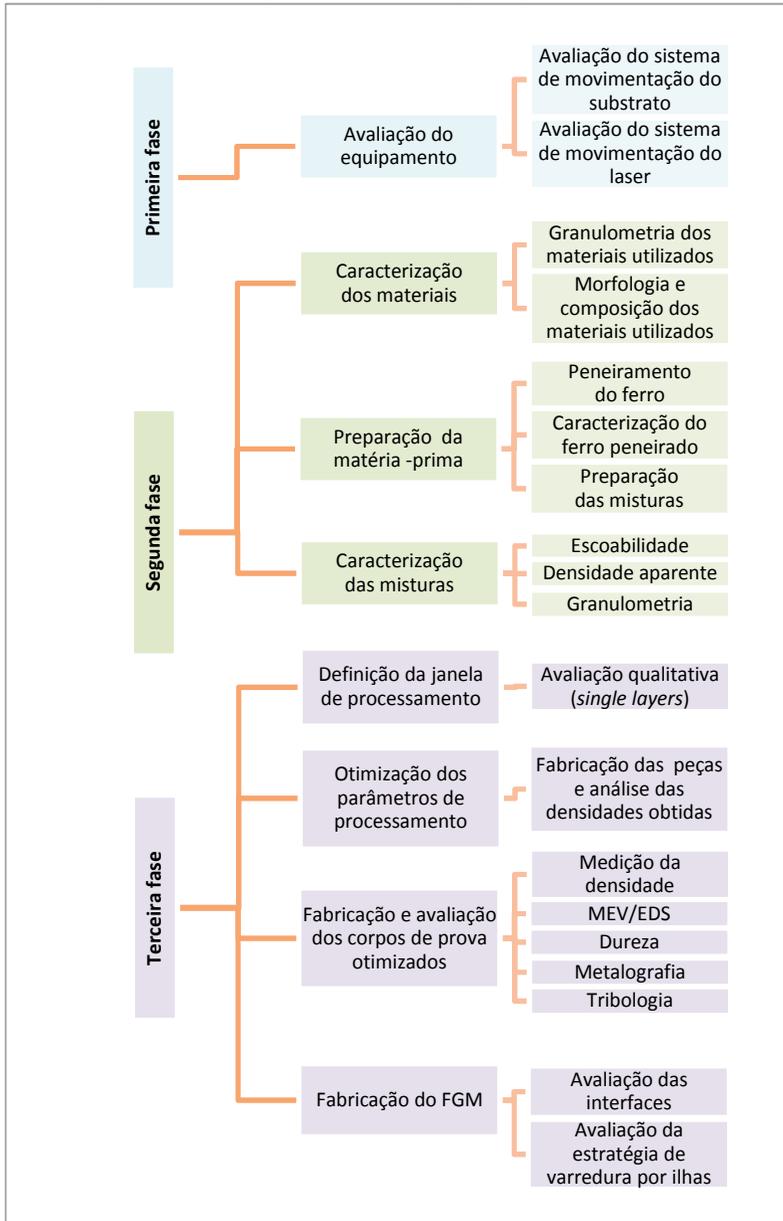
### **3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA**

A metodologia utilizada neste trabalho seguiu os passos mostrados no fluxograma apresentado na Figura 3.1. A metodologia é dividida em três fases, cada uma correspondente a um procedimento experimental.

Cada fase experimental foi subdividida em objetivos que são posteriormente divididos nos passos executados para a avaliação proposta.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia experimental utilizada.



Fonte: Autor (2016).

## 3.2 PRIMEIRA FASE – AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO

### 3.2.1 Características do equipamento utilizado

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado no Laboratório NIMMA, situado no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Para a fabricação dos corpos de prova foi utilizada uma máquina protótipo de sinterização/fusão seletiva a laser (Figura 3.2), desenvolvida pela empresa Alkimat – sediada em Florianópolis/SC – em parceria com o laboratório NIMMA.

Figura 3.2 – Máquina SLS/SLM utilizada na fase experimental.



Fonte: Autor (2016).

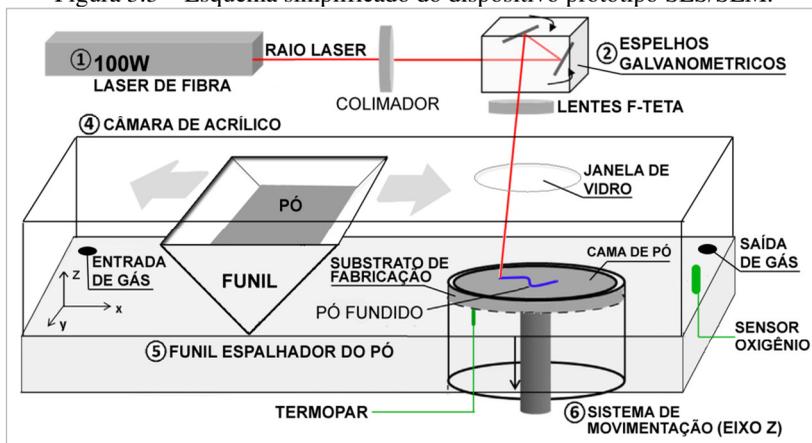
O equipamento conta com uma fonte laser de fibra dopada com Itérbio de 100W, fabricada pela empresa IPG Photonics® (modelo: YLR-100-AC-Y11) com comprimento de onda de 1070 nm. Um módulo de espelhos galvanométricos é utilizado para direcionamento do feixe de laser enquanto um sistema de movimentação do eixo z movimenta o substrato de fabricação.

Os comandos são feitos através de uma interface homem-máquina (IHM) computadorizada, utilizando o software EZCAD 2.7.0. O sistema controla os parâmetros do laser, a movimentação dos espelhos galvanométricos e o sistema de movimentação do substrato.

O equipamento também possui uma câmara de acrílico com atmosfera controlada, monitoramento de temperatura do substrato e um sistema de deposição de pó por gravidade que funciona com a movimentação horizontal de um funil espalhador do pó. A movimentação do funil espalhador de pó foi automatizada utilizando um controlador Arduino® que também é responsável pelo monitoramento da temperatura do substrato de fabricação, conforme detalhado no Apêndice A.

A Figura 3.3 mostra de forma esquemática o funcionamento do equipamento protótipo de sinterização/fusão seletiva a laser utilizado para produção dos corpos de prova.

Figura 3.3 – Esquema simplificado do dispositivo protótipo SLS/SLM.



Fonte: Adaptado de PEYRE et al. (2015).

Os principais parâmetros que o equipamento permite variar para a fabricação dos corpos de prova são a potência, velocidade de varredura do laser, distância entre linhas de varredura, estratégia de varredura, quantidade de oxigênio na atmosfera e espessura de camada.

Duas características do equipamento foram avaliadas, por serem críticas ao processo, sendo elas a precisão e exatidão do sistema de movimentação do substrato de fabricação e do sistema de controle do posicionamento do laser (espelhos galvanométricos).

### **3.2.2 Avaliação do sistema de movimentação do substrato de fabricação**

A espessura de cada camada depositada é um parâmetro importante do processo e é controlada pelo sistema de movimentação do substrato de fabricação. O sistema de movimentação suporta o substrato de fabricação no qual são fabricados os corpos de prova e se movimenta verticalmente no sentido negativo do eixo z. O movimento em cada passo de descida do substrato de fabricação é igual à espessura de uma camada e é realizado sempre após a sinterização/fusão de cada camada.

Como cada nova camada é depositada e espalhada através do funil espalhador do pó, um dos pré-requisitos do material utilizado é ter escoabilidade suficiente para escoar pelo aparato.

Para avaliação do sistema de movimentação vertical, foi utilizado um relógio comparador para comparar o movimento vertical do substrato de fabricação com o valor comandado pela malha de controle programada pelo operador através do software EZCAD. Para este ensaio a distância equivalente a uma camada (0,110 mm) foi percorrida 100 vezes. Para cada movimentação do substrato de fabricação o valor lido no relógio comparador foi anotado e foram determinados a média, desvio padrão e fator de correção.

### **3.2.3 Avaliação do sistema de movimentação do laser**

A avaliação do sistema de controle do feixe laser foi realizada através de marcações em um substrato de acrílico preto. Este foi escolhido por possuir um pigmento sensível ao comprimento de onda do laser utilizado e permitir uma fácil visualização da marcação regular gerada sobre a superfície.

Para avaliar esta característica, foram feitas marcações no substrato com o mesmo padrão utilizado no restante dos experimentos, isto é, a geometria de um quadrado. Para a marcação pelo laser no interior do quadrado, visando seu preenchimento, foram percorridas trajetórias retilíneas formando linhas distanciadas em 250  $\mu\text{m}$ , seguindo os padrões de preenchimento disponíveis na máquina. Em seguida as marcações obtidas foram analisadas através do microscópio óptico da marca Leica® (modelo: DFC 450), mediante medições da largura das linhas e da distância entre as linhas.

### 3.3 SEGUNDA FASE – MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.3.1 Seleção dos materiais particulados

Para alcançar os objetivos apresentados no Capítulo 1, foram escolhidos a liga eutética de estanho e prata, pela ampla aplicação de ligas de estanho em materiais submetidos ao atrito e o ferro, por ser amplamente aplicado em componentes estruturais de diversos equipamentos. Especificamente, foram selecionados o pó de ferro AHC 100.29, fabricado pela empresa Höganäs® e uma liga em pó, constituída por 96,5% de estanho e 3,5% de prata, fornecida pela empresa Heraeus®. A Tabela 3.1 apresenta os valores das principais características destes materiais, obtidos no *datasheet* fornecido pelos fabricantes.

Tabela 3.1 – Dados característicos dos pós utilizados.

Denominação	Processo de fabricação	Intervalo granulométrico ( $\mu\text{m}$ )	Morfologia das partículas	Densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
AHC 100.29	Atomização a água	20 a 200	Irregular ( <i>sponge-like</i> )	2,95
Sn-Ageut	Atomização a gás	15 a 25	Arredondado	4,25

Fonte: HOGANAS (2016); HERAEUS (2016).

#### 3.3.2 Caracterização e preparação dos materiais particulados

Após a escolha dos materiais particulados, foi feita a caracterização inicial dos mesmos. A primeira característica avaliada foi a granulometria, obtida com um analisador de tamanho de partículas da marca CILAS®, modelo 1190. A morfologia também foi analisada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Baseado nos resultados da caracterização inicial e visando obter uma maior homogeneidade com uma distribuição granulométrica mais refinada, o pó de ferro foi peneirado por uma hora em um agitador eletromagnético de peneiras da marca Bertel. Para o peneiramento foram utilizadas as peneiras de 150  $\mu\text{m}$  e 106  $\mu\text{m}$  e o pó obtido teve sua granulometria novamente avaliada.

Em seguida, foram definidas as composições do FGM e a proporção de ferro e da liga de estanho e prata para cada uma delas.

O FGM proposto no estudo é do tipo discreto e conta com três regiões distintas. Para definir a quantidade máxima de estanho na mistura de cada composição, o parâmetro escolhido inicialmente foi a escoabili-

dade do material (avaliada de acordo com a norma MPIF *Standard* 03, 1985), por ser necessária para o processamento no equipamento disponível.

Com as proporções definidas, três misturas diferentes foram preparadas com o auxílio de um misturador Y, cada uma corresponde a uma composição do FGM. O tempo de processamento no misturador foi de 60 minutos. Para simplificar o texto, as composições são chamadas de “L” (*low*), para o ferro puro; “M” (*medium*) para a menor quantidade do pó de Sn-Ag e “H” (*high*), para a maior quantidade do pó de Sn-Ag.

As três composições resultantes foram novamente caracterizadas quanto ao escoamento, granulometria e densidade aparente (determinada de acordo com a norma MPIF *Standard* 04, 1985).

### 3.4 TERCEIRA FASE – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.4.1 Definição das janelas de processamento

Para definir os limites das janelas de processamento, foram testadas diferentes configurações de parâmetros de processamento para cada composição, em um experimento que processou uma única camada (*single layer*) sobre o substrato de fabricação. As densidades de energia específicas viáveis para o processamento das matérias-primas foram obtidas através do aumento gradual da densidade de energia específica aplicada no processamento das *single layers*.

A classificação das camadas fabricadas seguiu critérios qualitativos, que avaliaram a adesão ao substrato, a definição das bordas e a homogeneidade das camadas. Na condição de máxima densidade de energia, a camada não deveria apresentar *balling* ou distorções, típicas em densidades de energia excessivamente elevadas. Já em condições de densidade de energia mínima, deveria apresentar sinterização homogênea entre as partículas do pó e adesão ao substrato.

#### 3.4.2 Otimização dos parâmetros de processamento para maximização da densidade do FGM

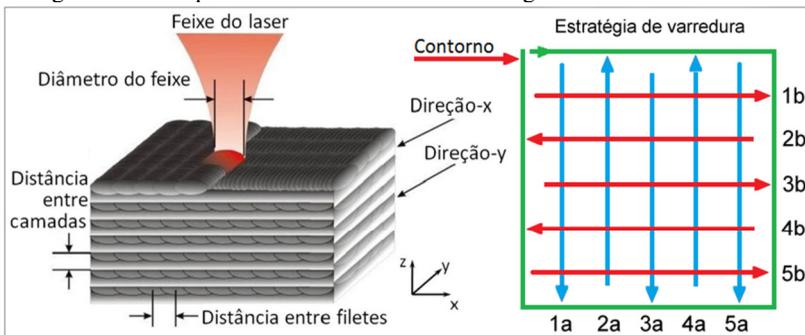
Após a definição das janelas de processamento, foi elaborado um experimento para definir os parâmetros de processamento (contidos nestas janelas) que poderiam potencializar a densidade obtida para cada composição do FGM proposto. Optou-se por realizar o projeto experimental Box-Behnken, em decorrência de possibilitar que sejam utiliza-

dos para análise um menor número de corpos de prova, quando comparado com outras estratégias (MONTGOMERY, 2014).

Foram produzidas 15 corpos de prova, no formato de um paralelepípedo de 10x10x7 mm, para cada uma das composições estudadas. O projeto experimental foi focado na análise de três parâmetros, sendo eles potência, velocidade de varredura e distância entre as linhas do laser (*hatching distance*). A espessura de camada foi mantida constante, com o valor de 110  $\mu\text{m}$ , sendo que este valor foi escolhido por ser compatível, isto é, ligeiramente maior que a peneira com malha de 106  $\mu\text{m}$  utilizada no peneiramento do pó de ferro.

Apesar dos bons resultados relatados na literatura sobre a utilização da técnica *refill* e das estratégias xadrez (*chess*) e ilhas (*islands*), discutidas no item 2.2.5, o equipamento disponível não permitia a utilização destas estratégias de maneira automática e, portanto, tais estratégias foram inicialmente descartadas. A Figura 3.4 mostra uma representação esquemática das camadas empilhadas e a estratégia de varredura utilizada.

Figura 3.4 – Empilhamento de camadas e estratégia de varredura utilizada.

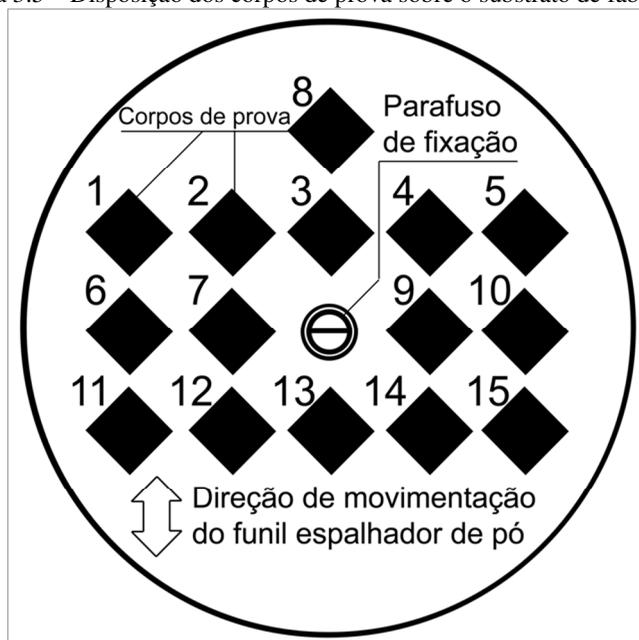


Fonte: Adaptado de MARQUES (2014).

A estratégia de varredura utilizada foi de linhas paralelas (*parallel scanning*) rotacionadas em 90 graus a cada nova camada, sempre seguida da marcação de uma linha de contorno, para melhor acabamento da superfície produzida. A rotação permite maior isotropia das peças e é amplamente utilizada em trabalhos disponíveis na literatura.

Os corpos de prova foram construídos em conjuntos de 15 unidades sobre um substrato de fabricação e dispostas de acordo com a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Disposição dos corpos de prova sobre o substrato de fabricação.



Fonte: Autor (2016).

A posição de fabricação da peça número oito foi deslocada da posição central da plataforma de fabricação, com o objetivo de evitar coincidir com a posição do parafuso de fixação do substrato.

O substrato foi fabricado em aço inoxidável AISI 304 com 8 mm de espessura e diâmetro de 110 mm. A espessura de 8 mm foi suficiente para evitar o empenamento do mesmo durante o processamento, defeito verificado em um substrato anterior, de 2 mm de espessura.

Para facilitar a remoção dos corpos de prova fabricados, foram produzidas cinco camadas de suporte sob cada corpo de prova. Estas camadas apresentavam alta porosidade, resultante da aplicação de uma alta espessura de camada, em torno de 300  $\mu\text{m}$ . A fabricação das camadas de suporte também serviu para pré-aquecer o substrato de construção para temperaturas próximas a 45  $^{\circ}\text{C}$ , como pode ser verificado no Apêndice B.

A temperatura foi monitorada durante a fabricação através de um termopar tipo K, que foi colocado em contato com a parte inferior da chapa de aço inoxidável, utilizada como substrato de fabricação.

O nível de oxigênio foi mantido abaixo de 1000 ppm durante todo o tempo de processamento, mantendo constante a circulação de gás

argônio (grau de pureza 6.0) no interior da câmara de fabricação de acrílico (Figura 3.3).

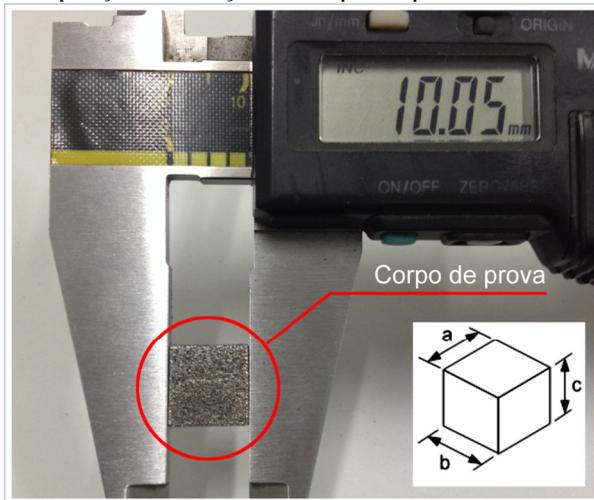
O experimento teve duas réplicas, e portanto, cada corpo de prova foi reproduzido duas vezes, cada um em um lote diferente. Cada lote produziu 15 corpos de prova, totalizando assim 45 corpos de prova para cada composição do FGM e um total de 135 corpos de prova para o experimento.

### 3.4.3 Avaliação da densidade dos corpos de prova fabricados

A densidade volumétrica de cada um dos corpos de prova produzidos para as três composições exigiu a retirada de cada paralelepípedo fabricado do substrato de fabricação.

A superfície inferior de cada corpo de prova foi então limada para limpeza, aplainamento e eventual remoção de camadas suportes aderidas. Para este procedimento foi utilizada uma lima murça plana até a obtenção de uma superfície plana e paralela à superfície oposta do paralelepípedo. Após a remoção do substrato de fabricação e limpeza de todos os corpos de prova, foi executada a medição da altura, largura e profundidade de cada um deles, como mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6 – Operação de medição dos corpos de prova e dimensões medidas.



Fonte: Autor (2016).

