

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

LETÍCIA BUENO DO AMARAL

MANUFATURA ADITIVA DE CERÂMICAS POR PROJEÇÃO: PROJETO DE
MÁQUINA, FORMULAÇÃO DE SUSPENSÕES E PROCESSO.

São Carlos

2019



LETÍCIA BUENO DO AMARAL

MANUFATURA ADITIVA DE CERÂMICAS POR PROJEÇÃO: PROJETO DE
MÁQUINA, FORMULAÇÃO DE SUSPENSÕES E PROCESSO.

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto
Fortulan.

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA EESC-USP

São Carlos

2019

Class.	TESE
Cutt.	10.529
Tombo	T055 20
Sysno	2992651

31 100214436

16.03.20

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B485m	Bueno do Amaral, Leticia MANUFATURA ADITIVA DE CERÂMICAS POR PROJEÇÃO: PROJETO DE MÁQUINA, FORMULAÇÃO DE SUSPENSÕES E PROCESSO. / Leticia Bueno do Amaral; orientador Carlos Alberto Fortulan. São Carlos, 2019.
	Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto, Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.
	1. Impressão 3D. 2. Fotopolimerização em cuba. 3. Manufatura aditiva de cerâmicas. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **LETÍCIA BUENO DO AMARAL**.

Título da dissertação: "Manufatura aditiva de cerâmicas por projeção: projeto de máquina, formulação de suspensões e processo".

Data da defesa: 09/08/2019

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Carlos Alberto Fortulan (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Cesar Renato Foschini**
(Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

APROVADO

Prof. Dr. **Evaldo Malaquias da Silva**
(Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Carlos De Marqui Junior**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

EESC/USP

Serviço de Pós Graduação

Protocolado em 20.02.2020



*Onde há pensamento devem existir
especulação, fantasia, desejo e todos os
processos subjetivos envolvidos na
criatividade do pesquisador como sujeito.*

González-Rey (2005)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Ao Professor Dr. Carlos Alberto Fortulan, cuja orientação e experiências transmitidas se tornaram essenciais para concretização deste trabalho.

À minha família, que representa meu alicerce em qualquer empreitada.

À Tatiane que me recebeu em São Carlos com grande afeto e companheirismo.

Ao Marcionílio pelas palavras de apoio e encorajamento.

Ao Luiz Adalberto Penazzi pelo suporte técnico e importantes sugestões relativas ao projeto.

Ao Jorge, companheiro de projeto.

À EESC/USP e toda sua equipe de funcionários pela oportunidade e assistência.

RESUMO

AMARAL, L. B., **Manufatura aditiva de cerâmicas por projeção: projeto de máquina, formulação de suspensões e processo**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Neste trabalho é abordado o processo de manufatura aditiva de componentes cerâmicos com a aplicação da tecnologia de projeção em camadas (*mask projection stereolithography technology*). A impressão 3D (manufatura aditiva – AM) inicialmente voltada para produção de protótipos, vem revolucionando os processos convencionais de fabricação se colocando como um potencial na fabricação de materiais de engenharia acabados. A configuração que utiliza fotopolimerização em cuba com projeção de camada apresenta um processo de alta resolução dimensional e velocidade de impressão atrativo frente aos demais processos de AM, e tem potencial para manufatura de materiais cerâmicos. Esta técnica emprega formulações com resina fotopolimerizável supercarregada em pó cerâmico, assim quando o fotopolímero se polimeriza, ele constitui uma matriz que confere coesão ao corpo cerâmico verde, que em seguida é queimado decompondo e evaporando os componentes orgânicos e sinterizando as partículas cerâmicas. O objetivo deste trabalho é o estudo e o desenvolvimento de um processo de manufatura aditiva capaz de produzir objetos cerâmicos utilizando a tecnologia de projeção de camadas pelo princípio de fotopolimerização em cuba. Para isso, no desenvolvimento deste trabalho, foi construído um protótipo de impressora 3D com configuração de projeção por cima (*top down*), a elaboração de suspensões cerâmicas para suprimento da máquina, impressão das composições e ensaios mecânicos dos corpos fabricados. Obtiveram-se corpos cerâmicos, fabricados com zircônia 3Y-TZP, sem a presença de trincas críticas, bolhas, laminações e grandes deformações. Na suspensão que apresentou melhor desempenho empregaram-se os solventes: xilol que acrescentou significativa melhora na definição geométrica das peças; e n-metil-2-pirrolidona que conferiu viscosidade a pasta. Foi obtido um componente com retração linear de 36%, porosidade de 3,4% e resistência à flexão média de 337 ± 51 MPa.

Palavras-chave: Impressão 3D. Fotopolimerização em cuba. Manufatura aditiva de cerâmicas.

ABSTRACT

AMARAL, L. B., **Design of additive manufacturing machine of ceramic parts based on mask projection stereolithography technology** – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

The approach of this work is the additive manufacture of ceramic components by layer projection technology (mask projection stereolithography). 3D printing (additive manufacture - AM), initially developed to prototyping, has revolutionized conventional manufacturing processes and has placed itself as a potential manufacturer of finished engineering materials. The configuration that uses vat photopolymerization with layer projection presents a high dimensional resolution process and high print speed to the other AM processes, and has potential to manufacture ceramic materials. This technique uses formulations with a loaded photopolymerizable resin in ceramic powder, this way when polymerized, the photopolymer constitutes a matrix that confers cohesion to the green ceramic body, then, by evaporating the organic components and agglutinating the ceramic particles, this body is sintered. This work development process includes the construction of a 3D printer prototype with a top down projection configuration, the ceramic suspensions formulations for machine supply, manufacture of ceramic parts and mechanical testing. Ceramic bodies, made with 3Y-TZP zirconia, were obtained without the presence of critical cracks, bubbles, laminations and large deformations. From the best suspension developed, it was employed the xylol solvent (which significantly added an improvement in the geometric definition of the pieces) and n-methyl-2-pyrrolidone solvent (that guaranteed the paste viscosity). This ceramic parts show a linear retraction of 36%, porosity ratio of 3.4% and average flexural strength of 337 ± 51 MPa.

Keywords: 3D printing. Vat photopolymerization. Ceramics additive manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de projeto de Pahl e Beitz de 1996	18
Figura 2 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto de acordo com a diretrizes da VDI	19
Figura 3 – Processo de desenvolvimento integrado de produto (PRODIP)	20
Figura 4 - Esquematização das diferentes configurações de manufatura aditiva por fotopolimerização	25
Figura 5 –Funcionamento do DLP com o emprego do <i>chip</i> DMD	27
Figura 6 - Tipos de configurações de impressoras DLP's segundo a posição do projetor de imagens	27
Figura 7 – Representação de um sistema de impressão 3D com tecnologia CLIP	28
Figura 8 – Representação química do processo de fotopolimerização	29
Figura 9 – Esquema da reação de quebra da cadeia do fotoiniciador pela luz ultravioleta e polimerização subsequente de 1,6-Hexanodiol Diacrilato	30
Figura 10 - Procedimento adotado no planejamento do projeto	35
Figura 11 - Diagrama lógico da função global do produto em desenvolvimento	37
Figura 12 - Esboço inicial da máquina de manufatura aditiva	38
Figura 13 - Diagrama de blocos dos subsistemas adotados na máquina de manufatura aditiva	38
Figura 14 - Desenho esquemático de um pixel do DMD	39
Figura 15 - Componentes óticos de um projetor DLP®	40
Figura 16 - Esquematização do sistema de projeção de imagem	41
Figura 17 – Croqui da ideia inicial para a máquina de manufatura aditiva	42
Figura 18 - Croquis das máquinas de manufatura aditiva com sistema de alimentação de material com o movimento vertical da base de construção	42
Figura 19 - Sistema de alimentação de material proposto	43
Figura 20 - Diagrama de blocos do sistema de controle da máquina de manufatura aditiva	44
Figura 21 - Desenho tridimensional do protótipo	46
Figura 22 - Protótipo construído da máquina de manufatura aditiva	47
Figura 23 - Conjunto cuba/plataforma de construção do protótipo em maior detalhe	47
Figura 24 – Desenho da peça manufaturada no protótipo para teste	48

Figura 25 – Primeiras peças fabricadas apresentando a evolução com o ajuste dos parâmetros de construção das camadas.	49
Figura 26 – Peças com impressão de apenas uma camada mostrando o espalhamento da polimerização com o aumento do tempo de exposição a luz	49
Figura 27 – Peças fabricadas com resina LS 600	50
Figura 28 - Micrografia com ampliação de 1000x da amostra de cerâmica com formulação A	52
Figura 29 - Micrografia de amostras de cerâmica com ampliação de 119x utilizando como solvente: (a) n-metil-2-pirrolidona e (b) álcool isopropílico	53
Figura 30 - Processo de manufatura aditiva com suspensão cerâmica	54
Figura 31 – Primeira peça verde de cerâmica manufaturada.....	55
Figura 32 – Esquematização da morfologia do componente cerâmico fabricado	55
Figura 33 – Aspecto do componente cerâmico após sinterização	55
Figura 34 – Componente fabricado apresentando escorregamento de camadas	56
Figura 35 - Modificação do protótipo da máquina de manufatura aditiva	57
Figura 36 – Etapas do processo de manufatura aditiva de cerâmica com espalhamento manual	57
Figura 37 – Primeiros componentes cerâmicos fabricados sem o filtro UV no projetor de imagens	58
Figura 38 – Componentes de zircônia processados com manufatura aditiva.....	59
Figura 39 - Esquematização da estufa de secagem sob pressão	60
Figura 40 – Componentes cerâmicos fabricados utilizando suspensão cerâmicas com acréscimo de ácido esteárico e o xilol.	60
Figura 41 – Conjunto empregado para medição da porosidade	62
Figura 42 – Componentes de zircônia fabricados com manufatura aditiva.....	63
Figura 43 - Ensaio de flexão de componentes cerâmicos fabricados com manufatura aditiva	64
Figura 44 – Corpos de prova utilizados no ensaio de flexão	64
Figura 45 – Conjunto do mecanismo de movimentação da plataforma de construção do projeto final	66
Figura 46 – Projeto final da máquina de manufatura aditiva.....	67
Figura 47 – Vista em perspectiva do projeto final da máquina de manufatura aditiva com detalhes dos seus principais componentes.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorias e tecnologias de manufatura aditiva	23
Tabela 4.1 - Componentes da Zircônia 3Y-TZ.....	51
Tabela 4.2 - Concentrações de algumas amostras inicialmente preparadas.	52
Tabela 4.3 – Concentrações das primeiras amostras testadas sem o filtro UV no projetor de imagens	59
Tabela 4.4 – Concentrações das amostras elaboradas testando a concentração de xilol e ácido esteárico	61
Tabela 4.5 – Dados colhidos do ensaio de flexão.....	65

LISTA DE SIGLAS

3D	Tridimensional
ABS	Acryonitrile Butadiene Styrene
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing Format
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CLI	Common Layer Interface
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
CPU	Unidade Central de Processamento
DED	Directed Energy Deposition
DLF	Directed Light Fabrication
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Micromirror Device
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FDM	Fused Deposition Modeling
FTI	Film Transfer Imaging
LBMD	Laser Been Metal Deposition
LCD	Liquid Crystal Display
LCM	Lithography-based ceramic manufacturing
LEM	Laser Engineered Net Shaping
LFF	Laser Freeform Fabrication
LTC	Laboratório de Tribologia e Compositos
MEHQ	Metil etil-hidroquinona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PBF	Powder Bed Fusion
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PEEK	Polyetheretherketone
PEI	Polyetherimide
PLA	Polylactic Acid

PRODIP	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto
SL/SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography
UV	Ultravioleta
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

LISTA DE SÍMOLOS

mm	Milímetros
μm	Micrometros
nm	Nanometros
m^2/g	Metros cuadrados por grama
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
h	Horas
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
g	Gramas
ml	Mililitros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	METODOLOGIA DE PROJETO	17
2.1.1	Projeto Informacional	21
2.1.2	Projeto Conceitual	21
2.1.3	Projeto Preliminar	21
2.1.4	Projeto Detalhado	21
2.2	MANUFATURA ADITIVA.....	22
2.2.1	Arquivo STL.....	24
2.2.2	Fotopolimerização em Cuba (Vat Photopolymerization)	24
2.2.2.1	<i>Tecnologia de Projeção de Camadas</i>	26
2.3	FOTOPOLIMERIZAÇÃO E FOTOPOLÍMEROS.....	28
2.4	CERÂMICAS PROCESSADAS POR MANUFATURA ADITIVA	31
2.5	ZIRCÔNIA	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO	35
3.2	PROJETO INFORMACIONAL	36
3.3	PROJETO CONCEITUAL	36
3.3.1	Projeção de luz	39
3.3.2	Sistema de suprimento de material	41
3.3.3	Movimentação da Plataforma	43
3.3.4	Sistema de Controle	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	PROJETO PRELIMINAR.....	45
4.1.1	Projeto e Construção do Protótipo	45

4.1.2	Validação do Protótipo	48
4.1.3	Ensaio das Suspensões Cerâmicas	50
4.1.4	Processamento dos Corpos Cerâmicos	53
4.1.5	Caracterização das Amostras	61
4.1.5.1	<i>Densidade</i>	61
4.1.5.2	<i>Análise da microestrutura do material com MEV</i>	63
4.1.5.3	<i>Ensaio de Flexão</i>	64
4.2	PROJETO DETALHADO	65
5	CONCLUSÃO	69
5.1	TRABALHOS FUTUROS	69
6	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (AM – *additive manufacturing*), também conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida está sendo cada vez mais reconhecida como uma abordagem de manufatura viável e econômica. De forma que tem sido largamente utilizada, não apenas para protótipos, mas também para componentes finais, em um esforço para reduzir os requisitos de ferramentas, ou para produzir peças com maior complexidade (FUJISHIMA et al., 2017). Isso se deve ao processo de manufatura que difere dos processos de fabricação tradicionais tendo como base a adição de material camada por camada.