Para a medição foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo® – Digimatic Caliper (0,01 - 200 mm). Assim como as demais medições executadas nesse trabalho, cada valor é resultado de uma me-

dição repetida no mínimo três vezes, para cálculo da média e seu desvio padrão.

As medições permitiram obter os dados necessários para o cálculo do volume de cada paralelepípedo

$$V = a \times b \times c, \quad (3.1)$$

onde V é o volume [cm<sup>3</sup>] e as dimensões (a, b e c) são resultados médios da medição de cada espessura dos corpos de prova [cm]. A medição da massa foi obtida com uma balança analítica calibrada da marca Bel<sup>®</sup>, modelo M-214-AI. Finalmente foi calculada a densidade que é dada por

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

onde  $\rho$  é a densidade [g/cm<sup>3</sup>], m é massa [g] e V é o volume [cm<sup>3</sup>].

Para a análise estatística dos dados foi utilizado o software de cálculo estatístico Statgraphics<sup>®</sup> Centurion XVII, que auxiliou na elaboração da análise baseada no método de superfície de resposta (*response surface methodology - RSM*). O método foi utilizado para obtenção dos parâmetros que deveriam ser utilizados para a fabricação dos corpos de prova de maior densidade contidos nas janelas de processamento definidas no item 3.4.1.

### **3.4.4 Fabricação de corpos de prova com parâmetros otimizados para maior densidade**

Após a obtenção dos parâmetros ótimos de processamento, um novo experimento foi elaborado. Todas as condições do experimento inicial foram reproduzidas, exceto os parâmetros de potência, velocidade e espaçamento entre linhas, que foram substituídos pelos parâmetros otimizados para cada composição, obtidos no experimento anterior.

Outra diferença foi a quantidade de corpos de prova produzidos. Como o experimento proposto teve como objetivo a fabricação para testes de dureza, metalografia, e testes tribológicos, dessa vez foram feitas quatro réplicas por composição, totalizando cinco corpos de prova produzidos por lote, num total de 15 corpos de prova.

Após a fabricação dos corpos de prova, análises iniciais foram conduzidas. A primeira propriedade avaliada foi a densidade, pelo método utilizado no item 3.4.3, com medição do volume e massa e posterior cálculo da densidade volumétrica.

### 3.4.5 Análise por MEV na superfície dos corpos de prova otimizados para maior densidade

A caracterização das superfícies processadas foi efetuada em microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JEOL JSM-6390LV convencional, com filamento de tungstênio e voltagem de aceleração entre 0,5 e 30 kV. As imagens foram obtidas utilizando-se o detector de elétrons secundários (SE).

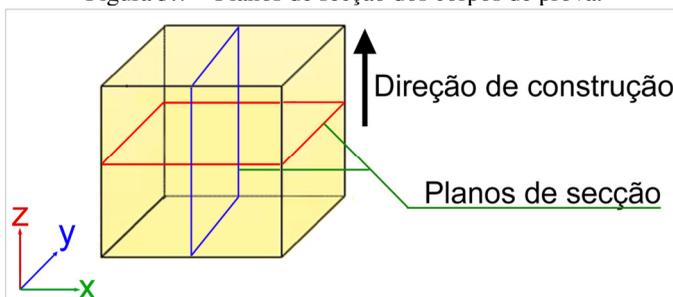
A composição química foi obtida através do equipamento de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS) acoplado ao MEV<sup>9</sup>.

### 3.4.6 Análise da dureza em corpos de prova otimizados para maior densidade

A dureza foi avaliada para cada composição proposta para o gradiente, buscando entender os efeitos da direção de fabricação dos corpos de prova e da adição da liga de Sn-Ag na composição.

Para execução do teste, foram utilizados três corpos de prova produzidos com os parâmetros otimizados, cada um representando uma composição do FGM. Os corpos de prova foram cortados com uma máquina de corte (Isomet 4000) com disco diamantado de 127 mm de diâmetro, utilizando velocidade de 3500 rpm e taxa de avanço de 2,5 mm/min. Os cortes foram realizados paralelamente aos planos xy e yz, como mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Planos de secção dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2016).

Após seccionados, os corpos de prova foram embutidos a quente com resina fenólica de uso geral em metalografia e posteriormente foram submetidos a uma sequência de lixamento (lixas 100, 220, 320, 400,

<sup>9</sup> Pesquisa realizada com apoio do LCME-UFSC.

600 e 1200) e polimento em politriz com alumina, para então serem submetidos ao teste de dureza.

As medidas de dureza Brinell foram realizadas nas seções paralelas e perpendiculares ao eixo de construção dos corpos de prova, utilizando um durômetro da marca EMCOTEST<sup>®</sup>, com uma força de 306,4 N aplicada através de uma esfera de aço com 10 mm de diâmetro, em escala Brinell.

Foram realizadas oito medições por corpo de prova, sendo quatro no plano xy e quatro no plano yz.

### **3.4.7 Análise metalográfica em corpos de prova otimizados para maior densidade**

Para a análise metalográfica foram utilizados três corpos de prova, um para cada composição do FGM.

O ensaio de metalografia seguiu o mesmo padrão de preparo dos corpos de prova do ensaio de dureza, porém, após o preparo, cada corpo de prova teve a microestrutura revelada através da exposição ao reagente Nital 1% (proporção de 99 ml de álcool PA para 1 ml de ácido nítrico) por aproximadamente 3 segundos. As imagens das superfícies foram obtidas em microscópio óptico da marca Leica<sup>®</sup> (modelo: DFC 450).

### **3.4.8 Análise tribológica em corpos de prova otimizados para maior densidade**

A análise tribológica foi executada nas três composições do FGM, permitindo obter o coeficiente de atrito de cada composição.

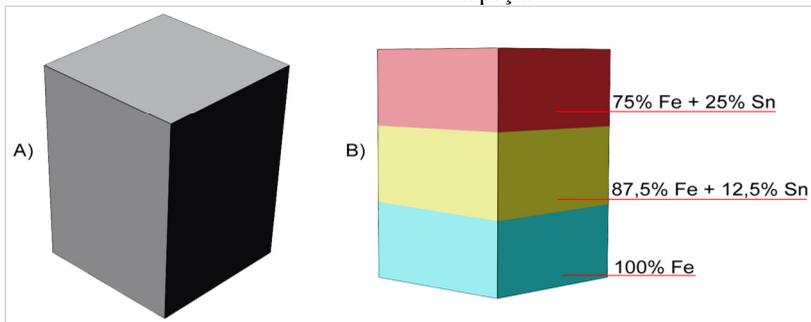
A análise foi elaborada em um tribômetro CETR mediante realização do experimento denominado teste de desgaste recíprocante (*Reciprocating Wear Test - RWT*) que consiste na fricção de uma esfera de diâmetro pré-determinado em movimentos recíprocantes sobre a superfície analisada. O movimento gera desgaste da superfície e o equipamento monitora o comportamento realizando as medições do coeficiente de atrito e da força ( $F_z$ ) ao longo do corpo de prova. O teste é finalizado após atingir o regime permanente.

Durante a fricção também foi controlada a carga aplicada sobre a esfera, mantendo-a alinhada com o eixo Z, perpendicularmente à superfície analisada. Foi utilizada uma esfera de aço com diâmetro de 3 mm. A força aplicada sobre a esfera foi de 10 N, o tempo de execução do teste para cada corpo de prova foi de 30 minutos e a frequência dos movimentos recíprocantes foi configurada em 2Hz com amplitude de 5 mm.

### 3.4.9 Fabricação da peça com FGM

Após a análise das propriedades de cada composição ser concluída, uma peça FGM discreta contendo as três composições foi fabricada. A peça foi planejada no formato de um paralelepípedo com 10 mm x 10 mm x 12 mm, e foi utilizada na avaliação da ligação metalúrgica entre as composições do gradiente. A Figura 3.8 mostra esquematicamente a peça planejada.

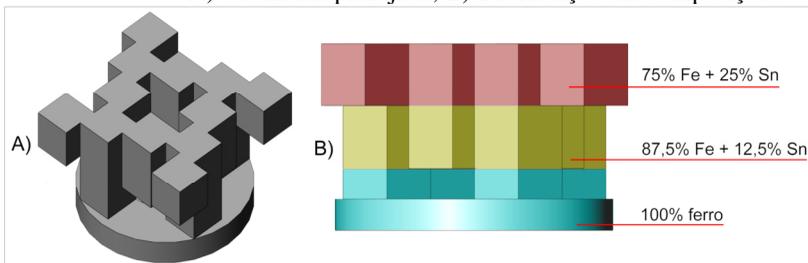
Figura 3.8 – Peça simples com gradação funcional proposta para fabricação: A) Geometria planejada; B) Distribuição das composições do FGM na peça.



Fonte: Autor (2016).

O apêndice C apresenta uma segunda peça que foi fabricada com uma geometria mais complexa. A Figura 3.9 mostra esquematicamente a peça planejada.

Figura 3.9 – Peça complexa com graduação funcional proposta para fabricação: A) Geometria planejada; B) Distribuição das composições.



Fonte: Autor (2016).

O objetivo foi avaliar a viabilidade de obter peças com geometrias complexas fabricadas com uma estratégia de varredura inspirada nas técnicas xadrez e ilhas.

Para as duas peças a variação da composição foi obtida pelo carregamento sequencial do funil transportador com as três matérias-primas previamente preparadas. Durante a fabricação, os parâmetros otimizados foram alterados de acordo com a transição entre as três composições, procurando obter a densidade anteriormente alcançada em cada uma delas.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

#### 4.1.1 Sistema de movimentação do substrato de fabricação

A Tabela 4.1 permite verificar os valores medidos para cada movimentação do substrato de fabricação.

Tabela 4.1 – Medidas obtidas no teste do sistema de movimentação.

comando	110 $\mu\text{m}$									
Leituras ( $\mu\text{m}$ )	100	100	110	110	95	100	110	100	120	105
	100	110	105	110	110	115	105	110	110	95
	110	105	110	110	110	100	105	110	100	120
	105	110	105	115	105	110	105	110	110	90
	105	105	105	105	100	105	115	110	100	105
	100	105	110	110	105	110	110	120	100	105
	105	105	110	105	100	105	90	110	110	110
	115	100	105	115	100	105	110	105	100	110
	105	110	110	105	100	105	110	105	110	110
	105	100	120	100	110	105	110	110	110	110

Fonte: Autor (2016).

Os 100 valores coletados variaram de 90  $\mu\text{m}$  até 120  $\mu\text{m}$ , obedecendo a uma distribuição normal. O valor médio obtido foi de 106,6  $\mu\text{m}$ , com um desvio padrão de 5,7  $\mu\text{m}$ .

O experimento mostrou que o elevador da plataforma de construção apresenta um erro sistemático que pode ser corrigido pela adição do valor de 3,4  $\mu\text{m}$  sobre o valor comandado. Após a correção do erro sistemático e considerando o erro aleatório do sistema, é possível concluir que o elevador apresentará, em 95% das vezes, uma movimentação compreendida entre os valores de 98,82  $\mu\text{m}$  e 121,17  $\mu\text{m}$ , constituindo uma incerteza de aproximadamente +/-10%. A Tabela 4.2 apresenta os percentis relativos aos valores de movimentação do substrato após correção do erro sistemático.

Tabela 4.2 – Percentis relativos aos valores de movimentação do substrato

Percentis	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
Camada	93.4	103.4	103.4	108.4	108.4	113.4	113.4	118.4	123.4

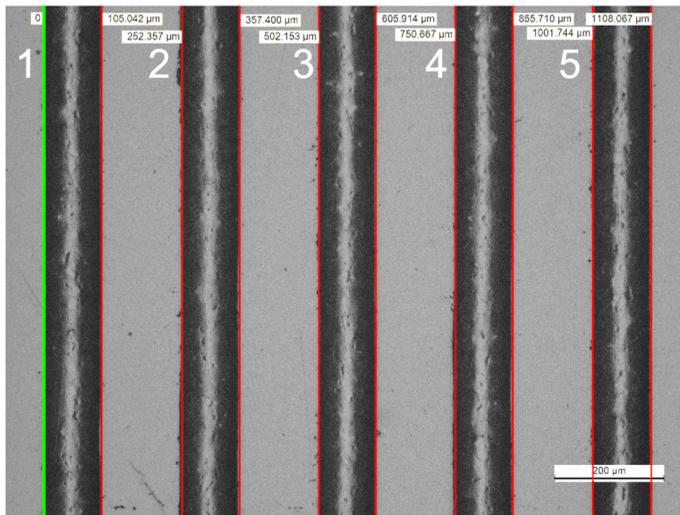
Fonte: Autor (2016).

Além disto, durante o experimento foi possível verificar que o sistema de movimentação apresenta histerese e, portanto, durante a fabricação, é prudente movimentar o substrato de fabricação somente em um sentido, isto é, no sentido negativo do eixo z até o término da fabricação.

#### 4.1.2 Sistema de movimentação do laser

A Figura 4.1 mostra um conjunto de marcações produzidas pelo laser no substrato. Linhas verticais no contorno das marcações foram desenhadas através do software do microscópio óptico Leica® (modelo: DFC 450) para realizar as medições do diâmetro do feixe laser.

Figura 4.1 – Marcações produzidas na superfície do substrato de acrílico pelo laser.



Fonte: Autor (2016).

A primeira linha à esquerda (verde) serve de referência a partir da qual a distância até as demais linhas é medida. Para obter a largura das marcações o valor da medida obtido na linha à esquerda deve ser subtraído da linha à direita. A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos na medição da largura das marcações.

Tabela 4.3 – Valores da largura das linhas.

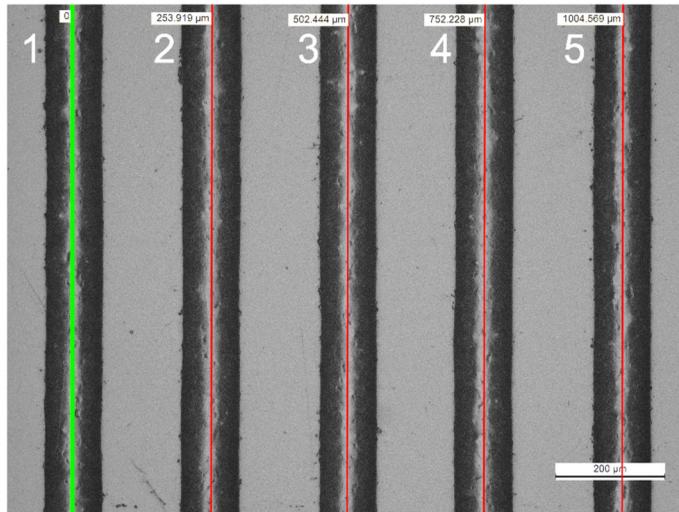
Linha	1	2	3	4	5
Valor (μm)	105,0	105,0	103,7	105,0	106,3

Fonte: Autor (2016).

Os resultados indicaram que o valor médio para as marcações produzidas pelo feixe laser é de  $105,0 \mu\text{m}$ , com um desvio padrão de  $0,9 \mu\text{m}$ , fornecendo uma estimativa aproximada do diâmetro do feixe laser.

A Figura 4.2 mostra as medições realizadas para avaliação da distância entre as marcações, mostradas na tabela Tabela 4.4.

Figura 4.2 – Distância entre linhas marcadas na superfície pelo laser.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4.4– Valores de distância entre as linhas.

Linha	1	2	3	4
Valor ( $\mu\text{m}$ )	253,9	248,5	249,8	252,3

Fonte: Autor (2016).

Os valores indicam que quando configurado para  $250 \mu\text{m}$  o valor médio para a distância entre as linhas do laser é de  $251,1 \mu\text{m}$ , com um desvio padrão de  $2,4 \mu\text{m}$ .

A distância entre as linhas é um parâmetro importante para calcular a densidade de energia e o experimento permitiu confirmar a exatidão do equipamento para esse parâmetro.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

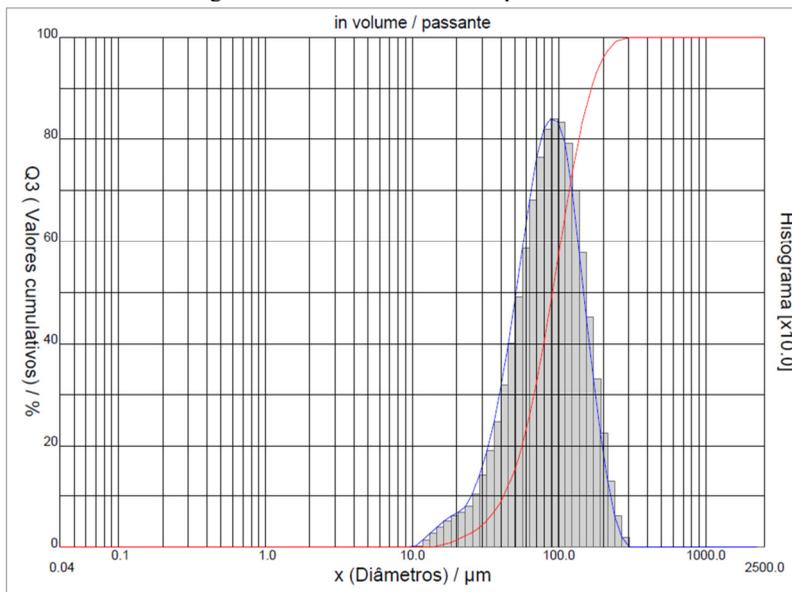
### 4.2.1 Granulometria dos materiais utilizados

A granulometria do pó de ferro e do pó da liga de estanho e prata, sem qualquer processamento (*stock*), foi obtida através do analisador de partículas Cilas 1190.

A Figura 4.3 mostra a distribuição de tamanhos do pó de ferro e a Figura 4.4 mostra a distribuição de tamanhos do pó da liga de estanho e prata.

As Tabela 4.5 e Tabela 4.6 listam os valores de tamanho de partícula para três percentis e o tamanho do diâmetro médio, para o pó de ferro e o pó da liga de estanho-prata, respectivamente.

Figura 4.3 – Granulometria do pó de ferro.



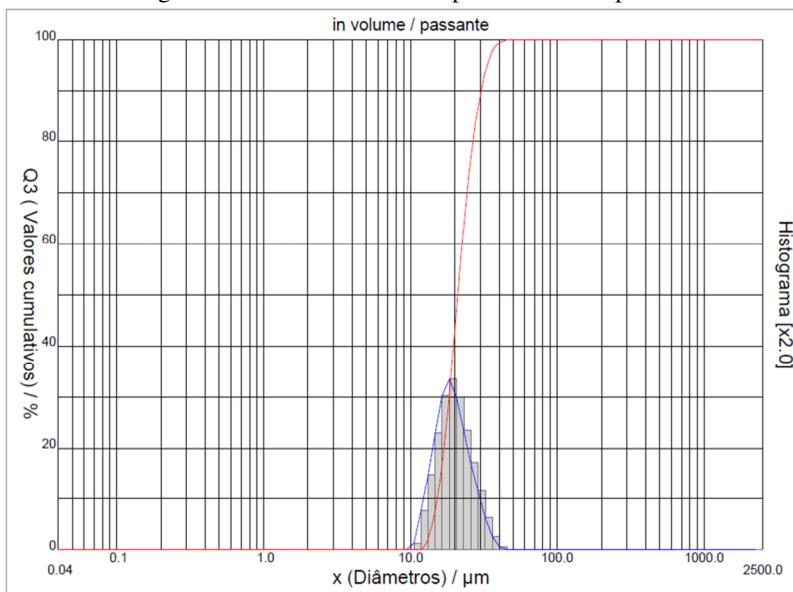
Fonte: Autor (2016).

Tabela 4.5 – Resultado da granulometria para o ferro.

Percentis	Diâmetro a 10%	41,7 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 50%	90,3 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 90%	165,3 $\mu\text{m}$
Diâmetro médio	98,3 $\mu\text{m}$	

Fonte: Autor (2016).

Figura 4.4 – Granulometria do pó de estanho e prata.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4.6 – Granulometria do pó da liga de estanho e prata.