Manufatura aditiva é o termo técnico adotado pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para definir o processo de fabricação que produz componentes tridimensionais (3D) diretamente de um modelo de projeto auxiliado por computador (CAD) em um processo aditivo pela montagem sequencial das camadas individuais do objeto. Dessa forma, o processo de fabricação por manufatura aditiva ocorre por etapas. Primeiramente é obtida ou criada uma imagem computacional em 3D do componente, esta é convertida no formato STL (*stereolithography*) para ser fatiada gerando-se imagens seccionais de cada camada. Então, as camadas são construídas uma a uma iniciando por um suporte ou camada de adesão na plataforma, seguindo-se a construção das camadas subsequentes.

A construção das camadas de material no processo de manufatura aditiva pode ser feita por diferentes maneiras dependendo da tecnologia empregada. Por exemplo, por deposição de material fundido, ou utilizando a projeção de uma imagem na superfície de uma resina fotopolimerizável, e até mesmo sinterizando uma camada de pó com um feixe de energia, além de outros princípios. A última etapa é o pós-processamento que pode ser uma limpeza ou ainda um processo adicional de reforço estrutural e ou de acabamento.

Atualmente existem diversificados equipamentos de manufatura aditiva que empregam diferentes métodos de construção do objeto e cada qual capaz de processar uma gama de diferentes materiais. Em função deste conjunto de tecnologias a AM se destaca como um potencial para revolucionar a indústria convencional em função das possibilidades de novas estratégias de produção. Por exemplo, estas tecnologias juntas ampliam oportunidades e aplicações sejam no campo de engenharia de processos ou de projetos heterogêneos; isso se deve à vasta extensão de funcionalidades, às possibilidades de se fabricar geometrias complexas empregando apenas um equipamento e à viabilidade de empregar variadas classes de materiais e/ou a combinação de um ou mais materiais. Os estudos e o desenvolvimento dos processos de

fabricação para produtos individuais por AM, também, são motivados pela redução do prazo entre projeto, teste e implementação (ZOCCA et al., 2015).

Sendo assim, a manufatura aditiva poderá transformar os setores da economia, e por isso muitas empresas têm investido neste tipo de tecnologia. “Segundo o relatório *O Futuro do Trabalho* - 2018, do Fórum Econômico Mundial, 49% das empresas brasileiras, de áreas diferentes, pretendem investir nas três dimensões até 2022 e, de acordo com um estudo do banco americano Goldman Sachs, essa é uma das oito tecnologias que vão mudar os negócios” (AMARO, 2019).

Logo, é cada vez maior a necessidade de usar eficientemente as tecnologias de AM para obter detalhes precisos, peças de alta resistência com menor desvio dimensional e qualidade de superfície adequada. Então, se torna fundamental a otimização de parâmetros efetivos no processo de manufatura aditiva, levando a pesquisa sobre o desenvolvimento deste processo a entrar em uma nova etapa, de forma que o esforço seja significativamente aumentado para a otimização do processo e sua utilidade em novos campos (VAEZI; CHUA, 2011).

Neste contexto, a AM de cerâmica tem o potencial de abrir novos mercados para produtos cerâmicos, pois não está estritamente vinculado aos paradigmas do processamento da cerâmica, como alto custo de processamento para pequenas produções, baixa flexibilidade, usinagem complexa e tecnologias limitadas de moldagem (ZOCCA et al., 2015). Apesar de que muitos métodos para fabricar produtos cerâmicos em 3D sem utilização de moldes ou ferramentas terem sido desenvolvidos ao longo de vários anos, por exemplo, a sinterização seletiva a laser, jateamento de aglutinante e modelagem por deposição fundida, a pesquisa no campo das técnicas de processo e aplicações para a fabricação de peças de materiais cerâmicos com manufatura aditiva ainda é necessária, pois são exigidas melhorias no processo para aumentar a qualidade do produto e ampliar as suas funcionalidades.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral o estudo e o desenvolvimento de um processo de manufatura aditiva capaz de produzir objetos cerâmicos utilizando a tecnologia de projeção de camadas pelo princípio de fotopolimerização em cuba. Para atingir este propósito foram definidos objetivos específicos, a saber:

- Projeto de uma máquina de manufatura aditiva com tecnologia pelo processo de luz digital (DLP) específica para produção de peças de material cerâmico;

- Montagem de um protótipo para impressão de corpos de prova e obtenção de parâmetros de projeto;
- Desenvolvimento de formulações com resinas fotopolimerizáveis supercarregada em pó cerâmico formado uma pasta, com propósito de validar o método e o projeto;
- Caracterização e avaliação dos corpos de prova impressos e sinterizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados de forma descritiva os principais temas que englobaram o estudo deste trabalho para contextualizar o projeto desenvolvido. Primeiramente foi feito um estudo sobre metodologias de projeto para se desenvolver o planejamento do projeto. Em seguida foi apresentado um tópico sobre manufatura aditiva enfatizando o tipo de processo empregado neste trabalho. Sequencialmente foi abordado um estudo sobre resinas fotopolimerizáveis e a fotopolimerização propriamente dita para entendermos melhor manufatura por meio desse recurso. Também foram descritos os processos de manufatura aditiva utilizados na produção de materiais cerâmicos e por fim, um tópico dedicado a zircônia enfatizando seu processamento e aplicação de forma a elucidar a utilidade do estudo com este material.

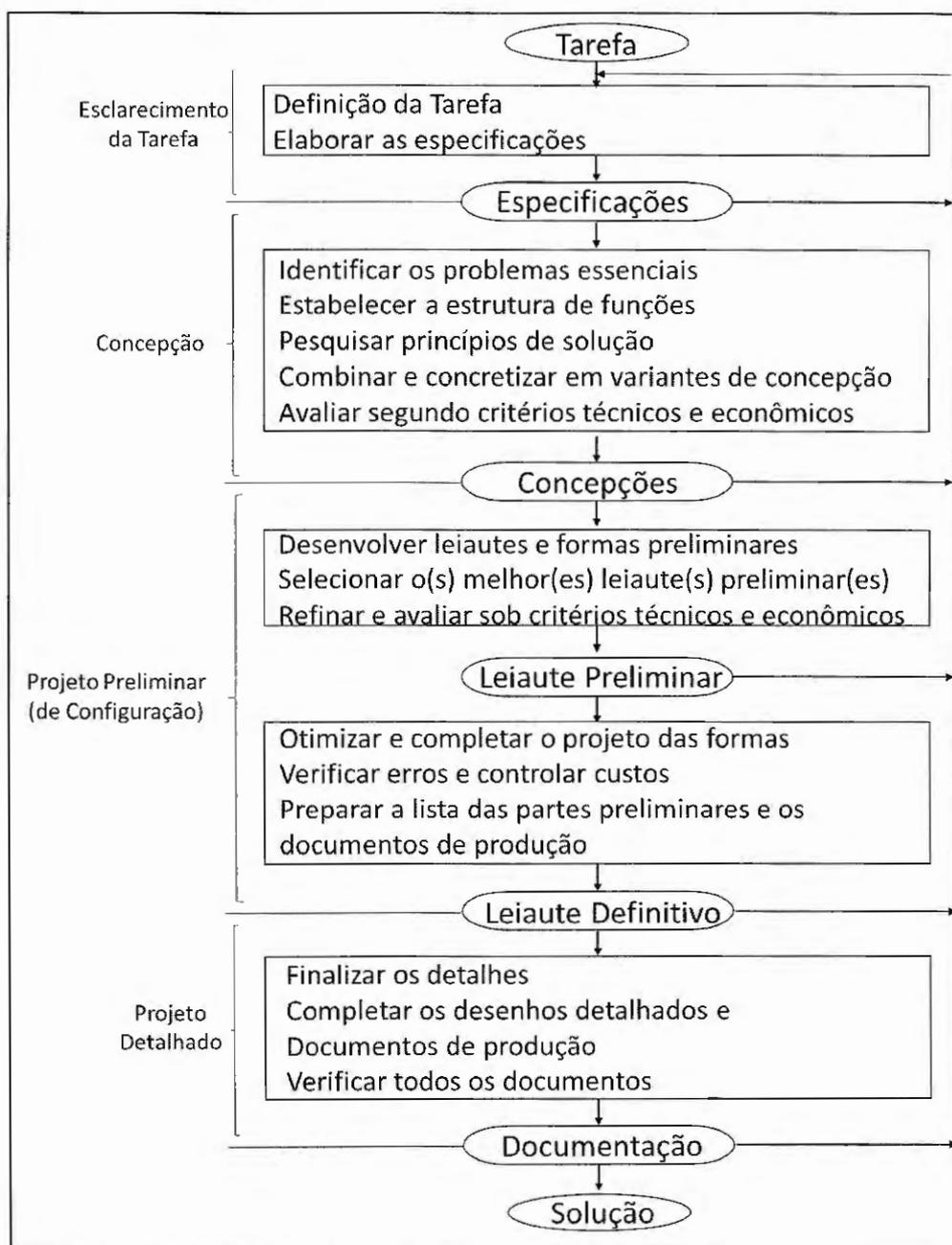
2.1 METODOLOGIA DE PROJETO

A concepção de um projeto de engenharia requer uma abrangência de conceitos, científicos e tecnológicos, além de ser condicionada pela experiência do projetista, por isso o desenvolvimento de um projeto é uma atividade complexa e exige a implantação de várias etapas interativas, desde a concepção até a execução, que orientam o processo de elaboração deste. Pahl et al. (2005) descreveram a metodologia de projeto como um procedimento planejado com indicações concretas de condutas a serem observadas no desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos.

Um dos modelos mais simples e mais rígidos de metodologia de projeto é composto por três etapas: primeiramente o estágio de geração em que o projetista propõe vários conceitos não específicos; em seguida o estágio da avaliação, no qual os conceitos gerados são testados em relação aos objetivos, às restrições e aos critérios estabelecidos pelo cliente e pelo engenheiro projetista; e por último o estágio da comunicação em que o projeto é levado para ser manufaturado (DYM, 1995).

Devido a diversos fatores como o avanço tecnológico, a multidisciplinaridade e a necessidade de inovação o desenvolvimento de um conjunto de prescrições mais detalhado e formalizado tornou-se relevante, de forma que há diversas estruturas e metodologias prescritivas de projeto definidas na literatura. Back et al. (2008) citaram a conceituada metodologia de Pahl e Beitz de 1996 que sugere a sistematização do desenvolvimento do projeto no processo mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Processo de projeto de Pahl e Beitz de 1996

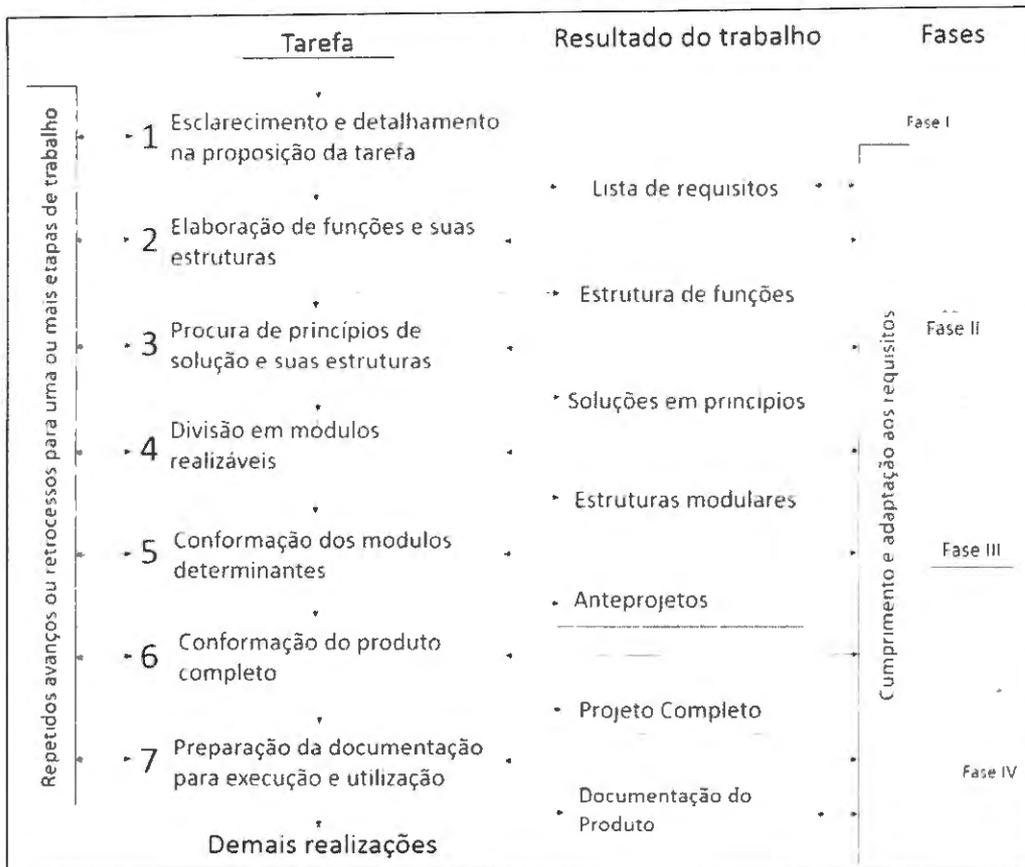


Fonte: Back et al. (2008).

Outro exemplo é o processo com uma série de diretrizes da sociedade alemã de engenheiros profissionais, intitulada VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*) que é um método popularmente reconhecido na atualidade. A essência desse procedimento é a avaliação de variantes da configuração elaboradas com base em critérios de avaliações técnicos e

econômicos (PAHL et al., 2005). A Figura 2 mostra os setes passos de trabalho básico definido nas diretrizes VDI.

Figura 2 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto de acordo com a diretrizes da VDI



Fonte: Pahl et al. (2005).

As diretrizes de elaboração de projeto da VDI são compostas por quatro fases nas quais são descritos os passos de trabalhado de modo que cada passo leva a um resultado específico sendo este resultado uma variável de entrada para a próxima etapa. Além disso, cada variável pode ser modificada, caso o processo subsequente exija desta variável diferentes aspectos não antes definidos, e assim realimentando o processo possibilitando a melhoria aperfeiçoada do projeto.

O processo apresentado nas diretrizes VDI, diferente de outras metodologias que apresentam fases sequenciais, sobrepõe as fases do projeto indicando que as tarefas podem ser realizadas de forma simultânea. Isso possibilita uma integração mais clara dos conhecimentos necessários para a elaboração do produto, facilidade de transferência de informações entre as fases do desenvolvimento e agilidade para identificar as alterações necessárias no processo.

As estruturas apresentadas propõem procedimentos gerais que podem ser aplicados a uma ampla gama de projetos. Pahl et al. (2005) esclarecem que como a evolução do processo de projeto foi estruturada de forma grosseira isso permite uma diversidade de variantes do procedimento especificadas para o produto ou para a empresa em questão. Assim, cada equipamento ou máquina pode apresentar um procedimento distinto no desenvolvimento do seu projeto sendo as tarefas do processo especificadas de acordo com o contexto em que o produto deve ser desenvolvido e produzido.

A observância da orientação metódica do projeto expõe a existência de afinidades entre os diferentes processos e conceitos. Back et al. (2008) descreveram um modelo de referência, o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto (PRODIP), Figura 3, que destaca oito fases: Planejamento de Projeto, Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado, Preparação da Produção, Lançamento e Validação. Esse processo apresenta semelhanças ao modelo de Pahl e Beitz mostrado na Figura 1. Nesse modelo além de possuir fases iguais ao PRODIP a fase de Esclarecimento da Tarefa pode ser relacionada à fase de Projeto Informacional do modelo de referência.

Figura 3 – Processo de desenvolvimento integrado de produto (PRODIP)



Fonte: Adaptado de BACK et al. (2008).

Um modelo análogo ao da Figura 3 é apresentado por Rozenfeld et al. (2006) que descreve um processo de desenvolvimento de produto (PDP) voltado para empresas de manufatura de bens de consumo duráveis e de capital, contudo o modelo de Rozenfeld não apresenta as fases de Projeto Preliminar e de Validação.

Então, desdobrando uma estrutura básica generalizada que agrupam atividades e tarefas similares observadas nas metodologias de projeto existentes obtêm-se quatro etapas: Projeto Informacional; Projeto Conceitual; Projeto Preliminar e Projeto Detalhado.

2.1.1 Projeto Informacional

Consiste no estudo do contexto em que o projeto deve ser desenvolvido. Inclui atividades como reconhecimento da necessidade, obtenções de informações gerais de mercado e definição do problema, que conduzem à análise da viabilidade do projeto, bem como à definição dos requisitos e dos recursos necessários.

2.1.2 Projeto Conceitual

Nesta fase as atividades são voltadas para a busca, criação, representação e seleção de soluções (ROZENFELD et al., 2006). Então, é elaborada, uma estrutura do equipamento projetado, estudando seus principais sistemas e a interação entre eles. Assim é possível identificar soluções para a função de cada sistema observando os objetivos a serem atingidos e as restrições existentes no sistema. A partir disso é possível selecionar as melhores opções bem como a ótima forma como os sistemas devem ser dispostos levando em consideração a viabilidade técnica, as condicionantes fixadas pelo problema, os custos de cada solução, e sua facilidade de construção.

2.1.3 Projeto Preliminar

Durante o projeto preliminar busca-se a melhor solução com análises de sensibilidade, compatibilidade e estabilidade, procurando otimização formal, realizando projeções futuras da revisão do comportamento do sistema e fazendo a verificação final da concepção do projeto (BACK et al., 2008).

2.1.4 Projeto Detalhado

Nesta fase ocorre a descrição de engenharia do projeto viável e conferido realizando o projeto geral dos subsistemas, o projeto geral dos componentes, a preparação dos desenhos de montagem, a construção experimental e testes do protótipo, a análise e revisão (BACK et al., 2008).

2.2 MANUFATURA ADITIVA

O órgão de normatização ASTM oficializou o termo “manufatura aditiva” para definir os processos de fabricação de objetos com a união de materiais a partir de dados de modelos 3D computacionais, geralmente adicionados camada sobre camada, ao contrário de metodologias de fabricação subtrativas.

De forma geral, os processos de impressão 3D ocorrem em 8 etapas: primeiramente é desenvolvida ou obtida uma representação 3D sólida em *software* da peça a ser fabricada; em seguida esse modelo é convertido para o formato STL; o arquivo STL é transferido para uma máquina de manufatura aditiva; sucedendo deve ser configurado na máquina os parâmetros de construção; então ocorre o processo de construção seguindo a remoção das peças na máquina; e uma vez removidas as peças podem precisar de um pós-processamento, como limpeza ou aquecimento em estufa para o término de cura do material; e por fim as peças estão prontas para uso (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Diversas tecnologias de impressoras 3D foram desenvolvidas possibilitando a produção de componentes dos mais variados formatos e em diferentes materiais. Os variados processos de manufatura aditiva se diferem, em geral, pelos princípios de construção da camada. As tecnologias de AM podem ser classificadas segundo seu princípio físico/químico de funcionamento; são elas:

- Fotopolimerização em cuba que emprega polímero fotossensível líquido sendo curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por radiação;
- Extrusão de material onde o material fundido é extrudado através de um bico ou orifício e depositado formando a camada;
- Jateamento de material: ocorre com o material sendo depositado em pequenas gotas;
- Jateamento de aglutinante: um agente aglutinante líquido é depositado para unir materiais em pó;
- Fusão de leito de pó: é usado um feixe de energia térmica para fundir seletivamente regiões de um leito de pó;
- Adição de lâminas: são recortadas lâminas de material para serem unidas (aderidas) formando um objeto;
- Deposição com energia direcionada: usa energia térmica para fundir materiais à medida que estes são depositados (VOLPATO et al., 2017).

A Tabela 2.1 apresenta os princípios de manufatura aditiva desenvolvidos mostrando exemplos de tecnologias existentes para cada princípio e as classes de materiais que podem ser fabricados por cada tipo de tecnologia.

Tabela 2.1 – Categorias e tecnologias de manufatura aditiva

Princípios Físicos Empregados	Tecnologias na Categoria	Materiais Produzidos
Fotopolimerização em cuba	Estereolitografia (<i>Stereolithography – SL</i>)	Polímeros Cerâmicas
	Processo de Luz Digital (<i>Digital Light Process – DLP</i>)	
Extrusão de material	Modelagem por fusão e deposição (<i>Fused Deposition Modeling – FDM</i>)	Polímeros Chocolate Compósitos
Jateamento de material	<i>Drop on Demand – DOD</i>	Polímeros Cera Cerâmicas Metal
	<i>NanoParticle Jetting – NPJ</i>	
	<i>Liquid Metal Jetting – LMJ</i>	
Jateamento de aglutinante	Impressão colorida por jato (<i>ColorJet Printing – CJP</i>)	Gesso Cerâmicas Polímeros Metal Compósitos
Fusão de leito de pó	Sinterização seletiva a laser (<i>selective laser sintering – SLS</i>)	Polímeros Metais Cerâmicas Compósitos
	Sinterização direta de metal a laser (<i>direct metal laser sintering – DMLS</i>)	
	Fusão seletiva a laser (<i>selective laser melting – SLM</i>)	
	Fusão por feixe de elétrons (<i>electron beam melting – EBM</i>)	
Adição de lâminas	Manufatura laminar de objetos (<i>laminated object manufacturing – LOM</i>)	Compósitos Papel
	Deposição seletiva de laminados (<i>selective deposition lamination – SDL</i>)	
Deposição com energia direcionada	Forma final obtida com laser (<i>laser engineered net shaping – LENS</i>)	Metal
	Deposição direta de metal (<i>direct metal deposition – DMD</i>)	
	<i>Laser Metal Deposition – LMD</i>	

Fonte: o Autor.

2.2.1 Arquivo STL

As máquinas de manufatura aditiva dependem de um modelo geométrico tridimensional da peça para ser fabricada. O formato mais empregado atualmente é o STL (*stereolithography*) embora existam outras representações que possam ser empregadas como CLI (*Common Layer Interface* – Interface Comum de Camadas) ou AMF (*Additive Manufacturing Format* – Formato de Manufatura Aditiva) entre outros (VOLPATO et al., 2017).

O arquivo STL consiste em converter a superfície do sólido em uma face formada de pequenos triângulos; cada face destes triângulos delimita o interior e o exterior do sólido, e estas faces são identificadas por um vetor normal unitário e três vértices. Quanto menor for a dimensão dos triângulos, maior precisão na representação do sólido e próximo da realidade, porém, maior será a necessidade de recursos computacionais (GARDAN, 2016).

2.2.2 Fotopolimerização em Cuba (Vat Photopolymerization)

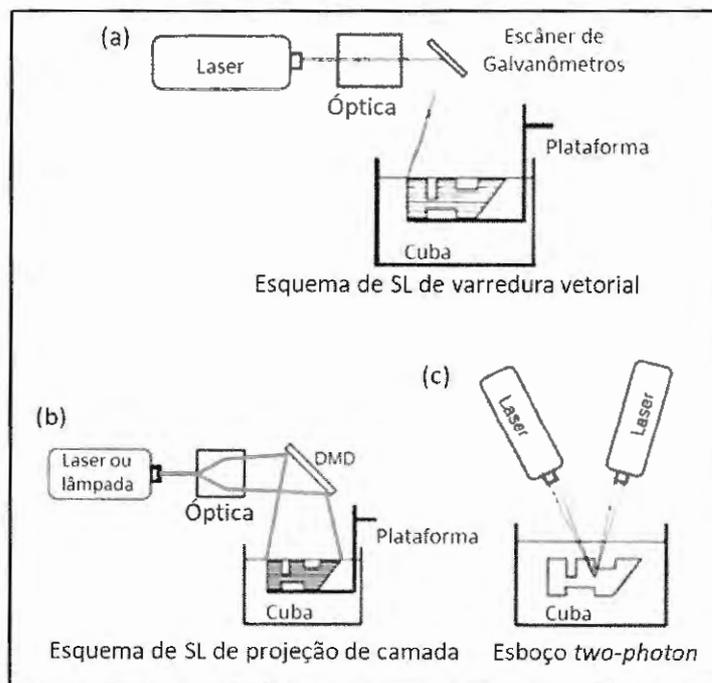
Matsubara, da Mitsubishi Motors, propôs, nos anos 70, um método de construção de um componente a partir de uma resina fotopolimerizável. Essa resina era suspensa com partículas refratárias e exposta à luz de uma lâmpada de vapor de mercúrio de forma seletivamente projetada assim ocorria o endurecimento de uma determinada região. As finas camadas formadas eram sobrepostas sequencialmente formando o componente desejado (VOLPATO et al., 2017) originando, assim, o processo de impressão 3D por fotopolimerização em cuba. Atualmente, esse processo produz protótipos pela aplicação de resinas líquidas curáveis por radiação (fotopolímeros), geralmente radiação na faixa ultravioleta (UV). A cura por radiação ocorre com a reação química chamada de fotopolimerização.