Percentis	Diâmetro a 10%	15,2 µm
	Diâmetro a 50%	21,0 µm
	Diâmetro a 90%	30,5 µm
Diâmetro médio	22,0 µm	

Fonte: Autor (2016).

Os histogramas mostram a distribuição de 13 a 45 micrometros e valor médio de 22 micrometros para o pó da liga de estanho e prata e de 15 a 300 micrometros com valor médio de 98 micrometros para o pó de ferro.

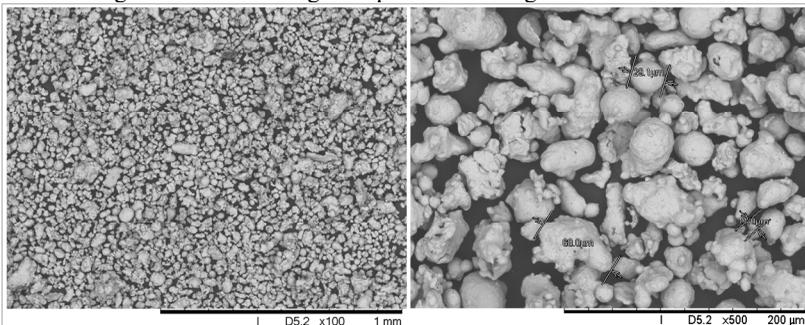
O pó da liga de estanho e prata apresenta um tamanho médio em torno de 20% em relação ao tamanho do pó de ferro.

A mistura entre dois materiais particulados com tamanhos diferentes tende a melhorar a densidade aparente, já que as partículas menores do pó de estanho e prata se acomodam nos interstícios formados entre as partículas maiores do pó de ferro, como sugerido por THUMMLER; OBERACKER, (1993).

### 4.2.2 Morfologia e composição das matérias-primas utilizadas

A morfologia do pó de ferro é mostrada na Figura 4.5. A análise por MEV mostrou uma morfologia irregular das partículas, típica da obtida pela técnica de atomização em água. Algumas partículas apresentaram forma próxima à esférica, enquanto a maior parte apresentou forma irregular. Observa-se também a grande variação de tamanhos.

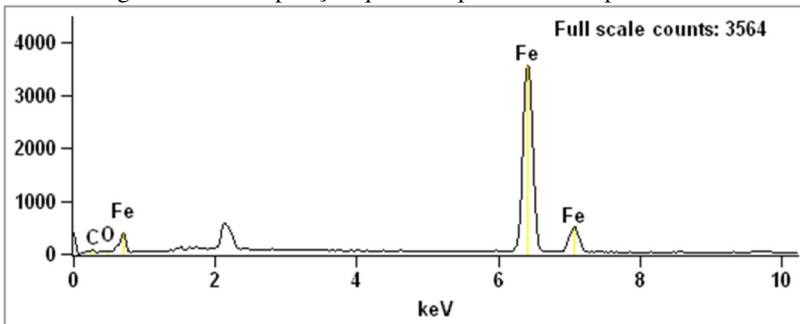
Figura 4.5 – Morfologia do pó de ferro Höganäs AHC 100.29.



Fonte: Autor (2016).

A composição química aproximada do material obtida por EDX/EDS é apresentada na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Composição química aproximada do pó de ferro.

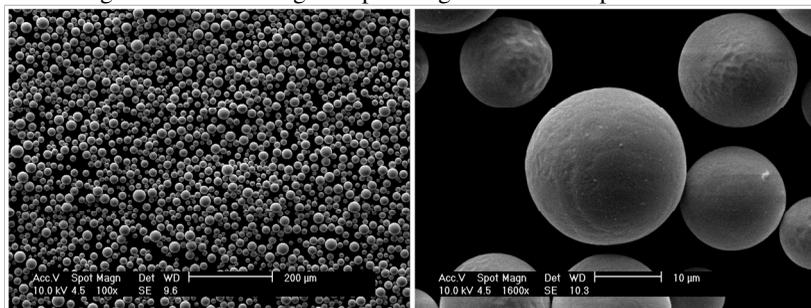


Fonte: Autor (2016).

A análise do EDS mostrou que o pó de ferro possui aproximadamente 99.56% em peso de ferro e 0.44% em peso de oxigênio.

A morfologia do pó da liga de estanho e prata é mostrada na Figura 4.7. As imagens do pó da liga de estanho e prata obtidas por MEV apresentaram partículas esféricas, compatíveis com as obtidas pela técnica de fabricação por atomização à gás.

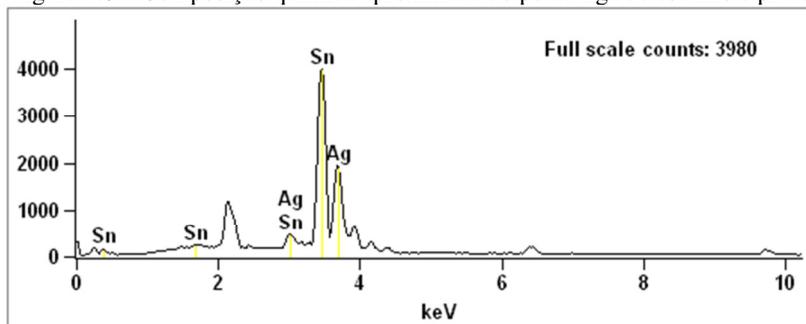
Figura 4.7 – Morfologia do pó da liga de estanho e prata Heraeus.



Fonte: Autor (2016).

A composição química aproximada da liga de estanho e prata obtida por EDX/EDS é apresentada na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Composição química aproximada do pó da liga de estanho e prata.



Fonte: Autor (2016).

A análise do EDS mostrou que o pó da liga de estanho e prata possui aproximadamente 95.83% em peso de estanho e 4.17% em peso de prata, valor próximo ao que deveria ser encontrado em uma liga eutética, que é de 3,5% em peso de prata.

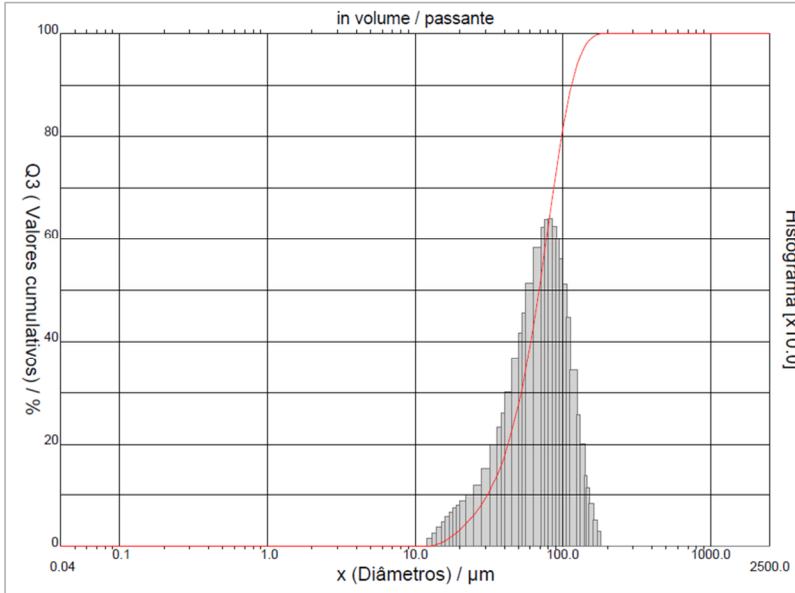
### 4.3 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA OS EXPERIMENTOS

#### 4.3.1 Peneiramento e caracterização do pó de ferro peneirado

Como o ferro apresentou um tamanho médio de partículas relativamente elevado quando comparado aos materiais particulados empregados na AM, com algumas partículas grosseiras alcançando o valor de 300 µm, foi escolhido peneirar o material com uma peneira de 106 µm.

O peneiramento contribuiu para uma maior uniformidade, refinamento e controle do material particulado. A Figura 4.9 mostra a granulometria resultante para o pó de ferro peneirado em 106  $\mu\text{m}$ .

Figura 4.9 – Granulometria do Ferro peneirado em peneira com abertura de malha de 106  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Autor (2016).

A Tabela 4.7 lista os valores de tamanho de partícula para três percentis e o tamanho médio do pó de ferro peneirado em 106  $\mu\text{m}$ .

Tabela 4.7 – Resultado da granulometria para o pó de ferro peneirado.

Percentis	Diâmetro a 10%	30,86 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 50%	68,95 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 90%	114,81 $\mu\text{m}$
Diâmetro médio	71,48 $\mu\text{m}$	

Fonte: Autor (2016).

#### 4.3.2 Preparação das misturas correspondentes a cada composição do FGM discreto

Como já mencionado no Capítulo 3, após a caracterização do ferro peneirado, as misturas correspondentes a cada composição do FGM foram preparadas.

Os resultados mostraram que a misturas do pó de ferro com elevadas quantidades do pó da liga de estanho e prata comprometiam a escoabilidade, pois o material deixava de fluir pelo funil hall. Baseado nestes resultados, foram propostas três composições para um FGM com gradação discreta.

A primeira composição, composta unicamente de pó de ferro foi denominada de composição “L” (*Low Sn-Ag*), a segunda com adição de 12,5% em peso do pó da liga de estanho e prata, denominada de composição “M” (*Medium Sn-Ag*) e a terceira com adição de 25% em peso do pó da liga de estanho e prata, denominada composição “H” (*High Sn-Ag*).

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

##### 4.4.1 Escoabilidade

A Tabela 4.8 apresenta os valores do tempo de escoamento para quatro matérias-primas inicialmente preparadas para a fabricação do FGM, partindo do ferro puro até uma mistura de 50% em peso do pó de ferro e 50% em peso do pó da liga de estanho e prata.

Tabela 4.8 – Tempo de escoamento para as misturas dos materiais.

Composição	T(s) – funil 2,5					T(s) méd.	Desvio padrão
Ferro puro <106 µm	25,90	25,15	24,16	24,60	24,23	24,8	0,73
87,5% Fe + 12,5% Sn-Ag	20,85	20,61	20,44	20,82	20,73	20,6	0,17
75% Fe + 25% Sn-Ag	16,36	16,71	16,43	16,63	16,89	16,6	0,21
50 % Fe + 50% Sn-Ag	*	*	*	*	*	*	*

\*Não apresentou escoabilidade.

Fonte: Autor (2016).

Os resultados mostraram uma diminuição do tempo de escoamento com a adição do pó da liga de estanho e prata nas misturas até um percentual de 25% em peso da liga de estanho e prata.

A mistura com 50% em peso da liga de estanho e prata não apresentou escoabilidade. Não foi determinado o valor crítico da quantidade do pó da liga de estanho e prata que faz o escoamento cessar, entretanto,

esse comportamento pode ser atribuído à alta densidade aparente do pó nas misturas com maior quantidade do pó da liga de estanho e prata.

#### 4.4.2 Densidade aparente

A Tabela 4.9 mostra a densidade aparente das matérias-primas que foram preparadas para a fabricação do FGM.

Tabela 4.9 – Densidade aparente para as misturas dos materiais.

Composição	M (g) para 25 cm <sup>3</sup>					m(g) méd.	Desvio padrão	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Ferro puro	75,20	74,41	74,49	74,46	74,61	74,63	0,32	2,99
87,5% Fe + 12,5% Sn-Ag	79,60	78,67	78,83	78,52	78,89	78,90	0,42	3,16
75% Fe + 25% Sn-Ag	87,64	89,57	87,99	89,42	87,55	88,43	0,98	3,54
50 % Fe + 50% Sn-Ag	101,49	99,22	100,66	100,57	102,23	100,83	1,13	4,03

Fonte: Autor (2016).

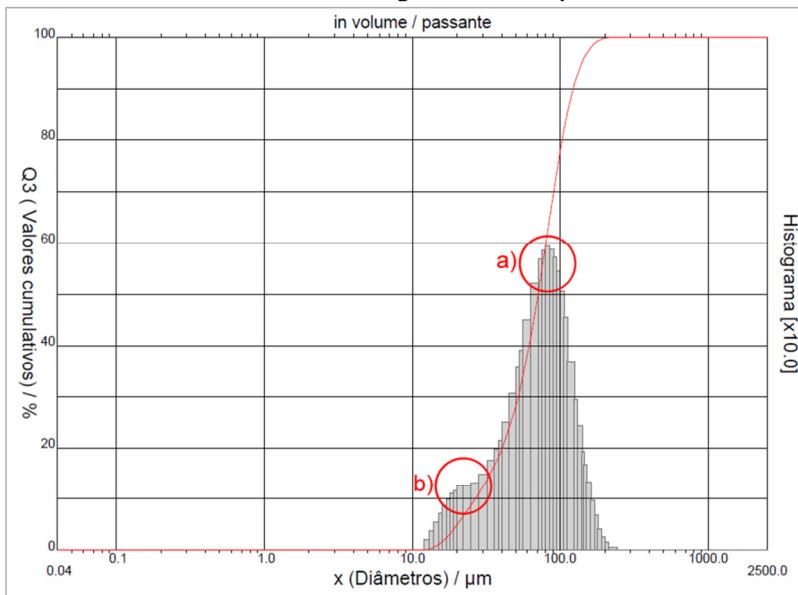
O aumento da densidade aparente da mistura, em função do aumento da quantidade do pó da liga de estanho e prata, é explicado pelo preenchimento dos vazios entre as partículas do pó de ferro pelas partículas da liga de estanho e prata, decorrente da grande diferença de tamanho entre as partículas dos dois pós utilizados.

As partículas menores, do pó da liga de estanho e prata, ocupam os interstícios existentes entre as partículas do pó de ferro. Este aumento da densidade aparente é uma característica desejada, sobretudo para otimizar a sinterização entre as partículas submetidas à energia proveniente do laser.

#### 4.4.3 Granulometria

A Figura 4.10 mostra a distribuição da granulometria resultante da mistura do pó de ferro com 12,5% em peso de pó da liga de estanho e prata, correspondente a composição “M” do FGM. A Tabela 4.10 lista os valores de tamanho de partícula para três percentis e o tamanho médio da mistura.

Figura 4.10 – Mistura de 87,5% em peso de pó de ferro e 12,5% em peso de pó da liga de estanho e prata.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4.10 – Resultado da granulometria para a composição “M”.

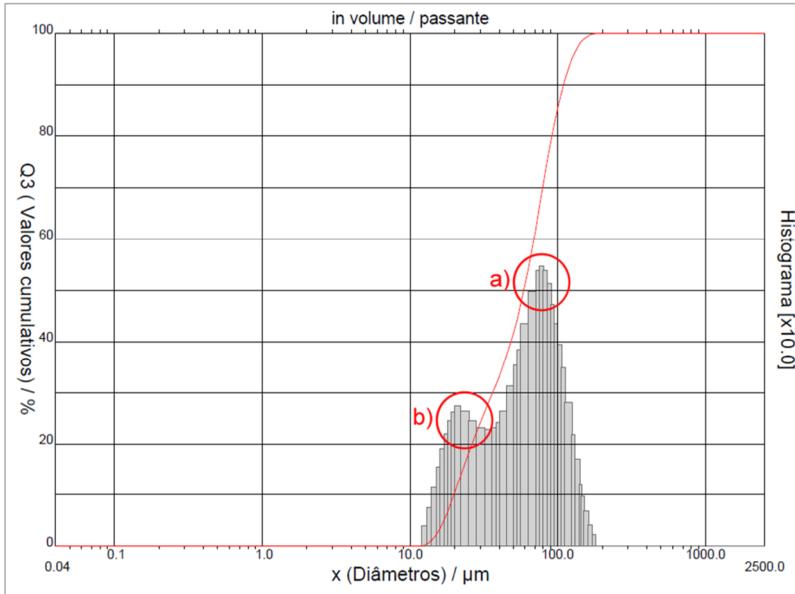
Percentis	Diâmetro a 10%	26,65 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 50%	70,88 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 90%	120,05 $\mu\text{m}$
Diâmetro médio	73,11 $\mu\text{m}$	

Fonte: Autor (2016).

Os resultados mostram um pico secundário na distribuição de tamanhos decorrente das distribuições dos pós individuais, com dois picos (a e b) de tamanhos de partículas distintos no diagrama.

Para a obtenção da matéria-prima utilizada para a fabricação da composição “H” do FGM a quantidade do pó da liga de estanho e prata misturada foi de 25% em massa. A Figura 4.11 mostra a granulometria obtida, correspondente à matéria-prima da composição “H” enquanto a Tabela 4.11 lista os valores de tamanho de partícula para três percentis e o tamanho médio da mistura.

Figura 4.11 – Mistura de 75% em peso de pó de ferro e 25% em peso de pó da liga de estanho e prata.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4.11– Resultado da granulometria para a composição “H”.

Percentis	Diâmetro a 10%	19,83 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 50%	58,80 $\mu\text{m}$
	Diâmetro a 90%	109,60 $\mu\text{m}$
Diâmetro médio	61,84 $\mu\text{m}$	

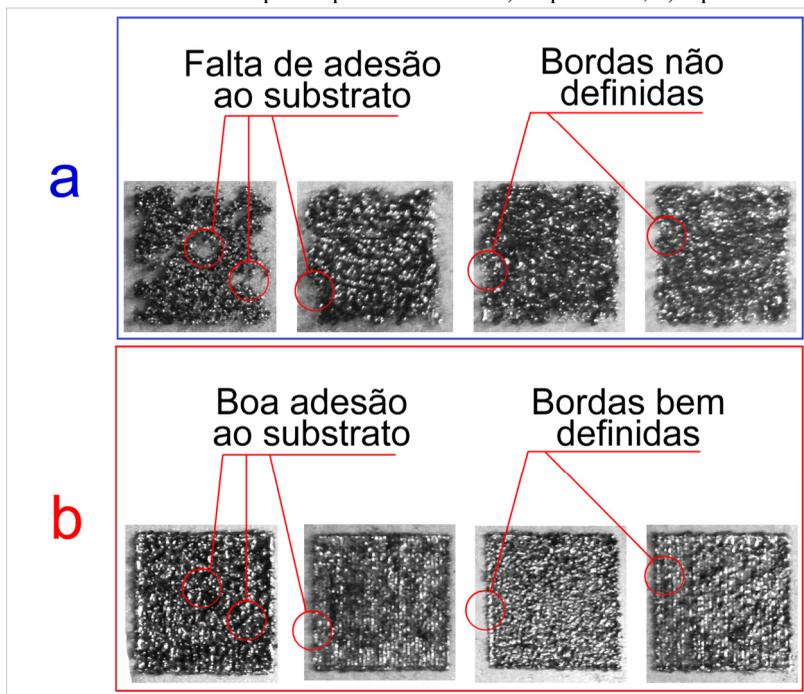
Fonte: Autor (2016).

Igualmente ao ocorrido com a composição “M” os resultados evidenciaram a distribuição binária, com dois picos (a e b) de tamanhos de partículas distintos no diagrama.

#### 4.5 DEFINIÇÃO DA JANELA DE PROCESSAMENTO

Como mencionado no item 3.4.1, os testes para definir os limites da janela de processamento para o processamento das matérias-primas foram realizados através do aumento gradual da densidade de energia específica. A Figura 4.12 mostra um conjunto de camadas obtidas no experimento e a classificação entre Reprovadas (a) e Aprovadas (b).

Figura 4.12 – Camadas produzidas para avaliação da densidade de energia necessária para o processamento: a) Reprovadas; b) Aprovadas.



Fonte: Autor (2016).

O grupo “a” representa camadas com baixa adesão ao substrato e pouca união entre as partículas. É possível visualizar nesse grupo falhas nas regiões de borda das camadas, além do aspecto granuloso das superfícies.

Já as camadas do grupo “b” apresentaram boa aderência no substrato, bordas definidas e uma maior sinterização das partículas, com segmentos de linhas de solda visíveis em algumas camadas.

A produção das camadas e classificação dos resultados permitiu definir os limites máximos e mínimos de densidade de energia específica a serem utilizados no experimento posterior. A Tabela 4.12 mostra os limites estabelecidos para as três composições.

Tabela 4.12 – Limites da densidade de energia específica aplicada para cada composição.