As resinas foto-curáveis podem ser polimerizadas por vários tipos de radiação como raios gama, raios-X, feixes de elétrons, radiação ultravioleta e luz visível. Devido a isto, existem vários arranjos do processo de fotopolimerização em cuba. Gibson et al (2015) explicam que há três configurações, mostradas na Figura 4, desenvolvidas para o processo de fotopolimerização: a de varredura vetorial (*vector scan*), ou ponto-ponto, que é uma abordagem típica das máquinas de estereolitografia (*Stereolithography* – SL ou SLA); a de projeção de camadas (*mask projection*), abordagem que utiliza um grande feixe de radiação modelado por um dispositivo que reflete o feixe sobre a superfície da resina; e *two-photons* que ocorre com a interseção de dois raios laser de varredura, embora em alguns equipamentos dessa configuração

utilizem um único laser porém com monômeros fotoiniciadores quimicamente diferentes, neste processo, a peça é fabricada abaixo da superfície de resina como mostra o esquema da Figura 4(c).

A SL foi o primeiro sistema comercial de AM, desenvolvido em 1884 por Charles Hull, que fundou a *3D System Corporation* em 1986. O seu processo inicia quando a plataforma de construção é abaixada a partir do topo do tanque com fotopolímero por uma espessura de camada. Em seguida, uma porção do componente é criado com a varredura de um laser traçando o contorno da camada de forma que o laser cura seletivamente a resina, convertendo-a em uma fina camada de material sólido. Posteriormente, a plataforma é abaixada novamente e a superfície é recoberta por resina líquida, e então o laser começa a traçar a próxima fatia e uma nova camada é construída no topo da anterior e assim sucessivamente (CALIGNANO et al., 2017).

Figura 4 - Esquematização das diferentes configurações de manufatura aditiva por fotopolimerização



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2015).

Nos anos 90 os pesquisadores desenvolveram máquinas que possibilitam a criação uma secção transversal inteira, assim, surgiu o processo de projeção de camada (*mask projection stereolithography technology*) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

2.2.2.1 Tecnologia de Projeção de Camadas

Para reduzir o *lead time* (período entre início e término das atividades necessária para execução de um projeto/produto) e aumentar a velocidade de construção, surgiu uma nova tecnologia derivada da SLA, o sistema de fotocamadas conhecido como tecnologia de projeção de camadas (*mask projection*) ou ainda o processo de luz digital (DLP - *Digital Light Processing*). Há também um processo similar chamado de transferência de filme por imagem (FTI - *Film Transfer Imaging*) (GARDAN, 2016). Essa tecnologia utiliza um projetor capaz de gerar uma imagem em 2D que é iluminada sobre uma camada de fotopolímero para criar um filme solidificado.

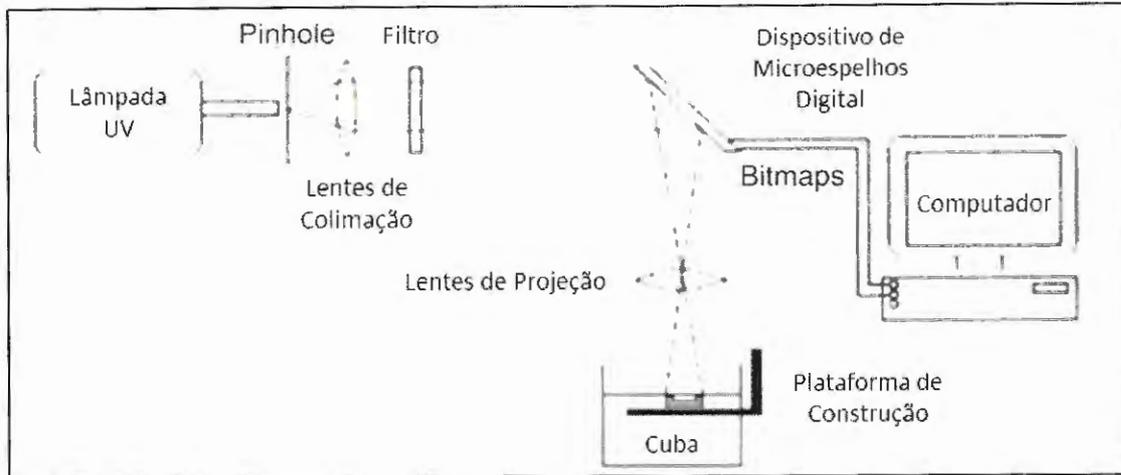
O método de projeção de camada é mais rápido do que a digitalização de um feixe de laser, as SL's, em consequência de uma seção transversal inteira poder ser curada de uma só vez. A projeção da imagem da camada pode feita por telas LCD, por moduladores de luz espacial, ou por DMDs (*Digital Micromirror Device*), como os *chips* de Processamento de Luz Digital (DLP™) fabricados pela Texas Instruments (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A técnica com LCD tem algumas desvantagens como as grandes dimensões dos pixels, a baixa taxa de preenchimento impedindo que o dispositivo seja mais compactado e a baixa densidade óptica dos elementos de refração (SUN et al., 2005). Por isso, uma tecnologia alternativa mais satisfatória é o dispositivo digital de microespelhos (DMD) muito empregada atualmente nas DLP's comerciais.

Um DMD é um dispositivo de sistema microeletromecânico que permite o controle de cerca de 1 milhão de pequenos espelhos que ligam ou desligam um pixel a mais de 5 KHz. Usando essa tecnologia, um dispositivo de projeção de luz pode projetar uma imagem de uma camada definida dinamicamente em uma superfície de resina para curar seletivamente a resina líquida nas fatias do objeto (PAN; ZHOU; CHEN, 2012).

O processo com o emprego do *chip* DMD inicia com o modelo tridimensional sendo cortado em uma série de planos horizontais próximos e, então, os padrões de camadas fatiadas no formato eletrônico são dinamicamente gerados como imagens de bitmap em uma matriz programável por computador pelos microespelhos digitais do *chip* DMD. A luz iluminada no *chip* DMD é moldada de acordo com o padrão definido da camada e, em seguida, a luz modulada é transferida através de uma lente de projeção. Assim, uma imagem é exposta na superfície da resina fotopolimerizável que é então curada (SUN et al., 2005). Este processo pode ser visto no esquema da Figura 5.

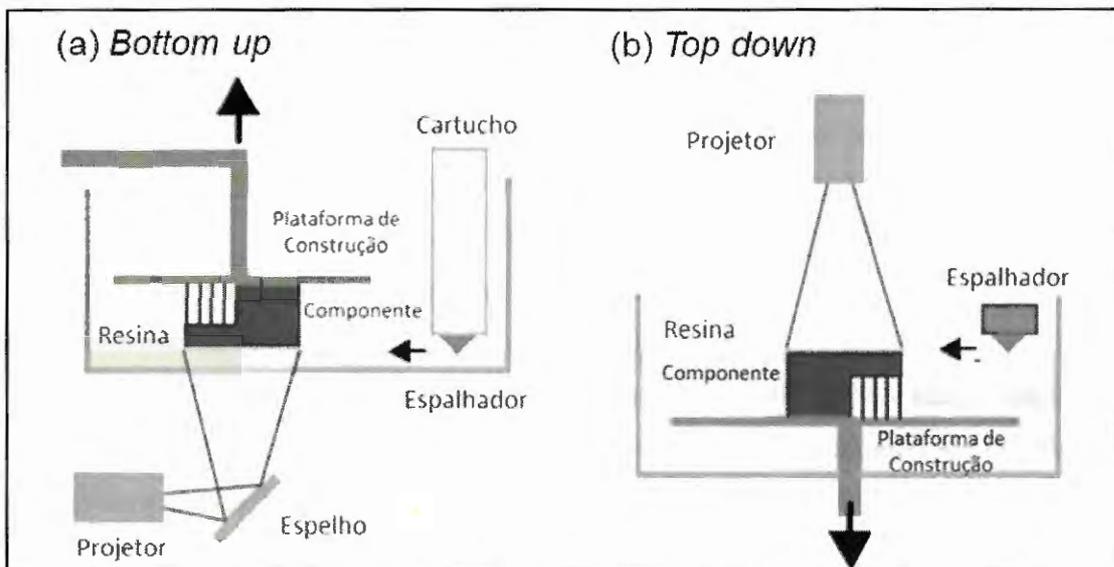
Figura 5 –Funcionamento do DLP com o emprego do *chip* DMD



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2015).

Os equipamentos comerciais de DLP apresentam dois arranjos diferentes de acordo com a posição do dispositivo de projeção de imagem, de forma que este pode ser projeção por baixo (*bottom up*) - Figura 6(a), onde o fundo tanque é fabricado em material transparente para possibilitar que a luz UV tenha acesso à resina; ou com projeção por cima (*top down*) - Figura 6(b), em que o projetor de imagem fica acima da cuba com a imagem sendo projetada na superfície da resina.

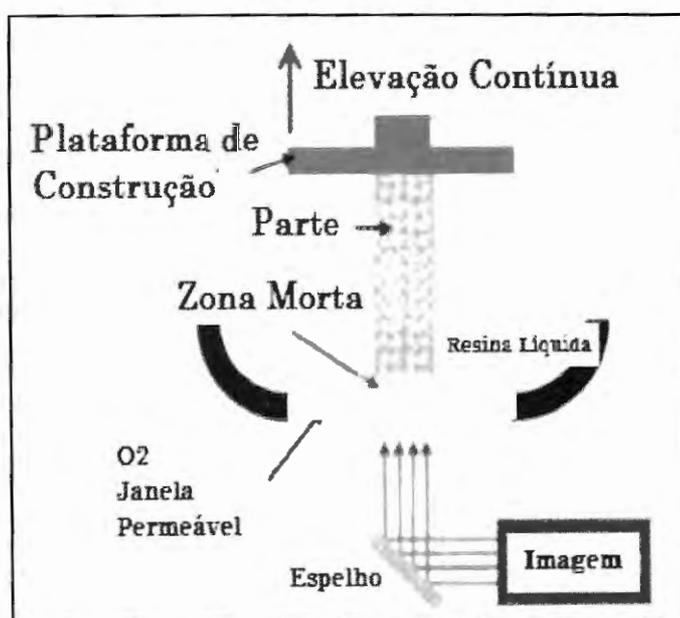
Figura 6 - Tipos de configurações de impressoras DLP's segundo a posição do projetor de imagens



Fonte: Gardan (2016).

Ainda com o princípio DLP, recentemente foi desenvolvida a tecnologia de produção CLIP (*Continuous Liquid Interface Production*) que se trata de um tipo de AM que utiliza a fotopolimerização de forma contínua e esse processo é cerca de 30 vezes mais rápido que o SLS ou Multi Jet Modeling (GARDAN, 2016). O processo contínuo é possível porque essa tecnologia aplica um filme permeável ao oxigênio para inibir a polimerização na superfície próxima à fonte de UV e como resultado remove a necessidade de uma etapa de recobrimento intermediária para cada camada. Isso ocorre de maneira que a concentração de oxigênio no fundo do tanque é suficientemente alta para criar uma “zona morta” onde a polimerização não ocorre (LIGON et al., 2017). A Figura 7 mostra um esquema desse processo.

Figura 7 – Representação de um sistema de impressão 3D com tecnologia CLIP



Fonte: Ligon et al. (2017).

2.3 FOTOPOLIMERIZAÇÃO E FOTOPOLÍMEROS

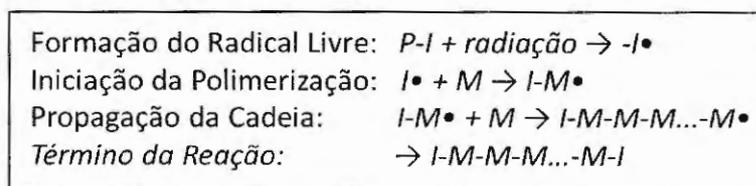
A cadeia do polímero, a macromolécula, é formada durante uma reação química de polimerização. Essa reação se inicia com a quebra de uma ligação dupla ou tripla em uma molécula insaturada de hidrocarboneto, devido a uma reação entre um iniciador ou um catalizador, para formar um radical livre capaz de se ligar a outra molécula de hidrocarboneto, causando assim uma ação em cadeia que forma as macromoléculas. Na reação química chamada de fotopolimerização com sistema fotoiniciador “algum composto do sistema sofre excitação

eletrônica por absorção de luz e em seguida decompõe-se em espécies ativas” (RODRIGUES; NEUMANN, 2003) que irão iniciar a reação em cadeia da polimerização.

Os fotopolímeros empregados na fotopolimerização em cuba são compostos por vários tipos de compostos: fotoiniciadores, diluentes reativos, plastificantes, estabilizadores e monômeros líquidos. De um modo geral, quando a radiação UV colide com a resina, os fotoiniciadores sofrem uma transformação química e tornam-se “reativos” com os monômeros líquidos. Um fotoiniciador “reativo” reage com uma molécula monomérica para iniciar uma cadeia polimérica. Reações subsequentes ocorrem para construir cadeias poliméricas e então ocorre a reticulação - criação de fortes ligações covalentes entre cadeias polimérica (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015)

Essa reação pode ser vista nas etapas mostradas no esquema da Figura 8, em que P-I é o fotoiniciador que após a exposição da radiação é ativado, então a porção reativa do fotoiniciador reage com um monômero, M, formando um radical livre na molécula do monômero, em seguida ocorre a propagação em que as moléculas do monômero se ligam em cadeias longas até chegar ao fim da propagação geralmente por um dos três mecanismos: a recombinação (combinação de duas cadeias), desproporção (cancelamento de um radical por outro sem junção) ou oclusão (os radicais livres ficam presos na rede de polímeros) (BOURELL et al., 2017).