Composição	Mínimo	Máximo
	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
L	31,0	141,2
M	27,0	104,1
H	24,0	82,4

Fonte: Autor (2016).

Os resultados mostraram que a adição do pó da liga de estanho e prata permite a utilização de densidades de energia menores, o que pode ser explicado pelo baixo ponto de fusão desse material, quando comparado com o pó de ferro.

Para variar a densidade de energia específica a velocidade de varredura foi o parâmetro calibrado de maneira singular para cada composição. Valores de densidade de energia específica menores são alcançados com valores maiores de velocidade, conforme equação 2.1.

Sendo assim, o intervalo de velocidades foi estabelecido para cada composição de acordo com os valores apresentados pela Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Limites da velocidade utilizada para cada composição.

Composição	Mínimo	Máximo
	(mm/s)	(mm/s)
L	70	170
M	95	195
H	120	220

Fonte: Autor (2016).

As potências irradiantes do laser empregadas nos ensaios foram variadas entre 80 W e 94 W e a distância entre as linhas de processamento entre 0,08 mm e 0,15 mm.

## 4.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO OTIMIZADOS PARA MAIOR DENSIDADE

### 4.6.1 Fabricação dos corpos de prova

Seguindo o que foi exposto no Capítulo 3, com os valores de máxima e mínima densidade de energia específica definidos para cada composição, foi elaborado o experimento estatístico para obter a melhor combinação de parâmetros, sob o ponto de vista da densidade.

A Tabela 4.14 mostra os parâmetros utilizados para a fabricação dos corpos de prova para cada composição do FGM.

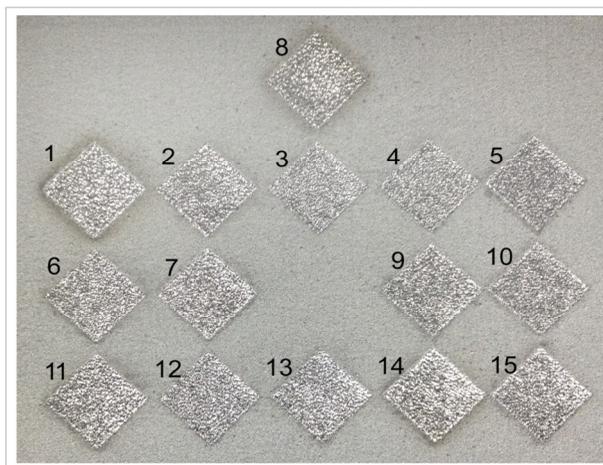
Tabela 4.14 – Parâmetros utilizados para fabricação dos corpos de prova.

n	L					M					H				
	P	u	h	D	$\phi$	P	u	h	D	$\phi$	P	u	h	D	$\phi$
1	87	70	0,08	0,11	141,2	87	95	0,08	0,11	104,1	87	120	0,08	0,11	82,4
2	87	70	0,15	0,11	75,3	87	95	0,15	0,11	55,5	87	120	0,15	0,11	43,9
3	80	170	0,115	0,11	37,2	80	195	0,115	0,11	32,4	80	220	0,115	0,11	28,7
4	87	170	0,15	0,11	31,0	87	195	0,15	0,11	27,0	87	220	0,15	0,11	24,0
5	94	120	0,15	0,11	47,5	94	145	0,15	0,11	39,3	94	170	0,15	0,11	33,5
6	80	120	0,08	0,11	75,8	80	145	0,08	0,11	62,7	80	170	0,08	0,11	53,5
7	87	120	0,115	0,11	57,3	87	145	0,115	0,11	47,4	87	170	0,115	0,11	40,5
8	94	70	0,115	0,11	106,2	94	95	0,115	0,11	78,2	94	120	0,115	0,11	61,9
9	87	120	0,115	0,11	57,3	87	145	0,115	0,11	47,4	87	170	0,115	0,11	40,5
10	80	120	0,15	0,11	40,4	80	145	0,15	0,11	33,4	80	170	0,15	0,11	28,5
11	94	120	0,08	0,11	89,0	94	145	0,08	0,11	73,7	94	170	0,08	0,11	62,8
12	94	170	0,115	0,11	43,7	94	195	0,115	0,11	38,1	94	220	0,115	0,11	33,8
13	87	170	0,08	0,11	58,2	87	195	0,08	0,11	50,7	87	220	0,08	0,11	44,9
14	80	70	0,115	0,11	90,3	80	95	0,115	0,11	66,6	80	120	0,115	0,11	52,7
15	87	120	0,115	0,11	57,3	87	145	0,115	0,11	47,4	87	170	0,115	0,11	40,5

Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.13 mostra o aspecto dos corpos de prova produzidos com a composição “L” após o processamento.

Figura 4.13 – Corpos de prova produzidos com a composição “L” após processamento.



Fonte: Autor (2016).

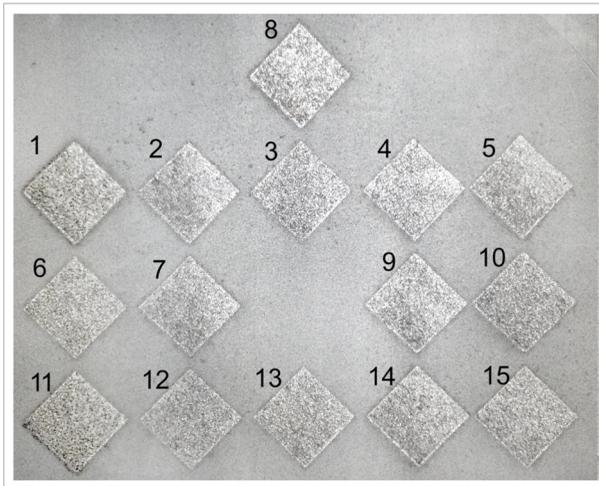
No contorno dos corpos de prova um e oito, verifica-se uma região levemente escurecida no pó que circunda os corpos de prova. Embora não comprovado, pressupõe-se ser resultante da oxidação dos pós não processados que circundam estes corpos de prova.

A oxidação pode ter ocorrido pela reação das partículas em alta temperatura com gases oxidantes presentes no pó ou formados durante o processamento, pela interação entre o laser e óxidos ou impurezas presentes no pó.

O efeito é mais pronunciado nestes corpos de prova por terem sido processados com maior densidade de energia específica quando comparados com os demais corpos de prova, resultando em maior aquecimento da região circunvizinha, o que favorece a oxidação. Durante os ensaios, a temperatura atingida no pré-aquecimento do substrato foi de aproximadamente 60 °C. O apêndice B apresenta os resultados da medição da temperatura da parte inferior dos substratos de fabricação, monitorada durante a fabricação dos corpos de prova.

A Figura 4.14 mostra o aspecto dos corpos de prova produzidos com a composição “M”.

Figura 4.14 – Corpos de prova produzidas com a composição “M” após processamento.



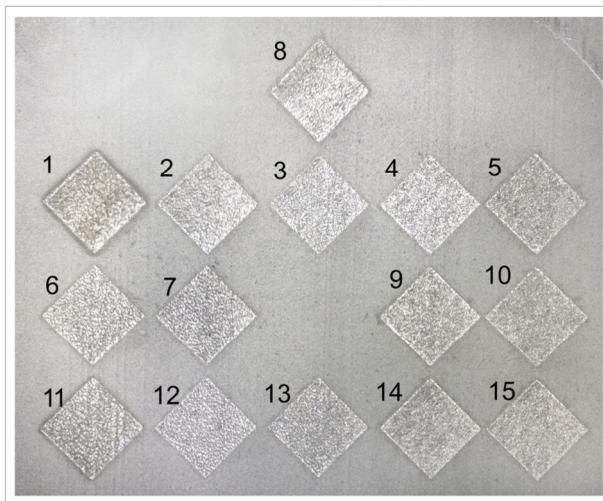
Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.15 mostra o aspecto da superfície dos corpos de prova produzidos com a composição “H”.

Também, para os corpos de prova com a composição com maior quantidade de Sn-Ag (“H”) se verifica que o pó que circunda os corpos

de prova um e oito apresenta uma região escurecida. Para os corpos de prova “H” este efeito está menos pronunciado quando comparado com os corpos de prova com a composição “L”.

Figura 4.15 – Corpos de prova produzidas com a composição “H” após processamento.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.16 mostra o aspecto geral dos corpos de prova produzidos sobre o substrato de aço inoxidável.

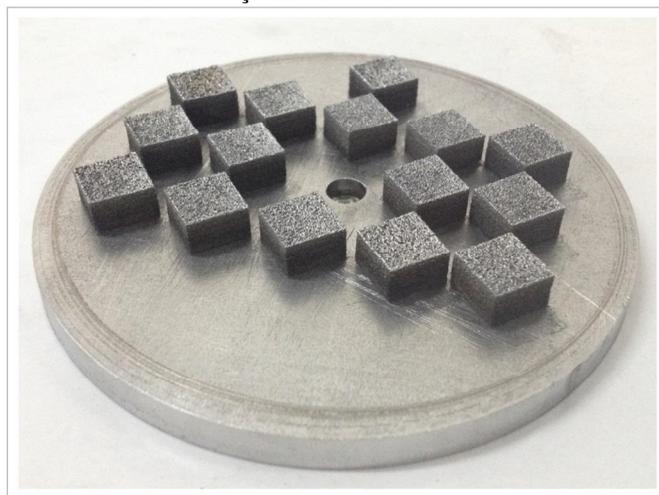
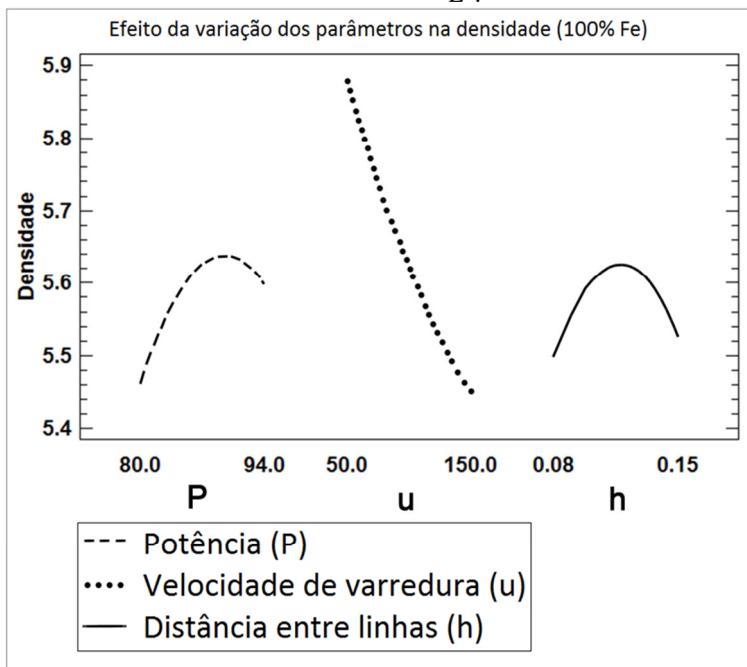


Figura 4.16 – Corpos de prova produzidos sobre substrato de aço inoxidável.

#### 4.6.2 Efeito dos parâmetros de processamento sobre densidade dos corpos de prova

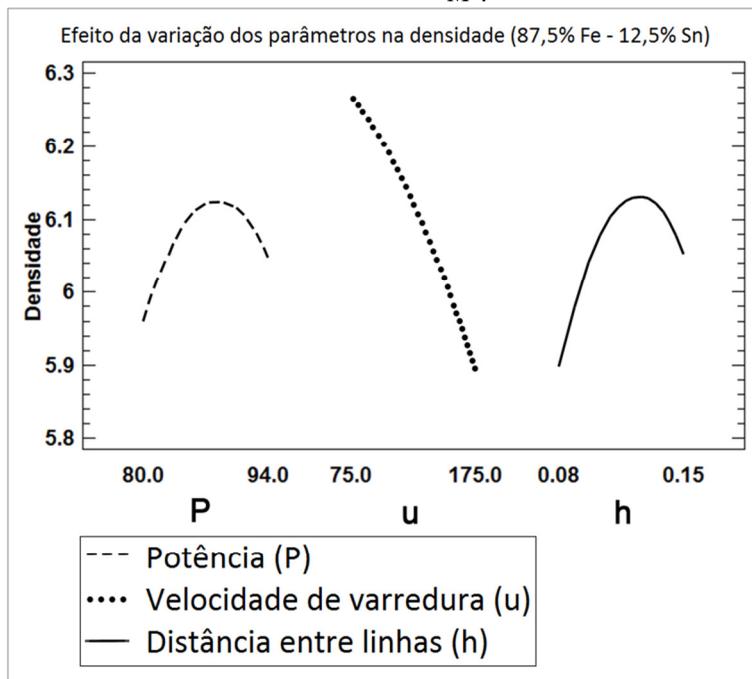
Após a confecção, os corpos de prova foram separadas do substrato e a densidade volumétrica de cada um foi medida, permitindo comparar o efeito dos parâmetros de processamento sobre a densidade. As Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 mostram o efeito da variação de cada parâmetro para as composições ensaiadas.

Figura 4.17 – Influência individual da variação da Potência, velocidade de varredura e distância entre linhas sobre a densidade da composição “L”.



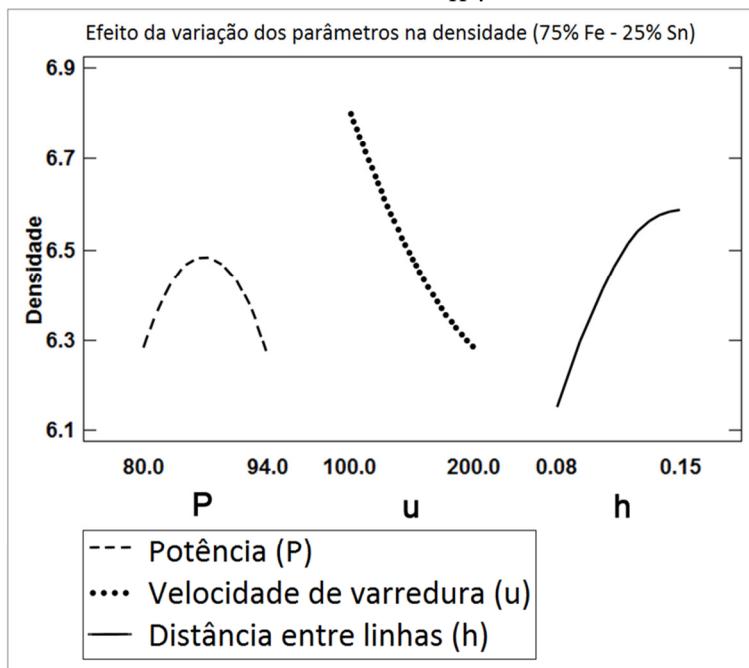
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.18 – Influência individual da variação da Potência, velocidade de varredura e distância entre linhas sobre a densidade da composição “M”.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.19 – Influência individual da variação da Potência, velocidade de varredura e distância entre linhas sobre a densidade da composição “H”.



Fonte: Autor (2016).

As figuras mostram um efeito distinto da variação da velocidade, potência do laser e distância entre as linhas sobre a densidade dos corpos de prova. Verifica-se que a velocidade de deslocamento do laser apresenta uma influência mais significativa que a potência do laser e a da distância entre as linhas.

A potência do laser e a distância entre as linhas apresentam um comportamento com um valor máximo característico, permitindo sua otimização.

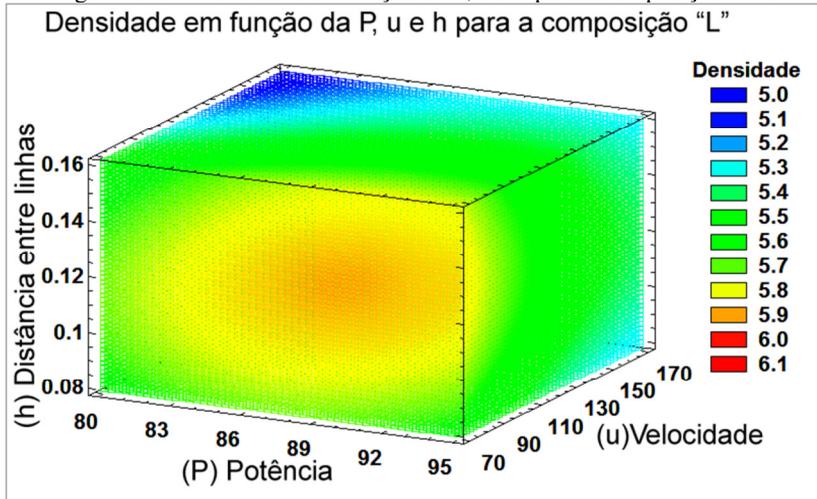
Para a potência, é possível notar que há ganhos de densidade até um valor específico para cada composição. Aumentos de potência além deste valor acarretam na diminuição da densidade, que é mais pronunciada nas composições com maior quantidade da liga de estanho-prata.

Ao observar os resultados da distância entre linhas, o efeito observado é inverso, ou seja, valores máximos de distância entre linhas resultaram em valores maiores de densidade, à medida que a concentração da liga de estanho e prata aumentou.

### 4.6.3 Malha de superfícies de resposta para a densidade

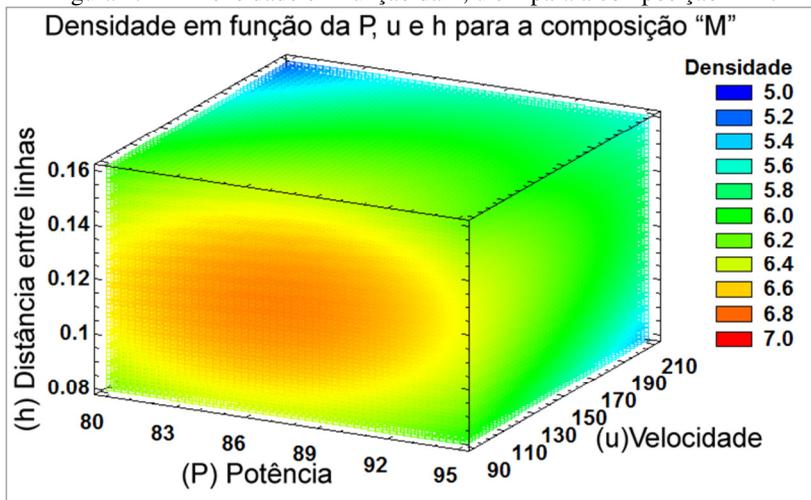
Para prover uma visão ampla das densidades que podem ser obtidas com a variação dos parâmetros, uma malha das superfícies de resposta foi elaborada para cada composição. A malha de superfícies de resposta apresenta a densidade em função da potência (eixo x), velocidade de varredura (eixo y) e distância entre linhas (eixo z). A Figura 4.20 mostra a malha obtida para a composição “L”.

Figura 4.20 – Densidade em função da P, u e h para a composição “L”.



A malha de superfícies de resposta contempla os efeitos combinados dos diferentes fatores e permite pré-estabelecer os parâmetros que devem ser utilizados para obter uma determinada porosidade alvo. O mesmo procedimento foi repetido para a composição “M”, cuja imagem dos resultados é mostrada na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Densidade em função da P, u e h para a composição “M”.

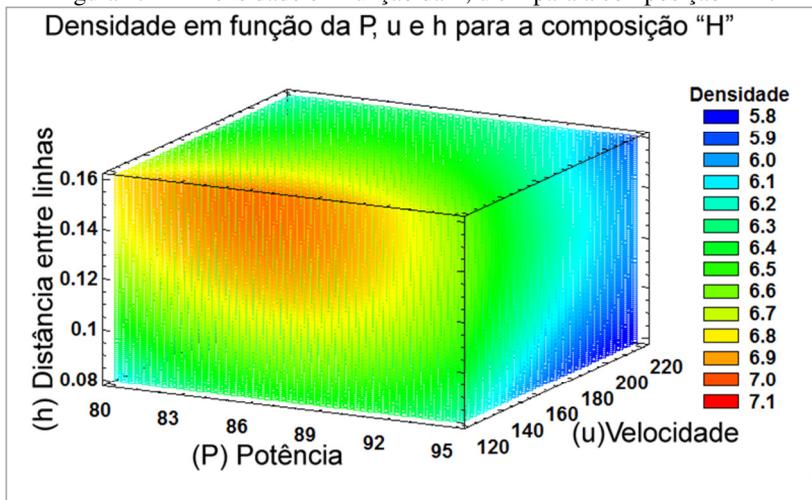


Fonte: Autor (2016).

Quando comparado com a composição “L”, a adição de 12,5% da liga de estanho e prata no ferro deslocou a região com maiores densidades, representada pela cor vermelha, para a esquerda.

A malha de superfícies de resposta para a terceira composição (Figura 4.22) evidenciou um deslocamento ainda maior da região vermelha no sentido negativo do eixo x, isso é, no sentido da diminuição da potência. Respectivamente a isso, a região vermelha sofreu um deslocamento vertical, no sentido positivo do eixo z, estabelecendo uma maior distância entre linhas de processamento.

Figura 4.22 – Densidade em função da P, u e h para a composição “H”.



Fonte: Autor (2016).

Esse comportamento pode ser explicado com base no trabalho de KRUTH et al., (2004), que sugere que materiais ou aditivos que diminuam o ponto de fusão tendem a aumentar a eficiência energética do processo, permitindo assim a utilização de menores potências.

Outro efeito seria o possível aumento do diâmetro da peça fundida, permitindo um maior preenchimento da região processada na situação em que as linhas de varredura estão mais afastadas.

O afastamento das linhas também diminui a refusão do material já processado, diminuindo as tensões e deformações relacionadas com a nova fusão e solidificação.

Os resultados também mostraram um aumento na densidade em função do aumento da quantidade da liga de estanho e prata adicionada ao material particulado. Tal efeito pode ter sido ocasionado pelo preenchimento por capilaridade dos poros e trincas pela liga de estanho e prata durante o processamento, contribuindo para valores maiores de densidade dos materiais fabricados.

Os parâmetros otimizados, evidenciando obter a maior densidade, com base nos resultados fornecidos pelas malhas de superfície, resultaram nos valores mostrados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Parâmetros otimizados de processamento para cada composição do FGM.

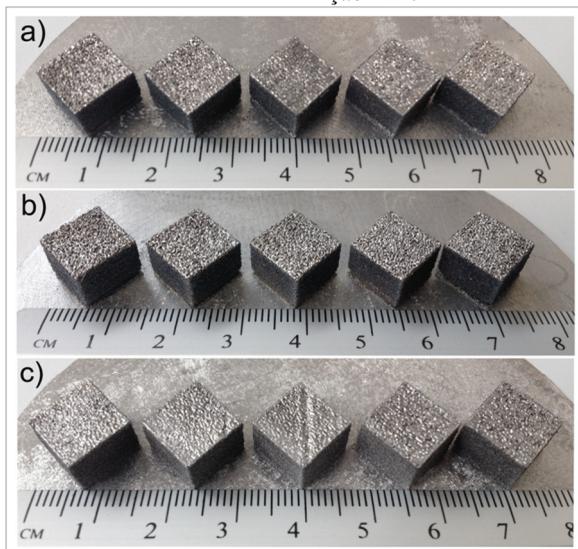
Composição	L	M	H
Densidade alvo	5,91 g/cm <sup>3</sup>	6,72 g/cm <sup>3</sup>	6,95 g/cm <sup>3</sup>
P (W)	<b>90,3</b>	<b>86,9</b>	<b>86,3</b>
u (mm/s)	<b>70</b>	<b>95</b>	<b>120</b>
h (mm)	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,15</b>
D (mm)	<b>0,11</b>	<b>0,11</b>	<b>0,11</b>
DE (J/mm <sup>3</sup> )	<b>97,62</b>	<b>69,30</b>	<b>43,59</b>

fonte: autor (2016).

#### 4.7 PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS COM PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA MAXIMIZAR A DENSIDADE

Após definição dos parâmetros para processamento de cada composição nos experimentos supracitados, um novo conjunto de corpos de prova foi fabricado para avaliação das propriedades de cada composição do FGM (Figura 4.23).

Figura 4.23 – Corpos de prova produzidos com parâmetros otimizados para a densidade: a) composição “L”; b) composição “M”; c) composição “H”.



Fonte: Autor (2016).

#### 4.7.2 Densidade dos corpos de prova

A densidade dos corpos de prova é apresentada na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Densidade dos corpos de prova fabricados com os parâmetros otimizados para a densidade.

Compo- sição	CP 1 (g/cm <sup>3</sup> )	CP 2 (g/cm <sup>3</sup> )	CP 3 (g/cm <sup>3</sup> )	CP 4 (g/cm <sup>3</sup> )	CP 5 (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão	Densi- dade relativa
<b>L</b>	5,61	5,67	5,63	5,72	5,68	5,66	0,04	71%
<b>M</b>	6,69	6,65	6,74	6,76	6,67	6,69	0,05	85%
<b>H</b>	6,88	6,86	6,83	6,93	6,90	6,88	0,04	89%

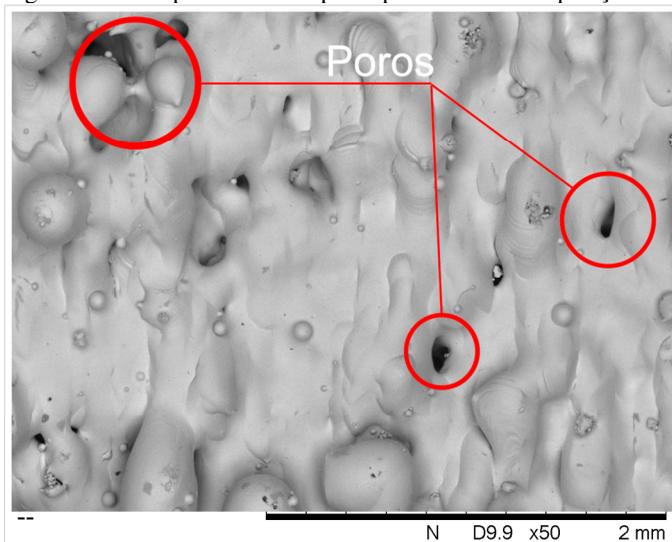
Fonte: Autor (2016).

Os valores médios da densidade ficaram próximos ao valor alvo apontado pelo experimento estatístico, resultando em maiores densidades pela adição da liga de estanho e prata no ferro. As composições “L”, “M” e “H” alcançaram, respectivamente, 71%, 85% e 89% de densidade relativa.

#### 4.7.3 Análise da superfície por MEV

A Figura 4.24 mostra a imagem obtida por MEV da superfície do corpo de prova correspondente à composição “L” do FGM.

Figura 4.24 – Superfície do corpo de prova com a composição “L”.



Fonte: Autor (2016).

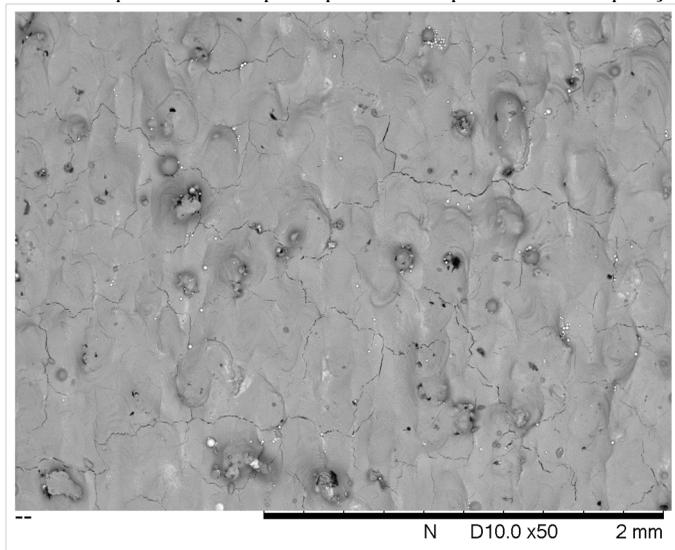
A imagem da Figura 4.24 mostra a presença de poros na composição “L”. Além disto, na imagem são identificadas direções preferenciais da solidificação, que coincidem com a direção de varredura do laser (alinhadas na direção vertical, observação feita em todos os corpos de prova com as distintas composições).

A presença de porosidade pode ser explicada pela forma irregular do pó de ferro utilizado (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015) e pelo tamanho médio das partículas de aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ , grande para o processamento por SLM, fatores que quando combinados, diminuem a densidade aparente do pó depositado, resultando em uma menor densidade da peça fabricada.

Além disto, o equipamento utilizado não contava com sistema de compactação das camadas de pó (espalhador em formato de rolo), que eram depositadas simplesmente pela força da gravidade, fator que também pode ter contribuído para uma menor densidade.

A Figura 4.25 mostra a superfície do corpo de prova correspondente à composição “M”.

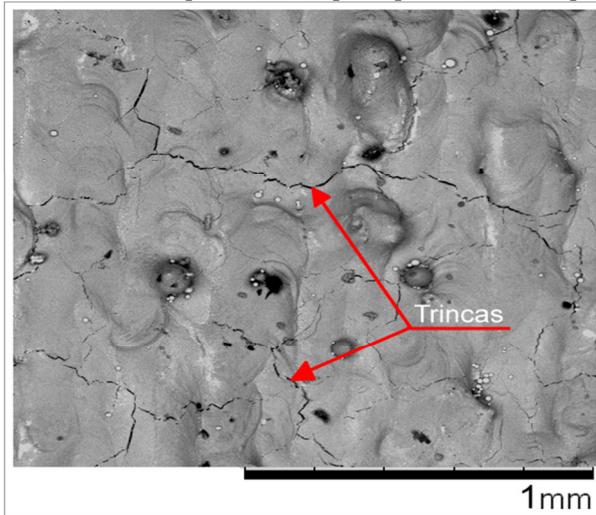
Figura 4.25 – Superfície do corpo de prova correspondente à composição “M”.



Fonte: Autor (2016).

A ampliação dessa superfície (Figura 4.26) mostra trincas na superfície do corpo de prova após a adição de 12,5% em peso de Sn-Ag na matéria-prima utilizada.

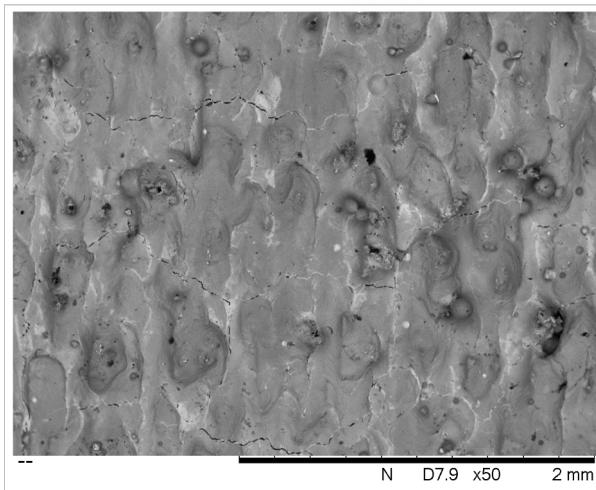
Figura 4.26 – Trincas na superfície do corpo de prova com a composição “M”.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.27 mostra a superfície do corpo de prova correspondente à composição “H”. O aumento de 12,5% para 25% da liga de estanho e prata na composição do material gerou regiões e veios esbranquiçados na superfície.

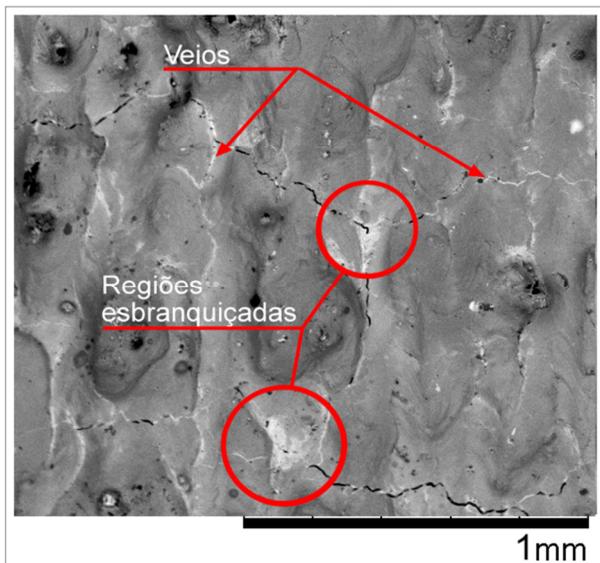
Figura 4.27 – Superfície do corpo de prova correspondente à composição “H” do FGM.



Fonte: Autor (2016).

Tal característica pode ser atribuída a presença de regiões com mistura saturada de estanho no ferro, o que pode ter gerado regiões de segregação e até mesmo promovido o preenchimento por capilaridade de algumas trincas com a liga de estanho e prata, durante a solidificação dos dois materiais. A Figura 4.28 apresenta uma maior aproximação na superfície, evidenciando as regiões e veios esbranquiçados.

Figura 4.28 – Características da superfície do corpo de prova com a composição “H”.



Fonte: Autor (2016).

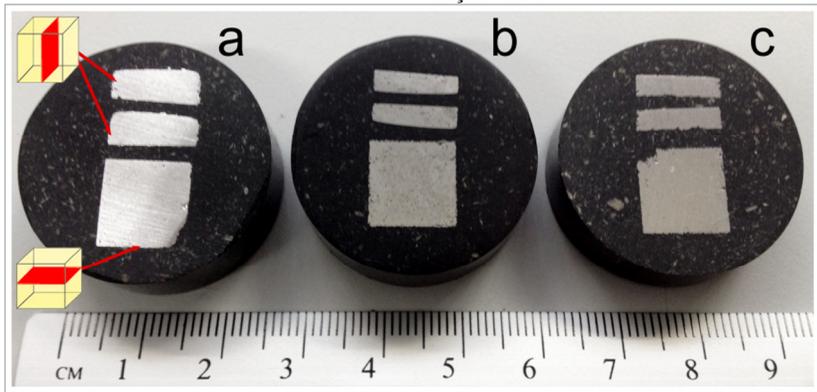
A crescente densidade observada com a adição de estanho no item 4.7.2 também pode ser melhor compreendida com a análise das imagens em MEV.

É possível notar que o estanho diminuiu o número de poros grandes, apesar de contribuir para o surgimento de trincas no material.

#### 4.7.4 Dureza dos corpos de prova

A dureza foi feita após o seccionamento dos corpos de prova. A Figura 4.29 mostra os corpos de prova cortados e embutidos, preparados para a análise, indicando as direções de seccionamento.

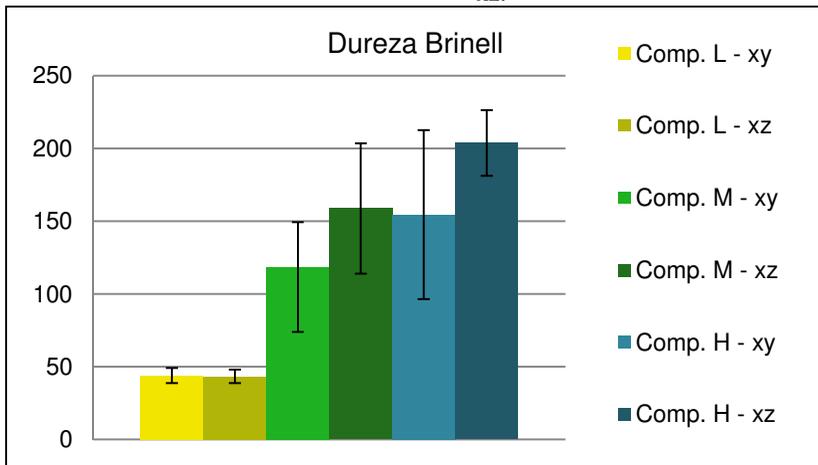
Figura 4.29 – Corpos de prova cortados e embutidos, preparados para medição da dureza: a) Composição “L”; b) Composição “M”; c) Composição “H”.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.30 mostra os valores da dureza Brinell medidos para cada uma das composições nas direções dos seccionamentos.

Figura 4.30– Dureza Brinell das composições “L”, “M” e “H” nos planos xy e xz.



Fonte: Autor (2016).

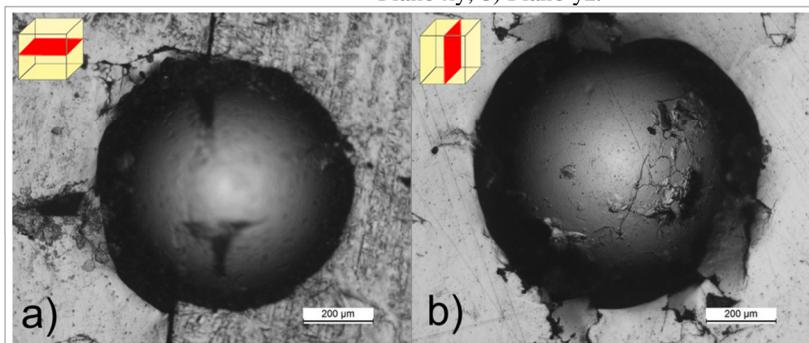
Os resultados mostraram um progressivo aumento da dureza com o aumento da quantidade da liga de estanho e prata adicionada e evidenciaram o endurecimento dos corpos de prova fabricados com as misturas

(composições “M” e “H”) em relação aos fabricadas somente com ferro (composição “L”).

A Figura 4.30 mostra que a dureza do corpo de prova com a composição “L” independe da direção de medição, mas com a adição da liga de Sn-Ag (composições “M” e “H”), se observa uma diferença significativa da dureza dos corpos de prova cortados na direção vertical.

Nos corpos de prova preparados com a mistura do ferro com a liga de Sn-Ag, só é possível afirmar um endurecimento quando comparada a dureza do plano xy da composição “M” com a dureza do plano yz da composição “H”. A Figura 4.31 mostra as endentações produzidas na composição “L”.

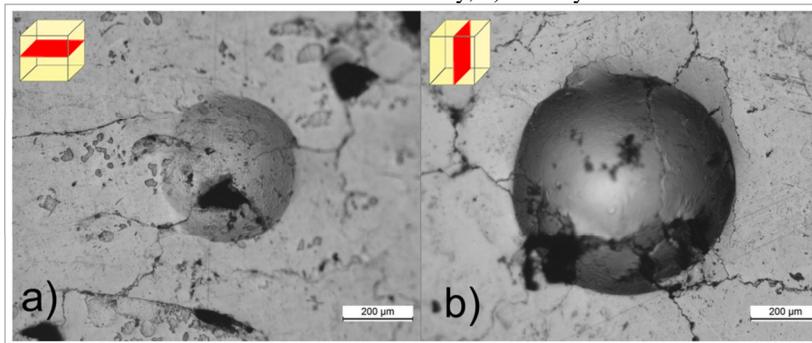
Figura 4.31 – Endentações feitas no corpo de prova com a composição “L”: a) Plano xy; b) Plano yz.



Fonte: Autor (2016).

As endentações no corpo de prova da composição “M” (Figura 4.32) identificam a maior dureza quando comparados com o corpo de prova com a composição “L”, pelo aumento da profundidade da endentação. Também fica evidente a diferença significativa da dureza no plano horizontal e vertical dos cortes.

Figura 4.32 – Endentações feitas no corpo de prova com a composição “M”: a) Plano xy; b) Plano yz.

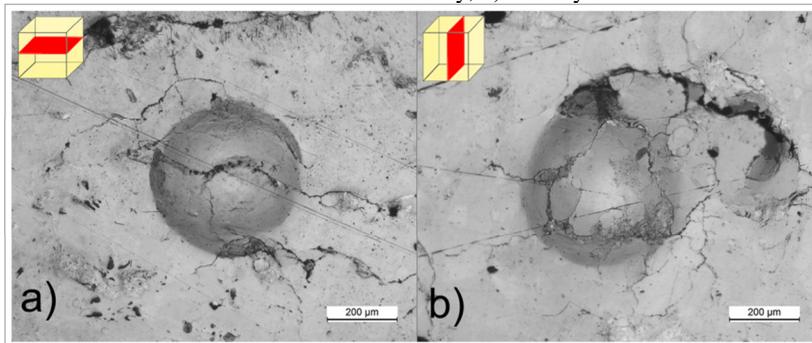


Fonte: Autor (2016).