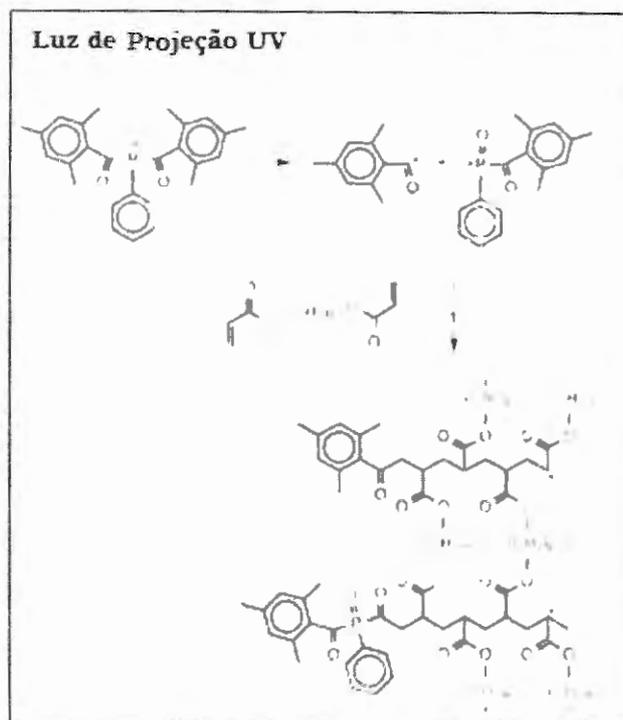
Figura 8 – Representação química do processo de fotopolimerização



Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015).

Um exemplo de reação de fotopolimerização é mostrado na Figura 9. Quando um fotoiniciador, como o óxido de fenilbis (2,4,6-trimetil-benzoil)-fosfina, absorve fótons de comprimentos de onda ultravioleta (UV), espécies com radicais livres são produzidas. Esses radicais livres reagem com os monômeros de 1,6-Hexanodiol Diacrilato para iniciar a polimerização (MUSKIN; RAGUSA; GELSTHORPE, 2010).

Figura 9 – Esquema da reação de quebra da cadeia do fotoiniciador pela luz ultravioleta e polimerização subsequente de 1,6-Hexanodiol Diacrilato



Fonte: Muskin, Ragusa e Gelthorpe (2010)

Há dois tipos principais de reações de fotopolimerização nas resinas comerciais, a radicalar e a catiônica. A fotopolimerização radicalar difere da catiônica devido a primeira produzir radicais livres após absorção de luz, e a segunda ocorre com a produção da espécie catiônica que se adiciona a uma primeira molécula de monômero para produzir as espécies iniciadoras da cadeia (RODRIGUES; NEUMANN, 2003).

Os primeiros materiais fotocuráveis utilizados para AM não foram planejados para uso em AM. Na patente de 1984, de Hull, onde ele descreve o SLA 57, ele usa uma resina da Loctite® e cita uma patente anterior para detalhes de sua composição. Essa resina, originalmente destinada ao uso como adesivo curável por UV, consistia de um dimetacrilato de uretano com uma pequena fração de ácido acrílico, benzofenona como fotoiniciador e metil etil-hidroquinona (MEHQ) / fosfato de trialilo para inibir a polimerização prematura. À medida que os métodos fotovoltáicos AM amadureciam, os formuladores procuravam fornecer resinas que exigissem uma dose menor de energia para atingir a cura (LIGON et al., 2017).

Os primeiros fotopolímeros utilizados foram os fotocombustíveis UV, monômeros de acrilato, e também os éteres vinílicos. No entanto, as resinas de acrilato e vinil éter exibiram um encolhimento considerável, de 5 a 20% levando a uma distorção significativa das peças

prototipadas. Além disso as resinas de acrilato têm suas reações de polimerização inibidas pelo oxigênio atmosférico. Então, para superar essas desvantagens, as epóxis foram introduzidas no início da década de 1990 e trouxeram vantagens significativas para o processo de fotopolimerização, mas devido sua complexa composição química complicaram a formulação das resinas (BOURELL et al., 2009).

Atualmente a maioria das resinas consiste em monômeros multifuncionais e oligômeros telecíclicos, que possuem uma dupla ligação de alta reatividade devido ao grupo acrilato. A tecnologia de cura por radicais livres baseada na química de acrilato / metacrilato compreende mais de 90% de materiais de cura por radiação (GUTIERREZ; ZAMBRANO, 2009).

Uma resina fotocurável elaborada com matérias primas de base foi desenvolvida por Muskin, Ragusa e Gelthorpe (2010) composta da mistura, na qual diacrilato de polietileno glicol foi utilizado como monômero, como fotoiniciador o fenilbis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-posphine oxide e o Sudan I (1-fenilazo-2-naftol) que tem capacidade de absorver luz. O Sudan I absorve luz no espectro visível ultravioleta e de comprimento de onda curto, com absorbância máxima ocorrendo em 418 nm.

2.4 CERÂMICAS PROCESSADAS POR MANUFATURA ADITIVA

As cerâmicas são materiais inorgânicos compostos por elementos metálicos e não metálicos para os quais as ligações são predominantemente iônicas e, em geral, possuem estruturas cristalinas complexas. Destacam-se por suas propriedades, características como alta dureza, altamente frágeis, grande resistência ao calor e a corrosão.

A produção de cerâmicas por manufatura aditiva tem o potencial de abrir novos mercados para produtos cerâmicos, pois não está estritamente vinculado aos paradigmas do processamento da cerâmica, como alto custo de processamento para pequenas produções, baixa flexibilidade, usinagem complexa e tecnologias limitadas de moldagem (ZOCCA et al., 2015). Além disso, as peças funcionais de cerâmica produzidas por técnicas de manufatura aditiva apontam um campo em crescimento, pois a técnica pode produzir peças complexas com detalhes em tamanhos de décimos de milímetros (LIGON et al., 2017).

Porém, devido à combinação de algumas propriedades das cerâmicas como o alto ponto de fusão e a baixa tenacidade, o processamento de cerâmicas por manufatura aditiva pode ser consideravelmente difícil. As abordagens atuais para realizar AM de cerâmica podem ser divididas em duas categorias, técnicas de fabricação diretas e indiretas. As técnicas de

processamento direto são caracterizadas pelo acabamento imediato da peça não sendo necessário pós processamento térmico, em geral, essas técnicas são as de deposição de energia direta como a sinterização a laser. Os métodos indiretos requerem um processo subsequente para obter os corpos cerâmicos sinterizados, esses métodos envolvem uma combinação de pó cerâmico com aglutinante orgânico (SCHWENTENWEIN; HOMA, 2015).

Cada uma das técnicas de impressão 3D tem sido aplicada na fabricação de objetos de cerâmica, alguns deles estão disponíveis comercialmente. Algumas dessas tecnologias como jateamento de aglutinante e extrusão de material são mais utilizadas para produção de utensílios de mesa mas a maioria das tecnologias de AM é aplicada à cerâmica para a produção de componentes de precisão, como eletrônicos (CASTRO E COSTA; DUARTE; BÁRTOLO, 2017).

A produção direta de cerâmicas por manufatura aditiva apresenta um processo complexo devido a seu alto ponto de fusão e baixa tenacidade, por exemplo, a alumina e suas ligas foram processadas diretamente usando deposição de energia direcionada e fusão de leito em pó, mas o processamento de peças densas é difícil, e na maioria dos casos, as tentativas resultaram em trincas induzidas termicamente (BOURELL et al., 2009). O processo indireto de produção de cerâmicas requer o uso de um aglutinante para manter o material cerâmico agregado, porém seu uso proporciona porosidade residual e aleatória à peça acabada.

Das técnicas de manufatura aditiva aplicadas na fabricação de objetos de cerâmica poucas são capazes de gerar corpos cerâmicos totalmente densos, por isso as pesquisas tem esforços voltados ao estudo de diminuição de porosidade e melhoria da propriedades mecânicas da peça acabada (HINCZEWSKI; CORBEL; CHARTIER, 1998).

Neste contexto, o emprego da estereolitografia pode ser uma promessa para a fabricação de peças cerâmicas. Esta técnica utiliza um meio reacional composto de partículas cerâmicas dispersas numa resina fotopolimerizável adequada, na qual o fotoiniciador é dissolvido. Uma vez polimerizado, o fotopolímero constitui uma matriz em torno das partículas de cerâmica e confere coesão ao corpo verde (HINCZEWSKI; CORBEL; CHARTIER, 1998). O mais crítico deste processo é a liberação de espécies gasosas durante a pirólise do polímero pré-cerâmico que associado à contração do material durante a queima, se torna um problema para a produção de peças totalmente densas (ZOCCA et al., 2015).

Schwentenwein e Homa (2015) descreveram o processo de manufatura de cerâmica baseado no método de litografia (LCM – *lithography-based ceramic manufacturing*). Com esta técnica foi possível produzir alumina de alta densidade (99,3%) com propriedades mecânicas similares à alumina conformada convencionalmente, para isso eles usaram uma suspensão

cerâmica fotocurável desenvolvida e comercializada pela companhia austríaca Lithoz[®]. A suspensão empregada é formada por pó de alumina altamente pura dispersa em uma matriz orgânica que consiste em um fotoiniciador baseado no monômero de metil-acrilato e aditivos.

2.5 ZIRCÔNIA

A zircônia ou óxido de zircônio (ZrO_2) é um composto que pode ser dissociado da zirconita ($ZrSiO_4$) que tem ocorrência na natureza, mas também pode ser encontrado em outros minérios como na baddeleyta (96,5 a 98,5% de óxido de zircônio) e no caldasito ou zirkita (mistura de óxido e silicato de zircônio) (BERTOLINO et al., 2008).

A zircônia pura é monoclínica à temperatura e pressão ambiente. Com o aumento da temperatura, mantendo-se a pressão atmosférica, o material se transforma em estrutura tetragonal, em aproximadamente 1170°C. E a partir de 2.370°C surge a estrutura cúbica, com o ponto de fusão em 2716°C (KELLY; DENRY, 2008).

A maioria das aplicações da zircônia é baseada nas propriedades de suas fases tetragonal e cúbica, as quais não são estáveis à temperatura ambiente mas pode ser estabilizada com adições de dopantes, tais como ítrio, cálcio e cério (SANTOS, 2011).

Os corpos cerâmicos a base de zircônia, assim como nas cerâmicas em geral, são produzidos a partir do pó obtido no processamento do minério. Os pós cerâmicos exibem características físicas e químicas muito diversas, por isso a preparação do pó é muito importante, devendo ser observadas características como a forma, tamanho e distribuição das partículas, estado de aglomeração, área superficial específica, densidade, composição química e pureza (FIOCCHI, 2014).

A manufatura de objetos cerâmicos ocorre com a mistura do pó cerâmico à aglomerantes e/ou aditivos, posteriormente a mistura é conformada e por fim sinterizada. Na sinterização, as partículas do corpo compactado se unem formando uma estrutura sólida (CANGANI, 2011).

O óxido de zircônio impuro é empregado na produção de utensílios de laboratório que suportam mudanças bruscas de temperaturas, revestimentos de fornos e como material refratário em indústrias cerâmicas e de vidro. Também tem utilização em joalheria, como gema artificial denominada zirconita que imita o diamante (BERTOLINO et al., 2008).

Além disso, a zircônia é um material cerâmico de alto desempenho, tem alta resistência mecânica e é usada como isolante térmico (WANG; DOMMATI, 2018). Por exemplo é muito utilizada na odontologia sendo empregada na confecção de pinos intra-canais, pré-coroas e

próteses parciais fixas e implantes dentários (CATRAMBY, 2014). Outras aplicações da zircônia pode-se citar: suporte de catálise, sensores de oxigênio, células combustíveis, partes de motores de automóveis, fceiras para trefilação, ferramenta de corte e implantes ortopédicos (SANTOS, 2008).