Além disto, as endentações de cada plano mostram um maior número de trincas nas regiões adjacentes à endentação, quando comparadas com a composição “L”, evidenciando a maior fragilidade do material produzido com a adição da liga de Sn-Ag.

A Figura 4.33 mostra as endentações no corpo de prova com a composição “H”.

Figura 4.33 – Endentações feitas nos corpos de prova com a composição “H”: a) Plano xy; b) Plano yz.



Fonte: Autor (2016).

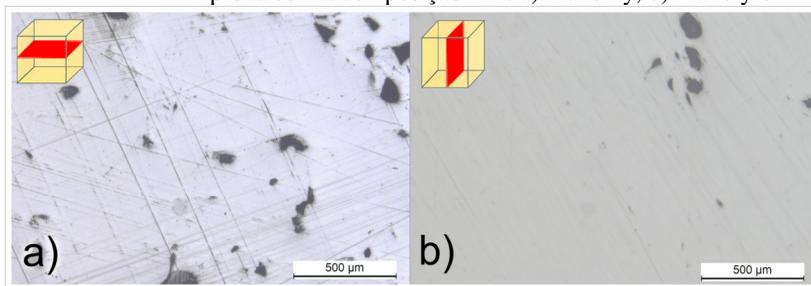
Este corpo de prova apresenta as menores endentações em comparação com os corpos de prova das composições “L” e “M”, apresentando a maior dureza, tanto no plano horizontal como também no plano vertical. No item “b)” da Figura 4.33 verifica-se a existência de uma fratura que se estende bem além das fronteiras da endentação, cessando em um defeito na estrutura do material (provavelmente um poro).

Para as três composições é possível notar o diâmetro ligeiramente maior na endentação “b”, correspondente à superfície vertical.

#### 4.7.5 Análise metalográfica dos corpos de prova otimizados

Assim como a determinação da dureza, a análise metalográfica foi feita nos planos xy e yz de cada corpo de prova. A Figura 4.34 mostra a superfície polida dos cortes do corpo de prova com a composição “L”.

Figura 4.34 – Superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “L”: a) Plano xy; b) Plano yz.

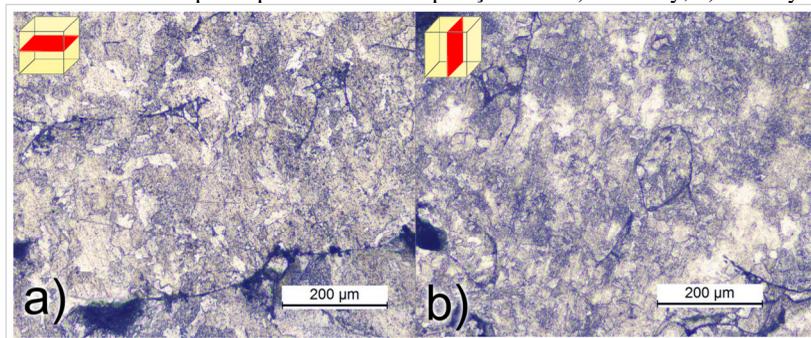


Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.34 mostra a presença de alguns poros, sem, contudo, evidenciar as fronteiras entre as camadas ou linhas de varredura do laser.

A Figura 4.35 mostra a superfície dos cortes do corpo de prova com a composição “L”, polidos e atacados com o reagente nital (2%).

Figura 4.35 – Superfície polida e atacada dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “L”: a) Plano xy; b) Plano yz.

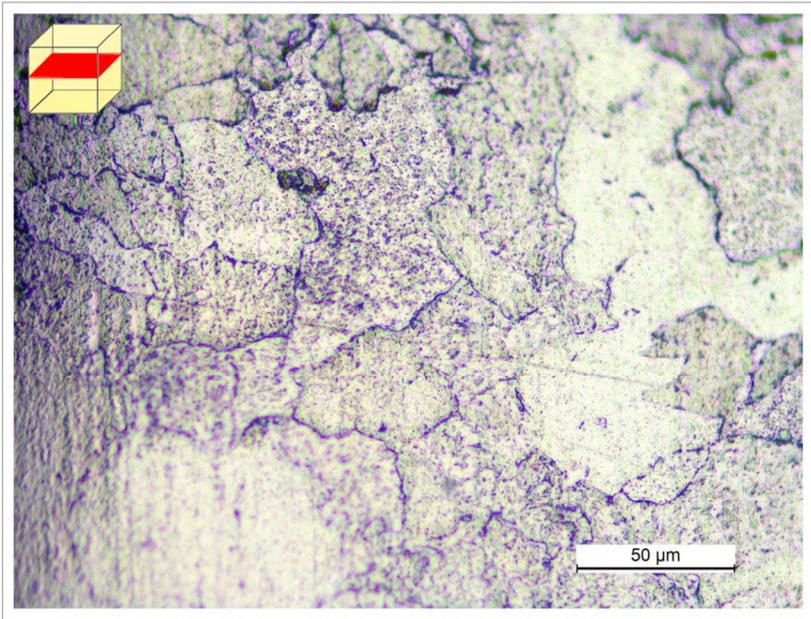


Fonte: Autor (2016).

As imagens revelam uma microestrutura ferrítica (ferro  $\alpha$ ) e grãos com diâmetro médio variando aproximadamente entre 40 e 90 micrômetros, o que corresponde a um tamanho de grão entre os números 4 e o 6, segundo a norma ASTM E112. Mesmo com o ataque químico, não é possível distinguir as fronteiras entre as camadas ou linhas de varredura do laser.

A Figura 4.36 mostra com mais nitidez os contornos de grão.

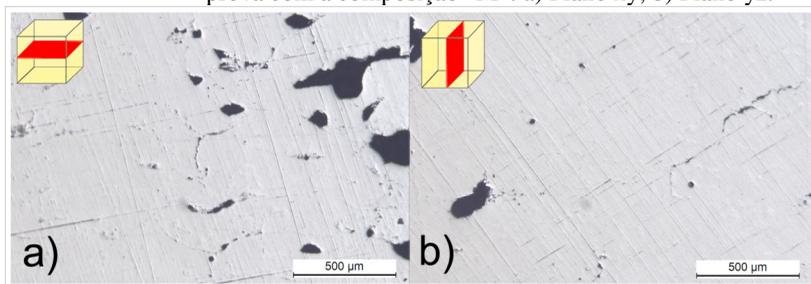
Figura 4.36 – Superfície polida de um corte do corpo de prova com a composição “L” mostrando grãos ferríticos.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.37 mostra a superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “M”.

Figura 4.37 – Superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “M”: a) Plano xy; b) Plano yz.

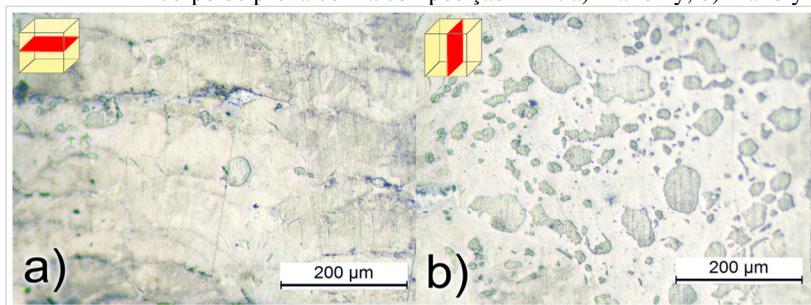


Fonte: Autor (2016).

Verifica-se alguns poros e trincas na superfície.

A Figura 4.38 mostra as superfícies polidas e atacadas de um corte horizontal e um vertical do corpo de prova com a composição “M”.

Figura 4.38 – Superfície polida e atacada dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “M”: a) Plano xy; b) Plano yz.



Fonte: Autor (2016).

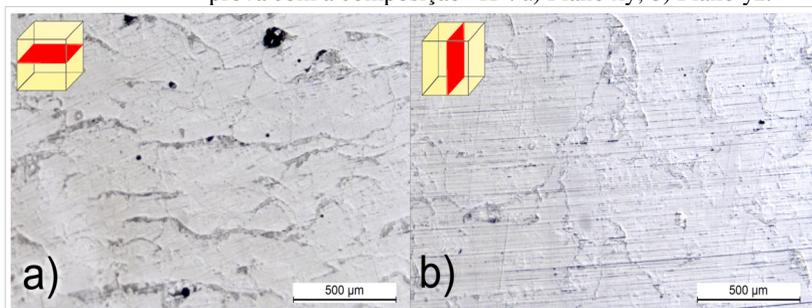
O ataque à secção no plano yz revelou uma liga heterogênea, com partículas de ferro dispersas em um composto intermetálico de FeSn em uma estrutura que lembra um “panetone”.

Como nos casos anteriores, novamente não é possível distinguir a região de ligação entre as camadas.

Entretanto, na secção do plano xy (imagem a) é possível observar um padrão de linhas horizontais, correspondentes à ligação entre cada linha de solda produzida na camada.

A Figura 4.39 mostra a superfície polida do corpo de prova correspondente à composição “H”, onde é possível observar a presença de algumas trincas e veios.

Figura 4.39 – Superfície polida dos cortes horizontal e vertical do corpo de prova com a composição “H”: a) Plano xy; b) Plano yz.

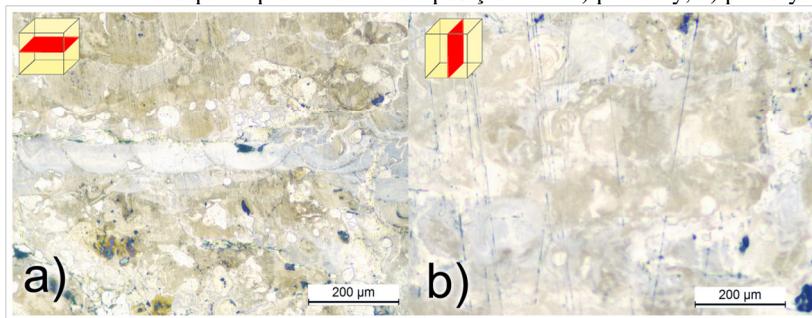


Fonte: Autor (2016).

Também é possível notar um padrão de veios horizontais na imagem “a”.

A Figura 4.40 mostra a superfície polida do corpo de prova correspondente à composição “H” após o ataque com o reagente.

Figura 4.40 – Superfície polida e atacada dos planos vertical e horizontal do corpo de prova com a composição “H”: a) plano xy; b) plano yz.



Fonte: Autor (2016).

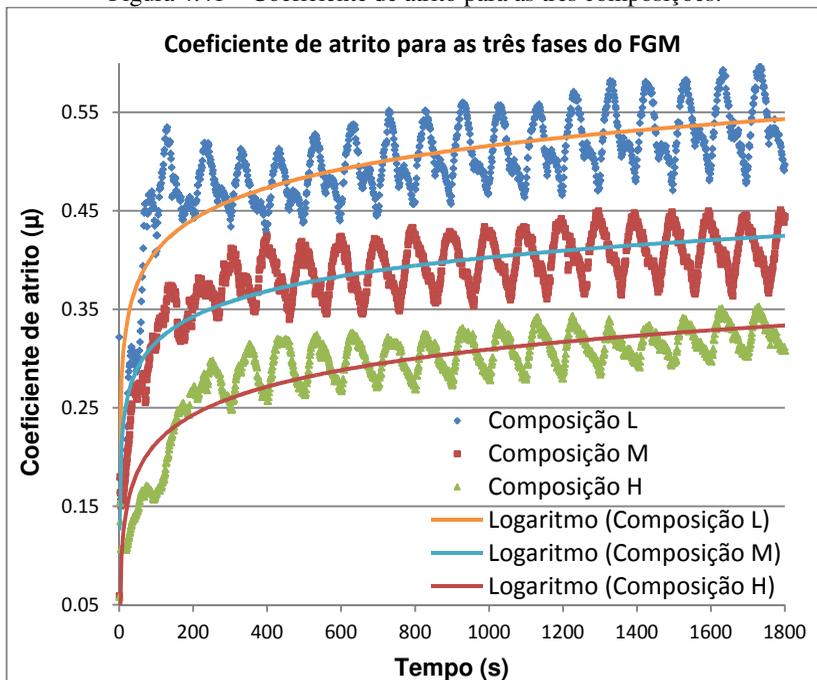
O ataque revela regiões e veios esbranquiçados, ricos em Sn-Ag, distribuídos em uma fase mais escura, provavelmente formada por FeSn. Na imagem “a” é possível notar uma grande região clara central, provavelmente formada por uma aglomeração das partículas do pó de Sn-Ag durante o espalhamento das camadas.

#### 4.7.6 Análise tribológica dos corpos de prova otimizados

A Figura 4.41 mostra o coeficiente de atrito medido em função do tempo para as três composições.

É possível observar a influência da adição do estanho que promove a diminuição do valor do coeficiente de atrito. Os materiais fabricados com as composições que apresentaram os maiores valores de dureza no item 4.7.4 são os que apresentaram menor coeficiente de atrito.

Figura 4.41 – Coeficiente de atrito para as três composições.



Fonte: Autor (2016).

O comportamento observado pode ser ajustado por uma função logarítmica, para cada composição do gradiente estudado. Para a composição “L” o comportamento é dado por

$$Y = 0,0464 \ln(x) + 0,1952, \quad (3.3)$$

para a composição “M” o comportamento é dado por

$$Y = 0,0374 \ln(x) + 0,1446 \quad (3.4)$$

e para a composição “H” o comportamento é dado por

$$Y = 0,0414 \ln(x) + 0,0236. \quad (3.5)$$

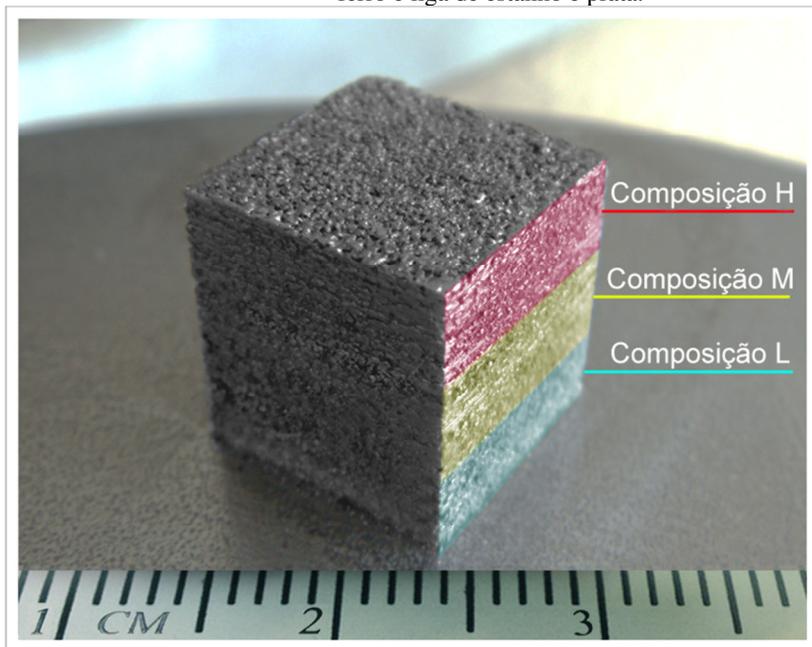
Aplicando o maior valor para o tempo, isto é  $x=1800$ , a diferença entre o coeficiente de atrito das composições “L” e “M” é de 27,2% enquanto que entre as composições “M” e “H” o valor é de 27,8%, evidenciando a gradação do coeficiente de atrito em função da composição.

## 4.8 FABRICAÇÃO DO FGM

### 4.8.1 FGM com geometria simples

A Figura 4.42 mostra a peça de geometria simples com gradação funcional fabricada com os parâmetros otimizados para cada composição do gradiente. Conforme descrito no item 3.4.9, as cores demarcam a região de cada composição do FGM.

Figura 4.42 – Peça de geometria simples provida de gradiente funcional entre ferro e liga de estanho e prata.

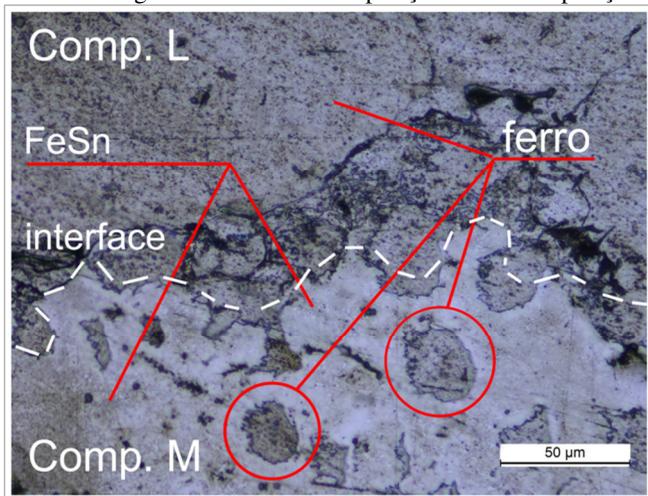


Fonte: Autor (2016).

A peça foi seccionada no plano  $yz$  e foi analisada através de MO para avaliar a ligação metalúrgica entre as composições.

A Figura 4.43 mostra o aspecto da região de transição entre a composição “L” e a composição “M”.

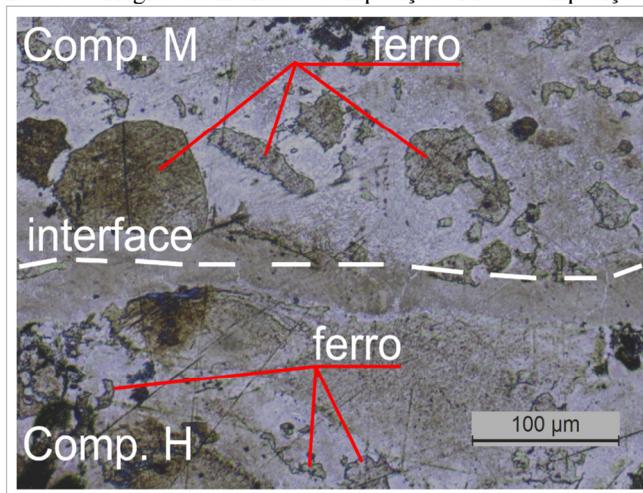
Figura 4.43 – Região da interface: Composição “L” – Composição “M”.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 4.44 mostra o aspecto da região de transição entre a composição “M” e a composição “H”.

Figura 4.44 – Região da interface: Composição “M” – Composição “H”.



Fonte: Autor (2016).

A composição H apresenta menor quantidade de partículas de ferro, redução que pode ser explicada pela maior quantidade de estanho que favorece a formação do composto intermetálico.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

A fabricação dos corpos de prova através do processo SLM se mostrou viável, produzindo peças com densidades que variaram entre 74% e 89% da densidade teórica dos materiais. É possível concluir que as composições do material com gradação funcional apresentaram incrementos na densidade em função da adição da liga de estanho e prata. Além disto, o aumento da quantidade de estanho e prata permitiu o processamento do material com uma densidade de energia menor, obtida através do aumento da velocidade de varredura do laser.

Entre os parâmetros de processamento investigados, a variação da velocidade apresentou a maior influência sobre a densidade dos corpos de prova produzidos, com velocidades menores resultando em maiores densidades. Os valores de densidade alcançados com parâmetros de processamento otimizados foram relativamente baixos para os atuais padrões de processamento por SLM.

A análise do material fabricado através do microscópio eletrônico de varredura mostrou a formação de micro trincas superficiais nas composições “M” e “H”, sugerindo uma maior fragilidade promovida pela adição da liga de estanho e prata na estrutura resultante. A fragilidade pode ser explicada pelas tensões internas geradas pelas interações entre os elementos e pela rápida fusão e solidificação inerentes ao processo.