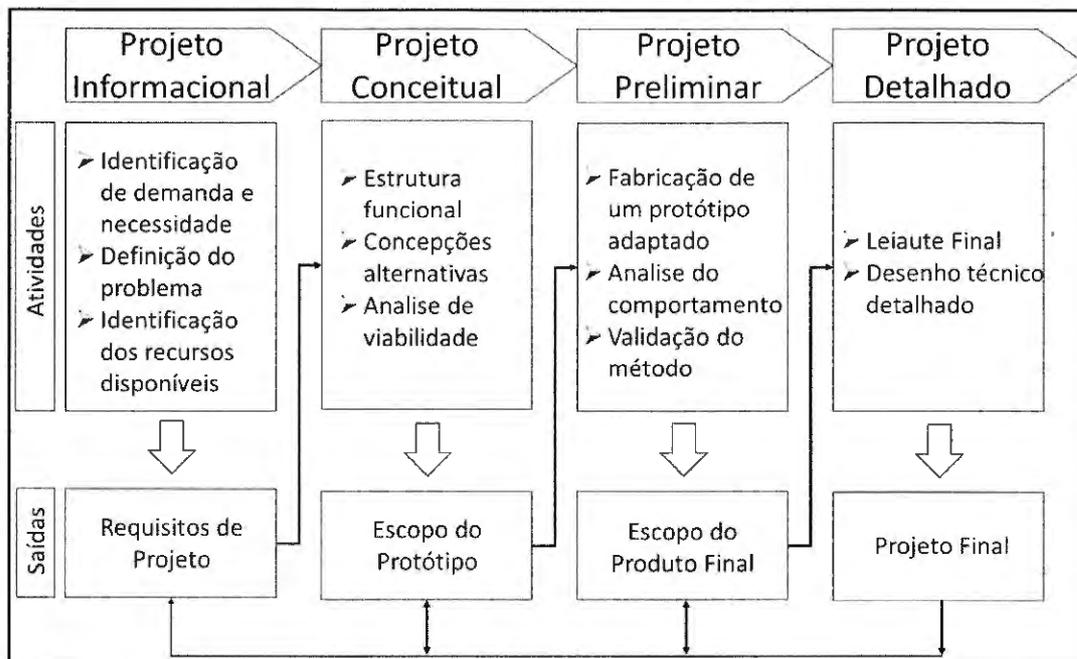
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordada a metodologia usada no projeto de uma máquina de manufatura aditiva descrevendo o procedimento sistemático de projeto utilizado, perfazendo as etapas executadas e definidas as ferramentas de projeto empregadas. Será também realizada a validação do conceito pela impressão de peças em zircônia 3Y.

3.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

O planejamento do projeto foi desenvolvido baseado na estrutura do PRODIP, mostrada na Figura 3, implementando as etapas da fase de elaboração do projeto, do produto e modificando as tarefas e saídas de cada etapa, de forma a especificar um procedimento inerente ao projeto em questão. A Figura 10, mostra o arranjo da metodologia utilizada:

Figura 10 - Procedimento adotado no planejamento do projeto



Fonte: O Autor.

As etapas propostas no planejamento do desenvolvimento do projeto tiveram constantes interações, iterações e retroalimentação, e também algumas tarefas de etapas foram realizadas de forma simultânea, o que facilitou a retroalimentação entre as fases.

3.2 PROJETO INFORMACIONAL

Nesta fase foram levantadas informações realizando pesquisas das tecnologias existentes e produtos comercializados deste tipo de equipamento com o intuito de obter uma descrição ampla do problema e embasar os requisitos iniciais de projeto. A pesquisa realizada foi feita com base em produtos existentes no mercado e com a busca de patentes e artigos científicos sobre o processo.

A análise de necessidade e demanda foi justificada pelos trabalhos do Laboratório de Tribologia e Compósitos (LTC) do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC que tem realizado pesquisas de aplicações de materiais cerâmicos, pesquisas com manufatura aditiva em novos produtos e materiais e pesquisas de processamentos de produtos cerâmicos. Sendo assim, o desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva para materiais cerâmicos é de extrema relevância para a comunidade acadêmica. Além disso, no Brasil não há fabricantes de equipamentos de manufatura aditiva tornando a pesquisa nessa área de interesse do corpo empresarial e de benefício para o comércio e a indústria. A utilização de manufatura de produtos cerâmicos por prototipagem rápida teria aplicação em diversos itens, como próteses e órteses, sensores, dispositivos eletrônicos, entre outros.

Na definição do problema buscou-se o entendimento claro e completo sobre métodos e materiais de prototipagem rápida, principalmente aqueles que utilizam fotopolimerização, observando detalhes e informações sobre os aspectos tecnológicos de produtos comercializados. Assim, foi possível elaborar os requisitos do produto:

- a) Fabricar peças de zircônia com baixa porosidade.
- b) Empregar o método de litografia (LCM).
- c) Fazer projeção de imagem por cima (*top down*).
- d) Ser de fácil manuseio e de baixo custo

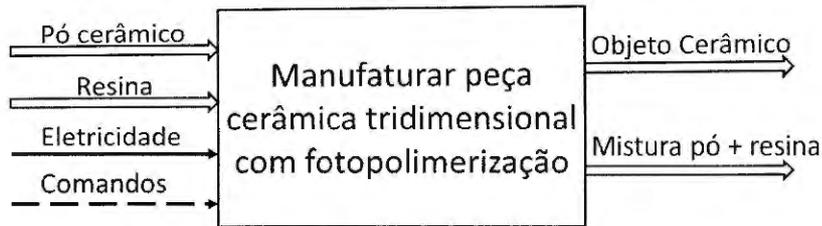
Além disso, foi efetuada a verificação dos recursos disponíveis com o levantamento de materiais e equipamentos acessíveis.

3.3 PROJETO CONCEITUAL

“Uma vez que o problema central tenha sido formulado, é possível indicar uma função global que, baseada no fluxo de energia, material e sinal que, expresse o relacionamento entre entradas e saídas” (BACK et al., 2008). Então, inicialmente no projeto conceitual elaborou-se

um diagrama da função global para visualizar a tarefa principal do equipamento bem como as entradas e saídas deste como podem ser vistos na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama lógico da função global do produto em desenvolvimento



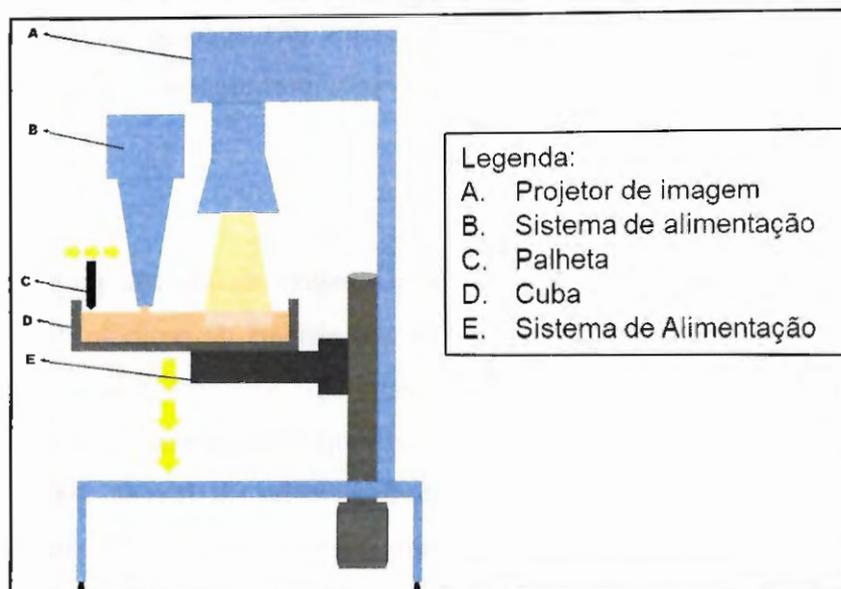
Fonte: O Autor.

O diagrama da Figura 11 mostra a função global do equipamento de impressão 3D tendo como entrada de matéria-prima o pó cerâmico e a resina fotopolimerizável que devem formar uma mistura supercarregada de pó. Como será empregada a tecnologia de projeção de camada, a mistura será depositada em uma cuba onde sua superfície será submetida a uma luz que se projeta com o formato da seção transversal da peça e para isso ser realizado também se tem como entrada do diagrama lógico uma fonte de energia e sinais de comandos, por exemplo, o desenho computacional da peça e o tamanho da camada. Após o procedimento de manufatura, ou seja, a cura das camadas de matéria prima e que formam a peça, se tem como saída o componente de cerâmica em verde, ou seja a mistura da resina com pó cerâmico.

Então, para a elaboração do projeto conceitual foram identificados os principais componentes necessários no processo que seriam: um projetor de luz digital, um sistema de deposição de material, um sistema mecânico para movimentação da plataforma responsável por gerar a espessura da camada e um *software* de operação da máquina juntamente com um sistema eletrônico para controle da máquina. O esboço inicial da máquina com a configuração de projeção de imagem por cima (*top down*) é mostrada na Figura 12 exibindo os componentes principais necessários para realizar a função global.

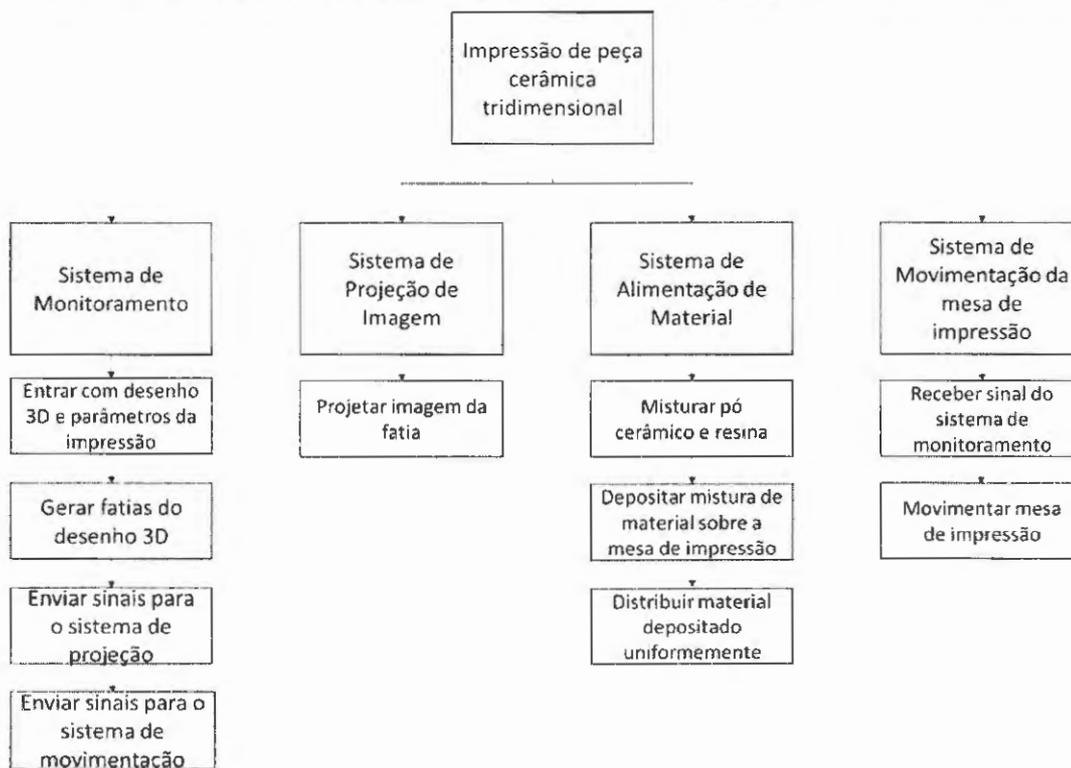
No esquema da Figura 12, o componente “A” é o responsável pela projeção da imagem, o componente “B” é o sistema de alimentação de material trabalhando em conjunto com “C” que é a palheta responsável pelo espalhamento do material na cuba, representada por “D”. E por fim “E” representa o sistema de movimentação responsável por abaixar a cuba para que uma nova camada de material seja depositada. Com base nessa estrutura foi possível desmembrar o equipamento em subsistemas modelando a função de cada sistema com o objetivo de facilitar a pesquisa de soluções específicas, os subsistemas e suas funções são mostradas na Figura 13.

Figura 12 - Esboço inicial da máquina de manufatura aditiva



Fonte: O Autor.

Figura 13 - Diagrama de blocos dos subsistemas adotados na máquina de manufatura aditiva



Fonte: O Autor.

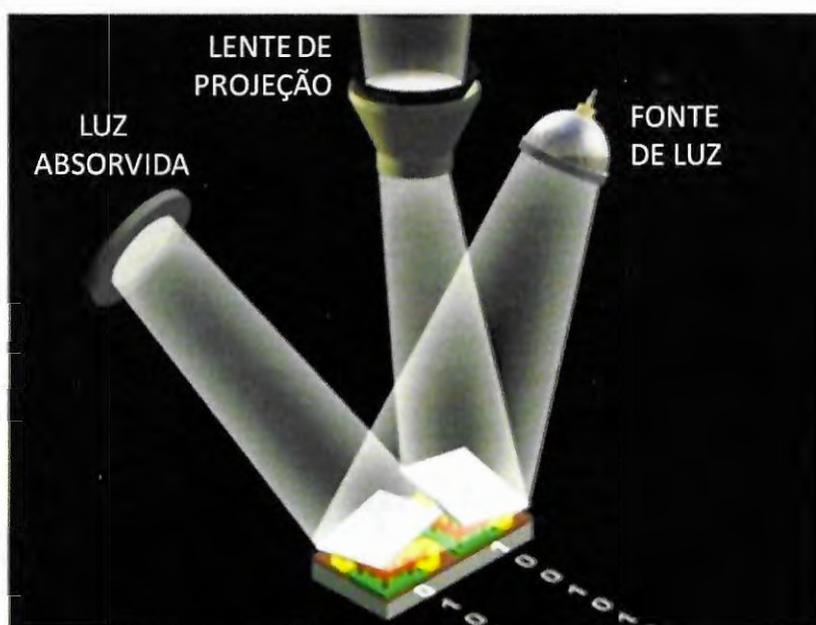
Com base nas funções descritas na Figura 13 iniciou-se a análise de soluções, para isso o processo de conceituação foi dividido em partes efetuando-se o estudo separado dos mecanismos mecânicos e elétricos que poderiam ser empregados para cada sistema.

3.3.1 Projeção de luz

Este sistema tem a função de gerar a imagem da camada projetando-a sobre a superfície do material. Optou-se por empregar um sistema de projeção de imagem com a utilização de um *chip* DMD, em função desta tecnologia apresentar tamanho de pixel menor, bem como intervalos estreitos entre os pixels, que proporcionam maior resolução de exibição, além de uniformidade e intensidade mais alta do feixe de luz (SUN et al., 2005).

Um DMD é um dispositivo microeletromecânico que permite controlar simultaneamente cerca de 1 milhão de pequenos espelhos que ligam ou desligam um pixel a mais de 5 KHz (PAN; ZHOU; CHEN, 2012). Cada pequeno espelho é na verdade um elemento opto-mecânico que representa um pixel no DMD, esse elemento possui duas posições que determinam a direção em que a luz é defletida. Por convenção, o estado positivo (+) é inclinado em direção à iluminação e é chamado de estado "ligado". Da mesma forma, o estado negativo (-) é inclinado para longe da iluminação e é chamado de estado "desligado" (LEE, 2008). A Figura 14 mostra dois pixels, um ligado e outro desligado.

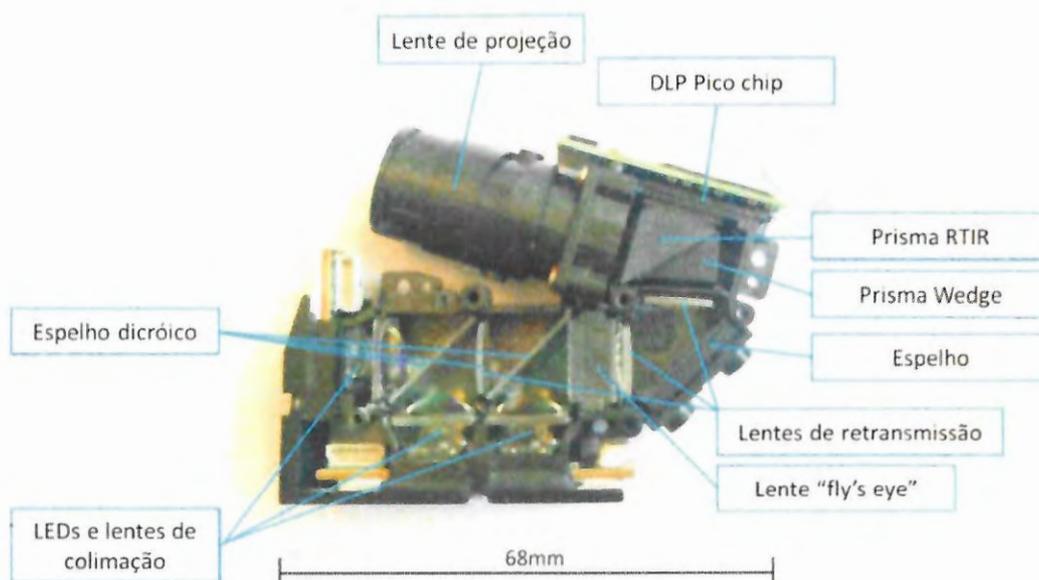
Figura 14 - Desenho esquemático de um pixel do DMD



Fonte: LEE, 2008.

Dessa forma, o DLP® um dispositivo de microespelhos fabricado pelas Texas Instruments®, entre outras funções, pode ser utilizado para projetar imagens em uma superfície. A Figura 15 mostra o esquema óptico de um projetor de imagens que utiliza um chip DLP®.

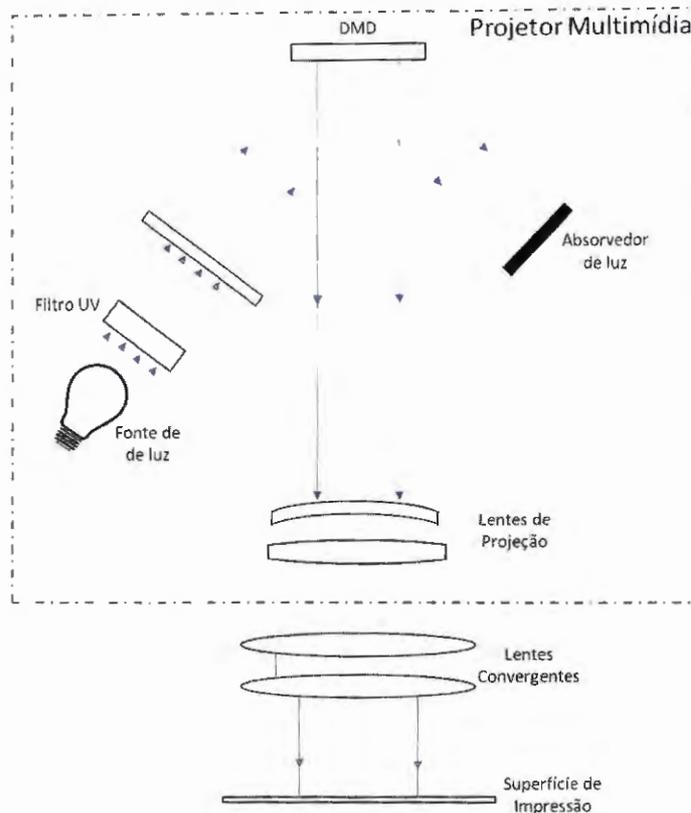
Figura 15 - Componentes óticos de um projetor DLP®



Fonte: RICHUSO, 2017.

Por isso, a princípio para o sistema de projeção considerou-se a utilização de um projetor multimídia de forma que seja um equipamento que utiliza a tecnologia DLP® e possua potência de luz necessária para a cura da resina empregada. Porém, para o emprego do projetor comercial seria necessária, também, a utilização de lentes convergentes para convergir a imagem do projetor na superfície da resina, visto que os projetores são planejados para ampliar as imagens que serão projetadas em uma tela ou parede. A Figura 16 mostra, então, o esquema do sistema de projeção adotado no equipamento. Foi necessário o emprego de duas lentes convergentes para se conseguir o tamanho desejado nas projeções.

Figura 16 - Esquemática do sistema de projeção de imagem



Fonte: O Autor.

3.3.2 Sistema de suprimento de material

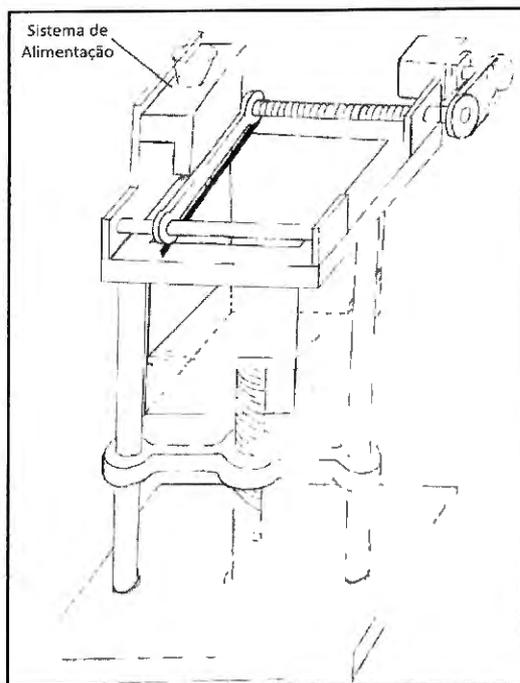
Primeiramente se concebeu a ideia de um sistema de suprimento de material externo composto de uma bomba ou um funil para a deposição de material por gravidade. A Figura 17 mostra o primeiro croqui da máquina de manufatura aditiva idealizando um sistema de alimentação externo.

Contudo, com o objetivo de diminuir a complexidade do projeto foi idealizado um sistema de alimentação de resina através da própria movimentação da base de construção de peças, de modo que o movimento vertical da base seja responsável por alimentar o sistema com a suspensão (resina + pé cerâmico) sendo assim dispensável um sistema de alimentação externa.

Inicialmente foram criados os modelos mostrados na Figura 18, e nos dois modelos o material fica em baixo da base de construção que se movimenta internamente na cuba como se fosse um êmbolo, e à medida que a base se movimenta verticalmente para baixo este “empurra” a pasta que flui para o canal aberto. No modelo (a) o êmbolo tem um formato de ‘L’ e a pasta flui por trás do embolo, e no modelo (b) a cuba possui dois canais um destinado à construção

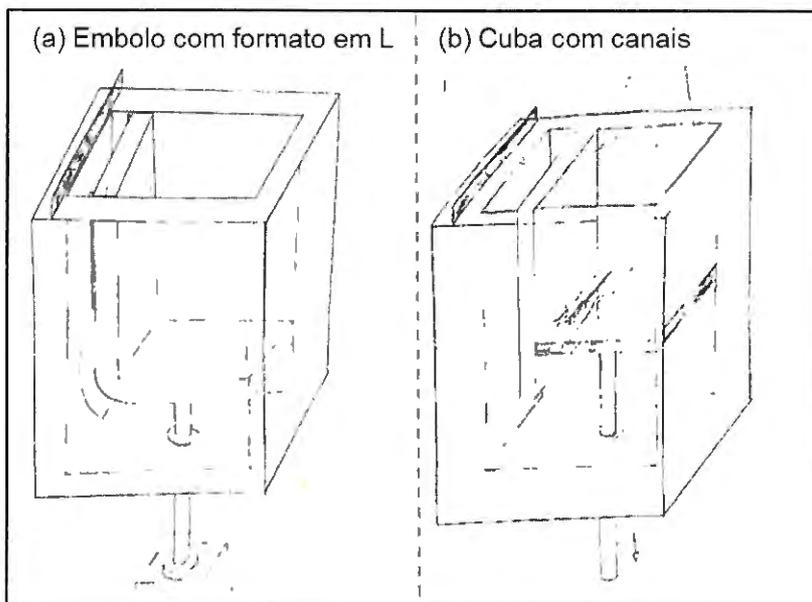
da peça e o outro por onde flui a pasta. Os dois modelos apresentados seriam de fabricação muito complexa, então foi sugerida uma terceira concepção mostrada na Figura 19.

Figura 17 – Croqui da ideia inicial para a máquina de manufatura aditiva



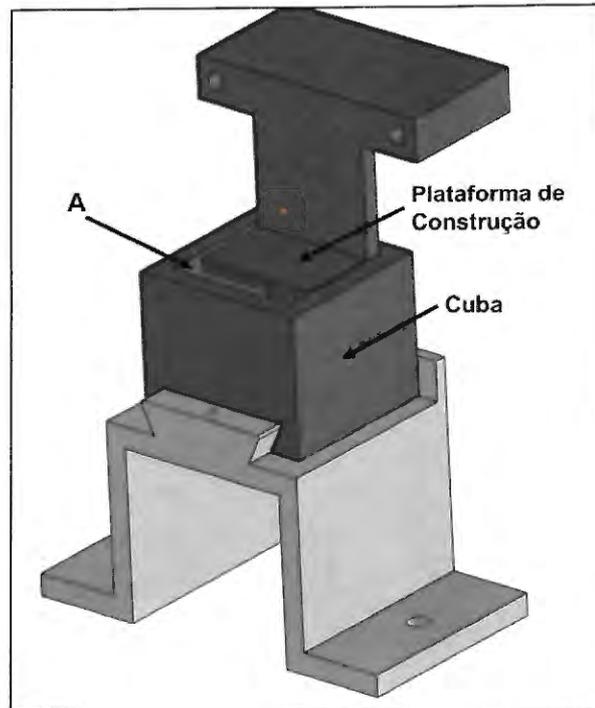
Fonte: o Autor.

Figura 18 - Croquis das máquinas de manufatura aditiva com sistema de alimentação de material com o movimento vertical da base de construção



Fonte: O Autor.

Figura 19 - Sistema de alimentação de material proposto



Fonte: o Autor.

Este sistema de alimentação proposto (Figura 19) funciona da seguinte maneira: é feita uma plataforma de construção que se desloca dentro da cuba, assim a cuba ficaria fixa. A mistura resina com pó cerâmico já seria colocada dentro da cuba antes do processo de manufatura, assim quando a base se desloca para baixo dentro da cuba a resina flui através da passagem indicada com “A” na Figura 19 e então a palheta espalha a pasta formando a camada de material.