Deve-se levar em conta que o estanho possui estrutura cristalina tetragonal, diferente do ferro que apresenta estrutura cristalina cubica de corpo centrado, incompatibilidade esta que pode ter sido responsável pela fragilidade resultante. Além disto, a grande diferença entre os pontos de fusão favoreceu a formação de regiões com segregação durante a solidificação do material.

A análise da microestrutura revelou uma estrutura heterogênea para as composições com adição da liga de Sn-Ag. Estas também apresentaram maior dureza nos planos analisados, característica possivelmente relacionada com a maior densidade destas composições.

Os teste tribológico mostrou uma relação inversamente proporcional entre a concentração de estanho e prata no material e o valor do coeficiente de atrito, sendo que quanto maior a concentração de estanho e prata, menores os valores obtidos para o coeficiente de atrito, evidenciando a gradação obtida dessa propriedade.

Finalmente, a fabricação e análise das interfaces do FGM fabricado mostraram ligação entre as composições e a viabilidade de obtenção de geometrias relativamente complexas com o gradiente proposto.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a redução da presença de porosidades através da utilização de matérias-primas com morfologia arredondada e granulometria refinada.
- Compreender os efeitos promovidos por novas estratégias de varredura (*islands*, *chessboard*) e deposição de material (*refill*) sobre as propriedades do material fabricado.
- Compreender os efeitos do controle e variação da temperatura do substrato de fabricação sobre os materiais fabricados;
- Avaliar a influência de diferentes sistemas de espalhamento do pó sobre as propriedades dos materiais fabricados.

## REFERÊNCIAS

- ASTM G40. **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**, 2015.
- BARBON, G. et al. Taking Arduino to the Internet of Things: The ASIP programming model. **Computer Communications**, v. 89–90, p. 128–140, 2015.
- BEAL, V. E. **FABRICATION OF FUNCTIONAL GRADIENTS BETWEEN TOOL STEEL AND COPPER PARTS BY SELECTIVE LASER FUSION USING A HIGH POWER Nd:YAG PULSED LASER BEAM TO INJECTION MOULDS APPLICATIONS**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- BHARTI, I.; GUPTA, N.; GUPTA, K. M. Novel applications of functionally graded nano, optoelectronic and thermoelectric materials. **International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing**, v. 1, n. 3, p. 221–224, 2013.
- BRANCH, S. **Laser synthesis of functional graded filter elements**. Samara: [s.n.].
- CAMPBELL, T. et al. **Strategic Foresight Report**. Washington: [s.n.].
- CANDELAS, F. A. et al. Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 29, p. 105–110, 2015.
- CHEN, F.-M.; LIU, X. Advancing biomaterials of human origin for tissue engineering. **Progress in Polymer Science**, 2015.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 1. ed. São Paulo: ABM, 2012.
- CHILDS, T. H. C.; HAUSER, C.; BADROSSAMAY, M. Mapping and Modelling Single Scan Track Formation in Direct Metal Selective Laser Melting. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1, p. 191–194, 2004.

CHRISTIE, T.; BRATHWAITE, B. Mineral Commodity Report 11 — Tin. n. 1979, 1996.

CHRISTIE, T.; BRATHWAITE, B. Mineral Commodity Report 15 — Iron. 1997.

CLIMENTE, A.; TORRENT, D.; SÁNCHEZ-DEHESA, J. Gradient index lenses for flexural waves based on thickness variations. **Applied Physics Letters**, v. 105, n. 6, p. 64101, 2014.

COOLEY, W. G. Application of functionally graded materials in aircraft structures. 2005.

D. L. BOURELL, H. L. MARCUS, J. W. BARLOW, J. J. B. AND C. R. D. **Multiple material systems for selective beam sintering** United States, 1991.

DECKARD, J. J. B. AND C. R. **Selective laser sintering with assisted powder handling** United States, 1990.  
**Encyclopaedia Britannica**. , 2016. (Nota técnica).

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. **Longitudinal section of the humerus (upper arm bone)**. Disponível em: <<https://media1.britannica.com/eb-media/57/94557-004-CF63D396.jpg>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

FIMA, P. Surface tension and density of liquid Sn-Ag alloys. **Applied Surface Science**, v. 257, n. 8, p. 3265–3268, 2011.

FIORUCCI, A. R.; BENEDETTI FILHO, E.; OLIVEIRA, N. DE. Os Alótropos do Estanho: Ocorrências do Estanho  $\alpha$  e as Novas Soldas sem Chumbo Usadas em Eletrônicos. **Química Nova na Escola**, v. 34, n. 3, p. 124–130, 2012.

FROES, F. H. Aerospace materials for the twenty-first century. **Materials & Design**, v. 10, n. 3, p. 110–120, 1989.

GA, W.; MOSER, Z.; PSTRUS, J. ( Sn-Ag ) eut + Cu Soldering Materials , Part I: Wettability Studies. v. 25, n. 2, p. 115–121, 2004.

GANCARZ, T. et al. A Comparison of Surface Tension, Viscosity, and Density of Sn and Sn–Ag Alloys Using Different Measurement Techniques. **International Journal of Thermophysics**, v. 32, p. 1210–1233, 2011.

GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **CAD Computer Aided Design**, v. 69, p. 65–89, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2015.

GRINTECH. **Curved and Grin lenses**. Disponível em: <<http://www.grintech.de/gradient-index-optics.html>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

GU, D. D. et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. **International Materials Reviews**, v. 57, n. 3, p. 133–164, 2012.

GUPTA, A.; TALHA, M. Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. **Progress in Aerospace Sciences**, p. 1–14, 2015.

H, D.; YEOVIL, W.; BA, S. Materials Technology for Aerospace Applications. v. 6, n. 1, p. 18–24, 1985.

HARI KUMAR, K. C.; WOLLANTS, P.; DELAEY, L. Thermodynamic evaluation of Fe-Sn phase diagram. **Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry**, v. 20, n. 2, p. 139–145, 1996.

HERAEUS. **Heraeus Sn-Ag powder**. Disponível em: <<https://www.heraeus.com/en/group/home.aspx>>. Acesso em: 14 fev. 2016.

HOGANAS. **AHC 100.29 iron powder**. Disponível em: <<https://www.hoganas.com/pt-br>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

INSIDEMETALADDITIVEMANUFACTURING. **Scanning patterns in SLM**. Disponível em: <<http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/-scanning-patterns-in-slm>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

JUNG, Y.-G. et al. Residual stress and thermal properties of zirconia / metal ( nickel , stainless steel 304 ) functionally graded materials fabricated by hot pressing. **Journal of Materials Science**, v. 32, p. 3841–3850, 1997.

KIEBACK, B.; NEUBRAND, A.; RIEDEL, H. Processing techniques for functionally graded materials. **Materials Science and Engineering A**, v. 362, n. 1–2, p. 81–105, 2003.

KIM, J. G. et al. Tensile behavior of aluminum/carbon fiber reinforced polymer hybrid composites at intermediate strain rates. **Journal of Composite Materials**, v. 49, n. 10, p. 1179–1193, 2014.

KINGSBURY. **Axial bearing**. Disponível em: <<http://www.kingsbury.com>>. Acesso em: 23 set. 2016.

KOIZUMI, M.; NIINO, M. Overview of FGM Research in Japan. **MRS Bulletin**, v. 20, n. 1, p. 19–21, 1995.

KRUTH, J.-P. et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. **Rapid Prototyping Journal**, v. 11, n. 1, p. 26–36, 2005.

KRUTH, J. P. et al. Selective laser melting of iron-based powder. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, n. 1–3, p. 616–622, 2004.

KRUTH, J. P. et al. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 730–759, 2007.

LEADER, M. Understanding Journal Bearings. **Vibration Institute, Annual Meeting**, 2001.

LEVY, G. N.; SCHINDEL, R.; KRUTH, J. P. Rapid Manufacturing and Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State of the Art and Future Perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52, n. 2, p. 589–609, 2003.

LI, C. et al. Carburising of steel AISI 1010 by using a cathode arc plasma process. **Surface and Coatings Technology**, v. 187, n. 1, p. 1–5, 2004.

LI, R. et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, n. 9–12, p. 1025–1035, 2012.

MAHAMOOD, R. M. et al. Functionally Graded Material: An Overview. **World Congress on Engineering**, v. III, p. 2–6, 2012.

MAHAMOOD, R. M.; AKINLABI, E. T. Laser metal deposition of functionally graded Ti6Al4V/TiC. **Materials & Design**, v. 84, p. 402–410, 2015.

MANFREDI, D. et al. From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial alsiing alloy processed through direct metal laser sintering. **Materials**, v. 6, n. 3, p. 856–869, 2013.

MARQUES, S. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAMADA E VELOCIDADE DO LASER NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE PEÇAS FABRICADAS POR FUSÃO SELETIVA A LASER NO AÇO MARAGING 300. [s.l.] CENTRO UNIVERSITÁRIO TUPY - UNISOCIESC, 2014.

MISHINA, H.; INUMARU, Y.; KAITOKU, K. Fabrication of ZrO<sub>2</sub>/AISi316L functionally graded materials for joint prostheses. **Materials Science and Engineering A**, v. 475, n. 1–2, p. 141–147, 2008.

MIYAMOTO, Y. et al. **Functionally Graded Materials Design, Processing and Applications**. 1. ed. New York: Springer US, 1999.

MONTGOMERY, D. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6th. ed. USA: wiley books, 2014.

MUMTAZ, K. A.; HOPKINSON, N. Laser melting functionally graded composition of Waspaloy and Zirconia powders. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 18, p. 7647–7656, 2007.

NOVAK, S. et al. The effect of residual stresses in functionally graded alumina-ZTA composites on their wear and friction behaviour. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 1, p. 151–156, 2007.

OHIRA, C.; FUJII, H.; MORISADA, Y. Temperature dependence of surface tension of Sn-Ag alloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, n. 5, p. 1561–1567, 2014.

OLAKANMI, E. O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 8, p. 1387–1405, 2013.

OLAKANMI, E. O.; COCHRANE, R. F.; DALGARNO, K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. **Progress in Materials Science**, v. 74, p. 401–477, 2015.

PATRI K. VENUVINOD, W. M. **Rapid Prototyping Laser-based and Other Technologies**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2004.

PEYRE, P. et al. Experimental and numerical analysis of the selective laser sintering ( SLS ) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 225, p. 326–336, 2015.

POCKETDENTISTRY. **Diagrama estanho-prata**. Disponível em: <<http://pocketdentistry.com/10-restorative-materials-metals/>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

POMPE, W. et al. Functionally graded materials for biomedical applications. **Materials Science and Engineering A**, v. 362, n. 1–2, p. 40–60, 2003.

PRCHLIK, L. et al. Friction and wear properties of WC-Co and Mo-Mo<sub>2</sub>C based functionally graded materials. **Wear**, v. 249, n. 12, p. 1103–1115, 2001.

RABIN, B. H.; SHIOTA, I. Functionally Gradient Materials. **MRS Bulletin**, v. 20, n. 1, p. 14–18, 1995.

S. SURESH, A. M. **Fundamentals of functionally graded materials**. Londres: Maney Materials Science, 1998.

SCHULTES, G. et al. Co-deposition of silver nanoclusters and sputtered alumina for sensor devices. **Thin Solid Films**, v. 515, p. 7790–7797, 2007.

SHARIFI, E. et al. Preparation of a biomimetic composite scaffold from gelatin/collagen and bioactive glass fibers for bone tissue engineering. **Materials Science and Engineering: C**, v. 59, p. 533–541, 2016.

SHISHKOVSKY, I. Synthesis of functional gradient parts via RP methods. **Rapid Prototyping Journal**, v. 7, n. 4, p. 207–211, 2001.

SILVA, E. C. N.; WALTERS, M. C.; PAULINO, G. H. Modeling bamboo as a functionally graded material: Lessons for the analysis of affordable materials. **Journal of Materials Science**, v. 41, n. 21, p. 6991–7004, 2006.

SIMCHI, A. The role of particle size on the laser sintering of iron powder. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 35, n. 5, p. 937–948, 2004.

SING, S. L. et al. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. **Journal of Orthopaedic Research**, v. 34, n. 3, p. 369–385, 2016.

SU, B. et al. Wear and Friction Behavior of the Spray-Deposited SiCp/Al-20Si-3Cu Functionally Graded Material. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 22, n. 5, p. 1355–1364, 2013.

TAYLOR, C. Morphology of direct SLS-processed stainless steel layers. **Proceedings of Solid ...**, v. 44, n. 0, p. 530–537, 2002.

THUMMLER, F.; OBERACKER, R. **INTRODUCTION TO POWDER METALLURGY**. 1. ed. London: The Institute of Materials, 1993.

VOLPATO, N. et al. **PROTOTIPAGEM RÁPIDA - TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

WIKIPEDIA. **Iron phase diagram**. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Iron>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

WILLIAMS, J. C.; STARKE, E. A. Progress in structural materials for aerospace systems11The Golden Jubilee Issue—Selected topics in Materials Science and Engineering: Past, Present and Future, edited by S. Suresh. **Acta Materialia**, v. 51, n. 19, p. 5775–5799, 2003.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, p. 1–10, 2012.

XILLOC-MEDICAL. **Head prosthesis**. Disponível em: <<http://www.xilloc.com>>. Acesso em: 1 nov. 2016.

YADROITSEV, I. et al. Application of laser assisted technologies for fabrication of functionally graded coatings and objects for the International Thermonuclear Experimental Reactor components. **Journal of Nuclear Materials**, v. 362, n. 2–3, p. 189–196, maio 2007.

YADROITSEV, I.; BERTRAND, P.; SMUROV, I. Parametric analysis of the selective laser melting process. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 19, p. 8064–8069, 2007.

YAGODIN, D. et al. Density studies of liquid alloys Sn-Ag and Sn-Ag with near eutectic compositions. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 358, n. 21, p. 2935–2937, 2012.

YASUKAWA, T. et al. Intraocular sustained drug delivery using implantable polymeric devices. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 57, n. 14, p. 2033–2046, 2005.

YOUNG, D. A. Phase diagrams of the elements. **Lawrence Livermore Laboratory**, p. 64, 1975.

## APÊNDICE A – AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE DEPOSIÇÃO DE PÓ E CONTROLE DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO DE FABRICAÇÃO

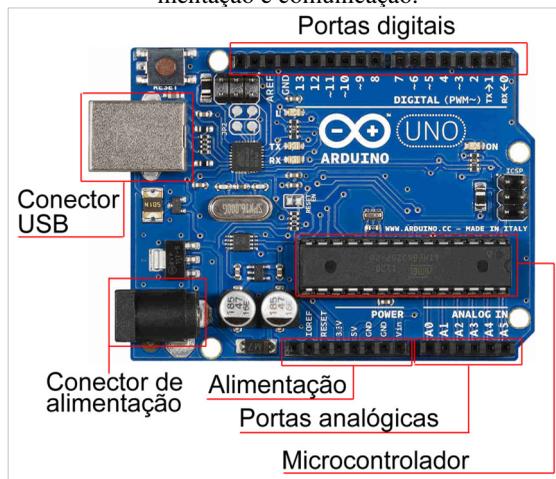
O sistema de deposição e espalhamento do pó utilizou uma concepção baseada em um funil móvel, por não exigir um segundo sistema de elevação para alimentação do pó, normalmente utilizado em máquinas comerciais (Figura 2.10).

A concepção baseada em um funil móvel (Figura 3.3) exigiu a automação da movimentação do funil e foi realizada com um motor de passo controlado através da plataforma Arduino®.

O Arduino® é uma plataforma de hardware aberta (*open hardware*) que permite desenvolver sistemas microcontrolados para diversos dispositivos, aliando alta flexibilidade com baixo custo (CANDELAS et al., 2015).

Atualmente estão disponíveis diversos modelos de placas Arduino® com diferentes processadores, tamanhos e opções de conectividade. A Figura A.1 mostra o Arduino UNO R3, modelo popular entre as placas disponíveis e escolhido para a automação do sistema de movimentação do funil espalhado de pó.

Figura A.1 – Placa Arduino® UNO R3 mostrando as diversas conexões de alimentação e comunicação.



Fonte: Autor (2016).

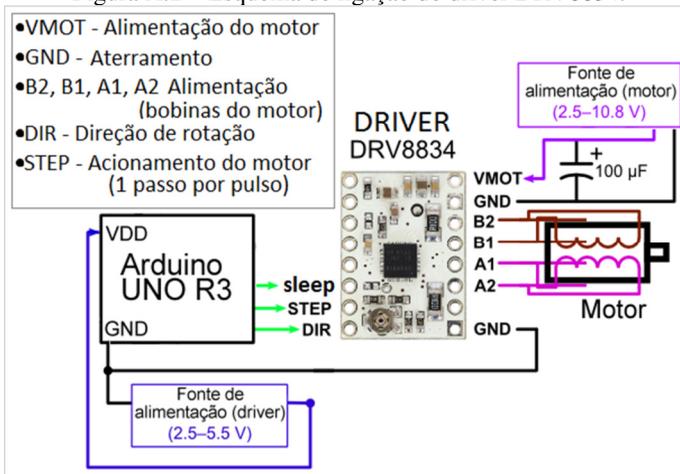
A placa UNO R3 possui um conector USB (*Universal Serial Bus*) pelo qual pode ser conectado a um computador. A conexão pela porta

USB serve para transmissão de dados e também como alimentação para a placa, dispensando a utilização do conector de alimentação. Além disso, a placa conta com 14 pinos de entrada e saída digitais (I/O – Input-output) que operam em 5V, sendo que cada pino pode fornecer uma corrente máxima de 40 mA. Os pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11 podem ser utilizados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*) de 8 bits. Para comunicação com dispositivos analógicos a placa possui seis entradas, cada uma com resolução de 10 bits

As placas Arduino® podem ter as funcionalidades expandidas por uma enorme variedade de módulos e sensores compatíveis com a plataforma (BARBON et al., 2015). Para a automação da movimentação do funil e controle da temperatura dois módulos e um motor de passo foram utilizados.

O primeiro módulo é o *driver* (Pololu® DRV8834) para acionar o motor de passo utilizado (Marca Soyo, modelo SY57STH41-1006A) e tem como função realizar o seu controle. A Figura A.2 mostra o esquema de ligação do driver no controlador UNO R3, no motor de passo e nas fontes de alimentação. O módulo recebe três sinais digitais de entrada do UNO R3 (*inputs*). A entrada *sleep* funciona como uma chave liga/desliga para o driver, a entrada *STEP* comanda o giro de um passo do motor para cada pulso de entrada e a entrada *DIR* define o sentido de rotação do motor.

Figura A.2 – Esquema de ligação do driver DRV8834.



Fonte: Autor (2016).

Para controlar o motor um controle remoto foi elaborado, de tal maneira que a operação de espalhamento do pó pudesse ser feita de forma manual, através dos botões de avanço e retorno do controle, ou automática, com a sincronização do tempo de espera com o tempo de processamento de uma camada pelo laser da SLM. O controle também incluiu um potenciômetro para regulagem da velocidade do motor.

O segundo módulo (MAX 6675) foi utilizado para converter para digital e amplificar o sinal gerado pelo termopar do tipo K. A Figura A.3 mostra o esquema de ligação do módulo no Arduino<sup>®</sup> UNO R3. O módulo possui dois parafusos, onde são fixados os fios positivo e negativo do termopar, e seis pinos machos, que são encaixados nas portas digitais do UNO R3. Os pinos servem para alimentação do módulo e transmissão da leitura do termopar para amplificação, conversão e posterior registro das temperaturas pelo Arduino<sup>®</sup>.

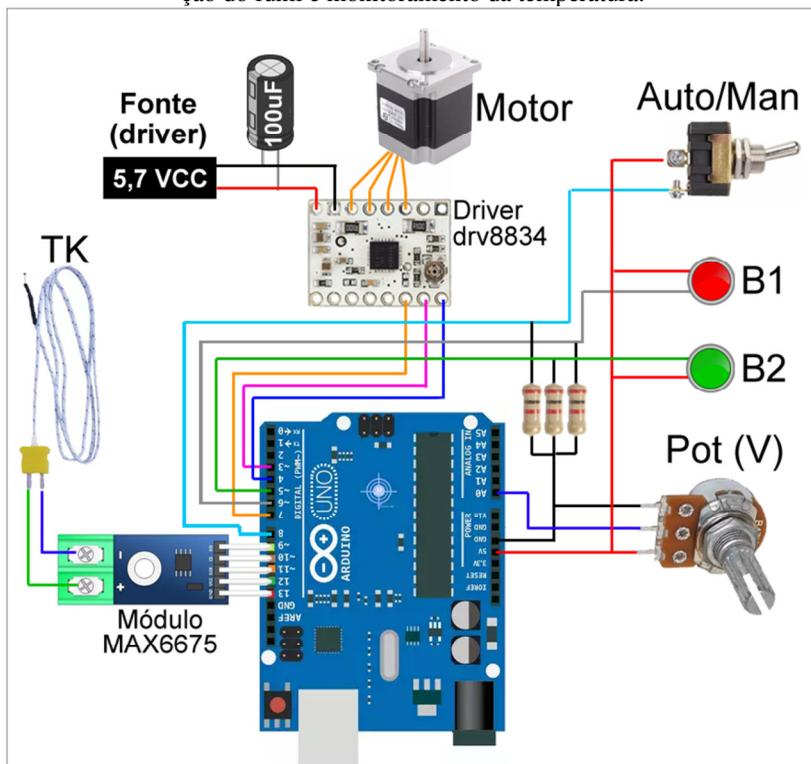
Figura A.3 – Esquema de ligação do módulo MAX6675 no UNO R3 para leitura do sinal do termopar tipo K.



Fonte: Autor (2016).

A Figura A.4 mostra o esquema de ligação completo com módulos, controle e motor interligados. Os botões (B1 e B2) movimentam o funil espalhador de pó, para cada sentido do movimento, quando a chave seletora de modo de operação (Auto/Man) está na posição “Man”. Quando o seletor está na posição “Auto”, o espalhamento acontece automaticamente, com intervalos de tempo pré-definidos na programação e que devem ser equivalentes ao tempo necessário para processamento de uma camada. O potenciômetro (Pot (V)) regula a velocidade do movimento do funil espalhador de pó.

Figura A.4 – Esquema de ligação dos componentes do sistema de movimentação do funil e monitoramento da temperatura.



Fonte: Autor (2016).

Após a ligação dos módulos, motor e controle remoto na placa UNO R3, foi programada a rotina de operação na IDE (*Integrated Development Environment*) da plataforma Arduino<sup>®</sup>. Em relação ao software de programação para a plataforma, o mesmo ambiente integrado de desenvolvimento é utilizado para todas as placas e está disponível para diversos sistemas operacionais. A linguagem utilizada para a programação na plataforma Arduino<sup>®</sup> é a C/C++ e é aplicada para todos os modelos de placas disponíveis (CANDELAS et al., 2015).

A rotina escrita para a automação da movimentação do funil de deposição e espalhamento do pó e leitura das temperaturas do substrato utiliza a biblioteca (*library*) “max6675.h” para comandar o módulo MAX6675 e é descrita como segue:

```

#include <max6675.h>

//Números dos pinos do termopar
int thermo_gnd_pin = 13;
int thermo_vcc_pin = 12;
int thermo_so_pin = 9;
int thermo_cs_pin = 10;
int thermo_sck_pin = 11;
MAX6675 thermocouple(thermo_sck_pin, thermo_cs_pin, thermo_so_pin);
//Número dos pinos para acionamento do motor
const int stepPin = 3; //Comanda os passos no driver drv8834
const int dirPin = 4; //Comanda o sentido de rotação no driver drv8834
const int sleepPin = 7; //Coloca o driver drv8834 em sleep mode
int fbutton = 5; //Botão que move motor (clockwise)
int bbutton = 6; //Botão que move motor (counterclockwise)
int automan = 8; //Chave para escolha dos modos automático ou manual
const int range = 1500; //Amplitude do movimento do funil
const long TIME = 0; //Intervalo de espera entre cada movimentação (auto) (em ms)

void setup()
{
  //Modo de operação dos pinos do Arduino
  pinMode(stepPin,OUTPUT);
  pinMode(dirPin,OUTPUT);
  pinMode(sleepPin,OUTPUT);
  pinMode(fbutton,INPUT);
  pinMode(bbutton,INPUT);
  pinMode(automan,INPUT);
  //Modo de operação dos pinos do termopar
  Serial.begin(9600);
  pinMode(thermo_vcc_pin, OUTPUT);
  pinMode(thermo_gnd_pin, OUTPUT);
  digitalWrite(thermo_vcc_pin, HIGH);
  digitalWrite(thermo_gnd_pin, LOW);
}
int contI = millis();
int contF = millis();

void loop()
{
  if(contF - contI > 5000)
  {
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.println(thermocouple.readCelsius());
    contI = millis();
    contF = millis();
  }
  digitalWrite(sleepPin,LOW); //Desativa o driver drv8834 (ON/OFF)
  if(digitalRead(automan) == HIGH)
  {
    digitalWrite(sleepPin,HIGH); //Aciona o driver drv8834 (ON/OFF)
    digitalWrite(dirPin,HIGH); //Aciona o motor (CLOCKWISE)
  }
}

```

```

for(long x = 0; x < range; x++) // Executa 800 pulsos
{
    int SPEED = analogRead(A0);
    int RPM = SPEED;
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(RPM);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(RPM);
}

digitalWrite(sleepPin,LOW); //Desativa o driver drv8834(ON/OFF)
delay(TIME); //Tempo de espera (DELAY)
digitalWrite(sleepPin,HIGH); //Ativa o driver drv8834(ON/OFF)
digitalWrite(dirPin,LOW); //Aciona o motor (COUNTERCLOCKWISE)

for(long x = 0; x < range; x++) //Executa 800 pulsos
{
    int SPEED = analogRead(A0);
    int RPM = SPEED;
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(RPM);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(RPM);
}
digitalWrite(sleepPin,LOW); //Desliga o driver drv8834(ON/OFF)
delay(TIME); // tempo de espera (DELAY)
}
else
{
    if (digitalRead(bbutton) == HIGH)
    {
        {
            digitalWrite(sleepPin,HIGH); //Ativa o driver drv8834 (ON/OFF)
        }
        for(long x = 0; x < 1600; x++)
        {
            if(digitalRead(bbutton) == HIGH)
            {
                digitalWrite(dirPin,HIGH); //Aciona o motor (CLOCKWISE)
                int SPEED = analogRead(A0);
                int RPM = SPEED;
                digitalWrite(stepPin,HIGH);
                delayMicroseconds(RPM);
                digitalWrite(stepPin,LOW);
                delayMicroseconds(RPM);
            }
        }
    }
    else if (digitalRead(fbutton) == HIGH)
    {
        digitalWrite(sleepPin,HIGH); //Ativa o driver drv8834 (ON/OFF)
    }
    for(long x = 0; x < 1600; x++)

```

```

{
  if(digitalRead(fbutton) == HIGH)
  {
    digitalWrite(dirPin,LOW); //Aciona o motor (COUNTERCLOCKWISE)
    int SPEED = analogRead(A0);
    int RPM = SPEED;
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(RPM);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(RPM);
  }
}
digitalWrite(sleepPin,LOW); //Desativa o driver drv8834(ON/OFF)
}

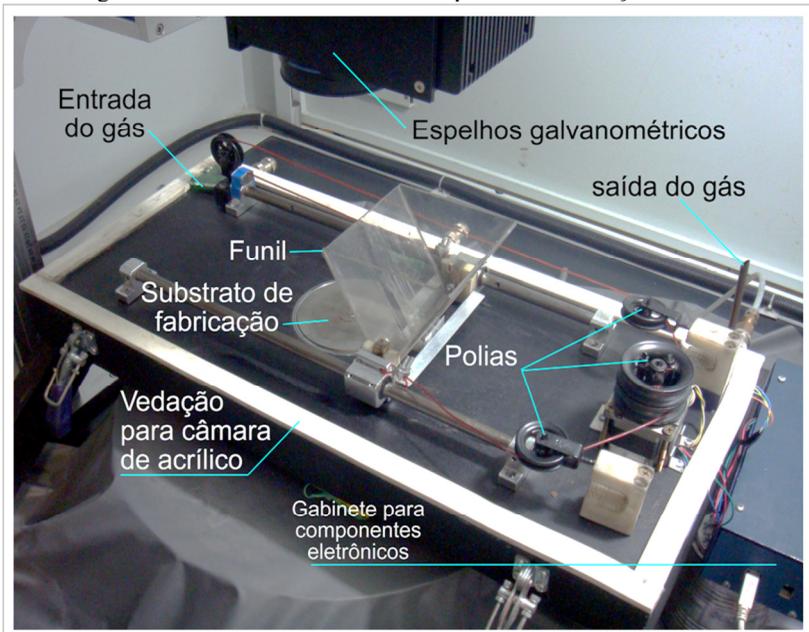
contF = millis();

}

```

A rotação do motor é convertida para movimento linear e também transmitida para o conjunto do funil por um sistema de polias. A Figura A.5 mostra a concepção do sistema apontando os principais componentes.

Figura A.5 – Sistema de transmissão para movimentação do funil.

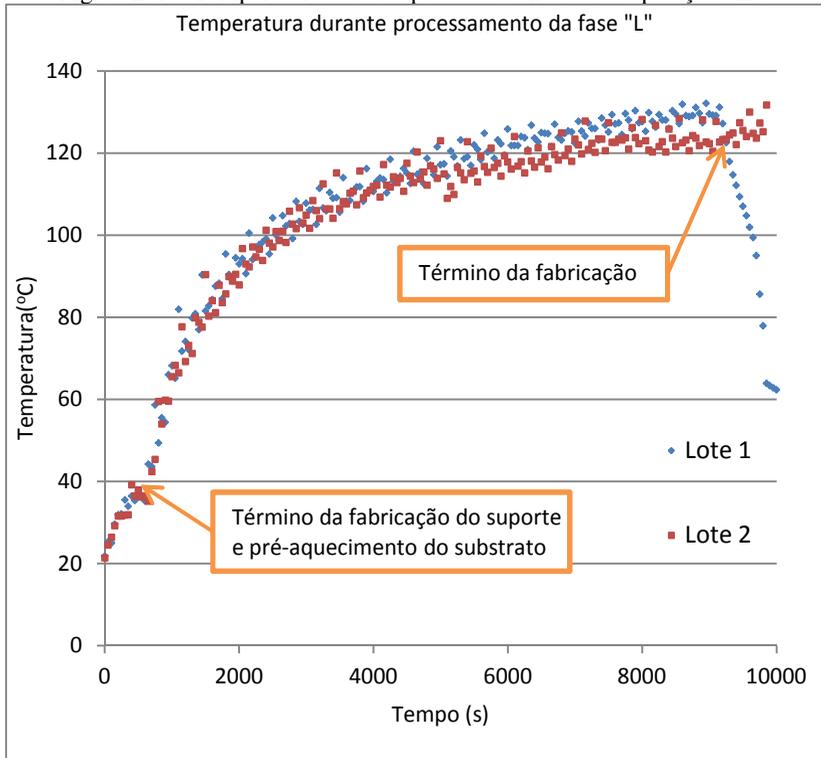


Fonte: Autor (2016).



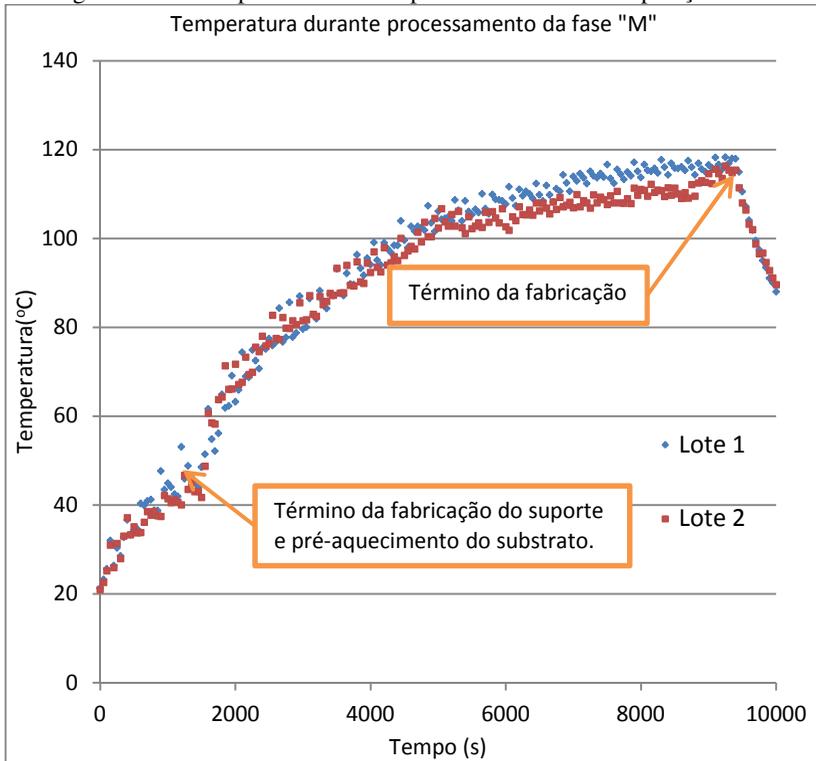
## APÊNDICE B – MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DA PARTE INFERIOR DOS SUBSTRATOS DE FABRICAÇÃO

Figura B.1 – Temperatura durante processamento da composição “L”.



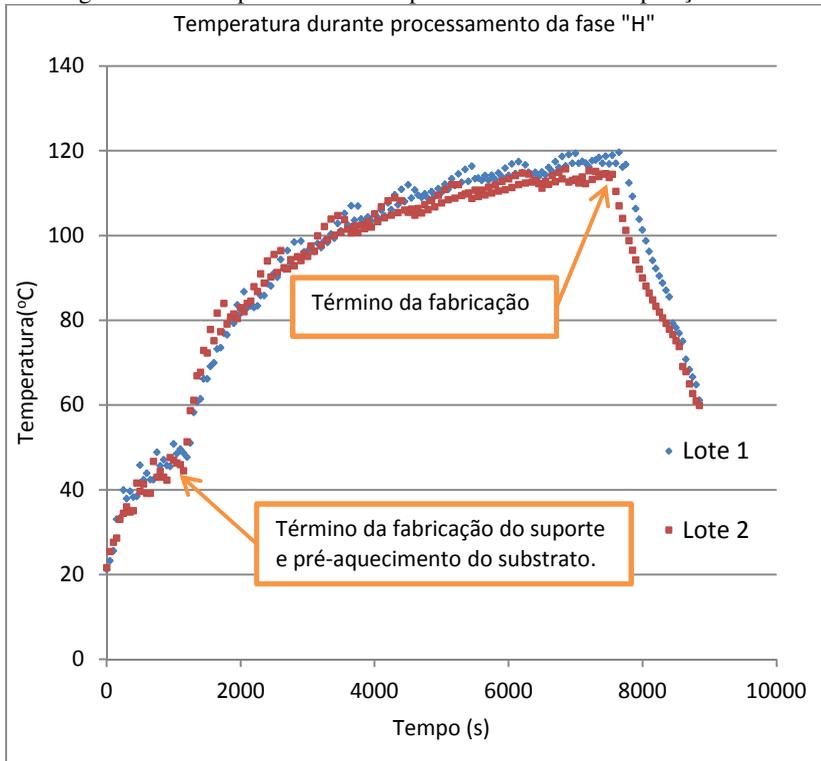
Fonte: Autor (2016).

Figura B.2 – Temperatura durante processamento da composição “M”.



Fonte: Autor (2016).

Figura B.3 – Temperatura durante processamento da composição “H”.



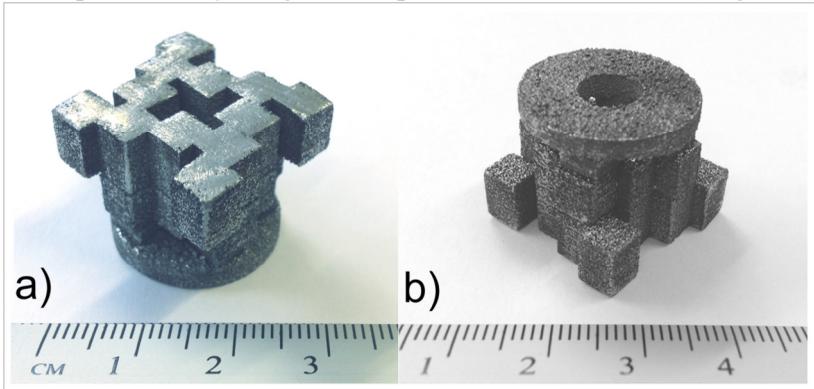
Fonte: Autor (2016).



## APÊNDICE C – FABRICAÇÃO DE PEÇA COMPLEXA COM GRADAÇÃO FUNCIONAL

A Figura C.1 mostra a peça de geometria complexa com gradação fabricada com parâmetros otimizados para cada composição do gradiente.

Figura C.1 – Peça complexa com gradiente funcional: a) base; b) topo.



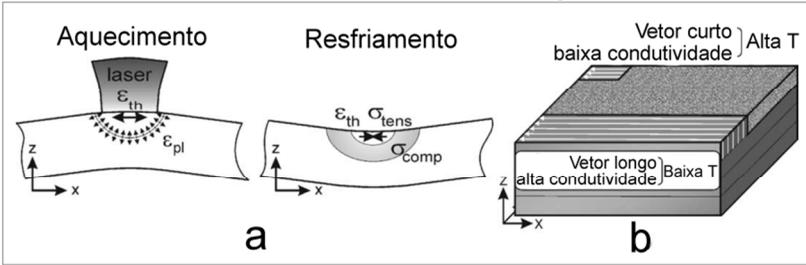
Fonte: Autor (2016).

Uma das características escolhidas para a peça foi sua maior dimensão, quando comparada com os corpos de prova produzidos nos experimentos anteriores.

Peças com maiores dimensões apresentam maior susceptibilidade ao empenamento que pode ser atribuído às linhas de solda com maiores comprimentos, necessárias para cobrir a maior área da peça proposta.

Linhas de solda maiores geram maior tensão de contração após a solidificação e acabam gerando as distorções (KRUTH et al., 2004). A figura C.2 mostra esquematicamente o mecanismo de empenamento.

Figura C.2 – a) Mecanismo de gradiente de temperaturas; b) Diferentes temperaturas através de vetores com comprimentos diferentes.



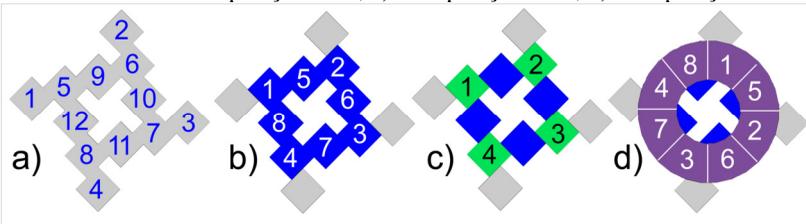
Fonte: Adaptado de KRUTH et al., (2004).

Uma solução é a utilização das estratégias de escaneamento xadrez ou ilhas, entretanto, o equipamento disponível não gera essa estratégia de preenchimento de maneira automática.

Para testar a viabilidade da fabricação da peça com uma estratégia de varredura similar, cada sessão da peça foi subdividida manualmente e cada pequeno quadrado foi processado de maneira separada, sempre no sentido horário.

Cada cor representa uma sessão diferente da peça e a numeração indica a ordem de processamento, a última sessão é circular e também foi dividida em pequenas partes, como mostra a Figura C.3.

Figura C.3 – Sessões da peça com geometria complexa: a) Composição “H”; b) Composição “M”; c) Composição “M”; d) Composição “L”.



Fonte: Autor: 2016.

O processamento da geometria dessa maneira confirmou as vantagens inerentes ao processamento com técnicas de varredura similares à xadrez ou ilhas no material produzido.

A peça não apresentou distorções ou empenamentos que prejudicassem o processo, provando viável a produção de uma peça com maiores dimensões quando comparada com os cubos produzidos como corpos de prova.