Devido à alta viscosidade da pasta, sugeriu-se a construção de uma bancada experimental para testar este sistema de alimentação. O projeto e construção da bancada e os testes estão detalhados no Capítulo 4.

3.3.3 Movimentação da Plataforma

A movimentação da plataforma de construção é responsável por receber as camadas de matéria prima e após a construção do componente possibilita a retirada deste de dentro da cuba.

A movimentação da plataforma de construção foi realizada com um atuador linear acoplado a um motor de passo que recebe sinal do sistema de monitoramento sobre informações

da velocidade, espessura da camada, posicionamento inicial, posicionamento para extração nos dois sentidos de movimentação e em velocidades variáveis.

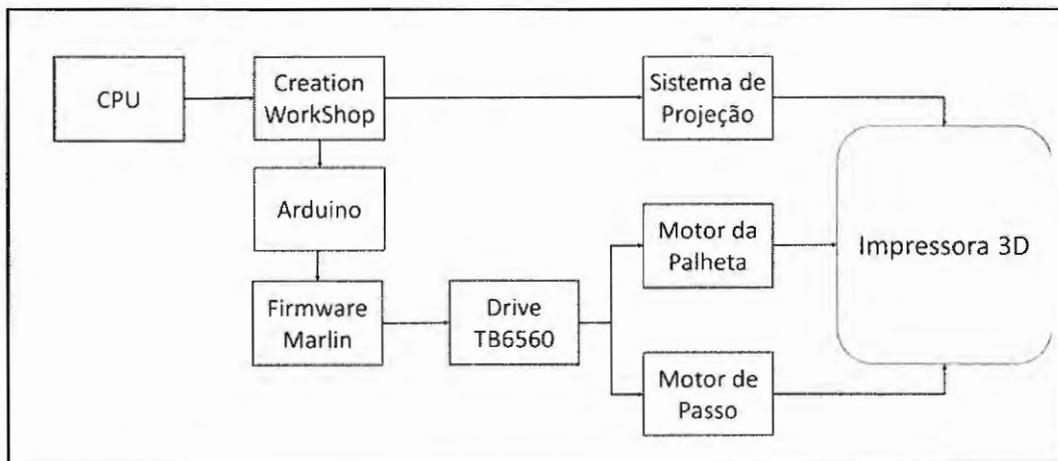
3.3.4 Sistema de Controle

O sistema de controle é o responsável por receber os sinais de entrada, que seriam: o desenho computacional em 3D da peça, o tamanho da camada, o tempo de cura da camada e outros parâmetros referente à operação do equipamento, e como saída o sinal elétrico para o motor de passo do sistema de movimentação que irá se mover na quantidade necessária para fazer uma camada, o sinal elétrico para o sistema de projeção que irá projetar o desenho da camada pelo tempo necessário para a cura da resina, e o sinal para movimentar a palheta de espalhamento da camada.

Os sinais de entrada foram inseridos em uma unidade central de processamento (CPU) através do programa *Creation Workshop* que também realiza o fatiamento virtual da peça.

Para o controle operacional da máquina foi empregada uma placa Arduino Mega 2560, *driver* para motor de passo modelo TB6560, *firmware* de impressão 3D Marlin. A Figura 20 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle com o fluxo de sinal.

Figura 20 - Diagrama de blocos do sistema de controle da máquina de manufatura aditiva



Fonte: O Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será abordado o projeto preliminar da máquina de manufatura aditiva, no qual foi desenvolvido um protótipo usado para validação do método de prototipagem empregada, parametrização dos padrões de funcionamento do equipamento, análise dos mecanismos empregados, e também o estudo e ensaio dos materiais de insumo da máquina.

4.1 PROJETO PRELIMINAR

No projeto preliminar o conceito da máquina definido anteriormente foi desenvolvido com a montagem de um protótipo para isso foram especificados os componentes de cada sistema do equipamento, de forma que esses componentes foram escolhidos conforme a sua disponibilidade no LTC e demais itens do sistema de controle específicos para implementação de máquinas de impressão 3D foram adquiridos. Além disso, nesta etapa foram realizadas pesquisas e experimentação de algumas resinas fotopolimerizáveis, e também sua utilização como veículo da suspensão cerâmica.

4.1.1 Projeto e Construção do Protótipo

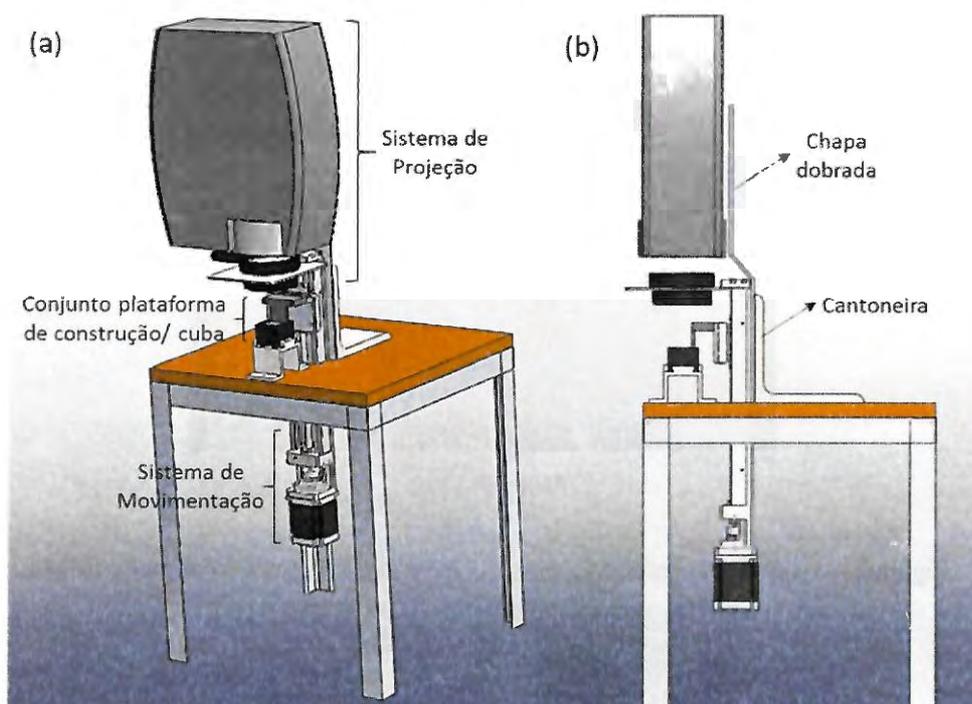
O protótipo foi planejado de forma a atender o escopo do projeto gerado no projeto conceitual e com o propósito de utilizar materiais e equipamentos disponíveis no Laboratório de Tribologia e Compósitos. Desenvolveu-se assim o projeto do protótipo conforme mostrado na Figura 21 que apresenta o desenho tridimensional do protótipo da máquina de manufatura aditiva indicando os seus principais sistemas, com exceção do sistema de controle que é externo ao equipamento.

O conjunto da estrutura do protótipo é formado por uma base de cantoneiras de 40x40mm com tampo de madeira e para suporte do sistema de projeção foi utilizado uma chapa de alumínio dobrada sustentada por uma cantoneira de aço de 150mm, como pode ser visto na Figura 21(b).

Assim, na construção do protótipo empregou-se um projetor de imagem da marca InFocus com tecnologia DLP® que fornece 2200 lumens para o sistema de projeção do equipamento com lentes convergentes para ajustar a imagem projetada na superfície da resina. Para realizar a movimentação da plataforma de construção foi empregado um atuador linear da marca THK e modelo KR33A acoplado a um motor de passo NEMA 23. O sistema de

alimentação que também é o conjunto cuba/plataforma de construção (Figura 19 - Sistema de alimentação de material proposto) foi montado fabricando as peças em ABS com equipamento de manufatura aditiva de extrusão de material, e as peças foram infiltradas com resina epóxis. A cuba foi projetada para ter volume aproximado de 18 cm³ e além disso, idealizou-se fazer uma guia linear para encaixe do tipo rabo de andorinha para facilitar a introdução/remoção da cuba. A Figura 22 mostra o protótipo construído, com chamada para os seus principais componentes e a Figura 23 apresenta a montagem da cuba com a plataforma de construção com maiores detalhes.

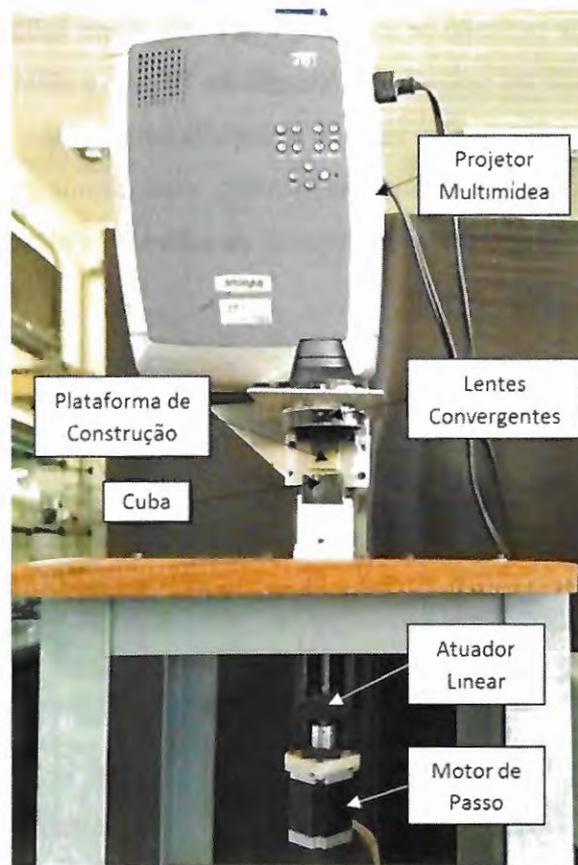
Figura 21 - Desenho tridimensional do protótipo



Fonte: O Autor.

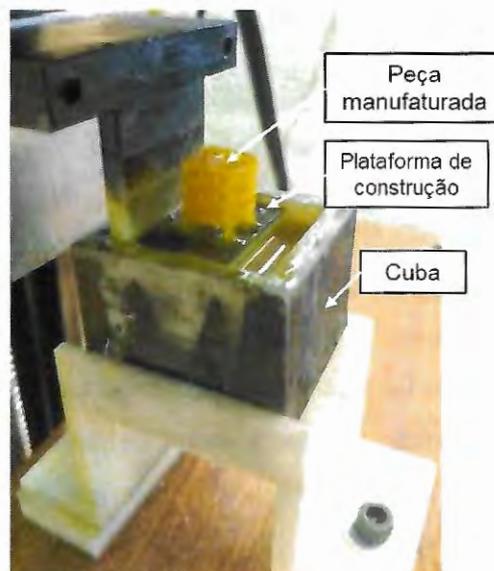
Foi montado também um sistema de controle utilizando o *software* de fatiamento *Creation Workshop* versão 1.0.0.75 gratuita, que é próprio para controle de máquinas de impressão DLP. Este programa envia um sinal em código G para uma placa de Arduino já carregada com o *firmware* Marlin que possui todos os comandos base para controle de impressoras 3D. E a conexão entre Arduino e motor de passo será intermediada pelo *drive* TB6560 responsável por controlar a frequência de pulsos que o motor irá receber de forma a comandar a velocidade do motor.

Figura 22 - Protótipo construído da máquina de manufatura aditiva



Fonte: O Autor.

Figura 23 - Conjunto cuba/plataforma de construção do protótipo em maior detalhe

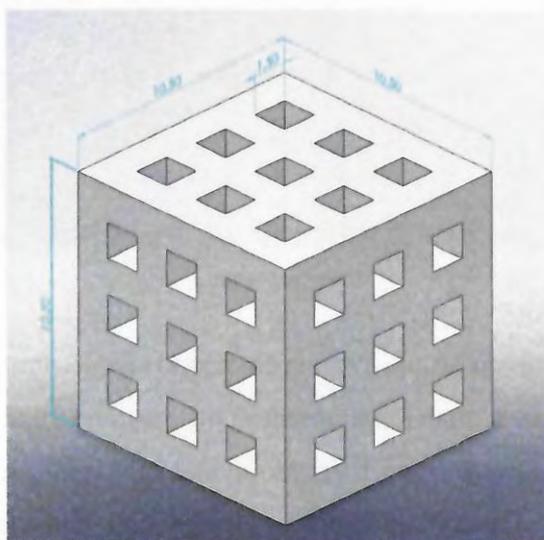


Fonte: O Autor.

4.1.2 Validação do Protótipo

Com o protótipo construído foi possível proceder com o estudo do processo de manufatura. Primeiramente, foi utilizada apenas a resina fotopolimerizável para adequar os parâmetros de impressão. Nos testes iniciais empregou-se a resina *Snow White*, do fabricante “*Fun to do*”, constituída por monômeros acrílicos alifáticos, oligômeros acrílicos e fotoiniciador à base de óxido de fosfina, realizando a impressão da peça mostrada na Figura 24, com suas dimensões em milímetros.

Figura 24 – Desenho da peça manufaturada no protótipo para teste



Fonte: O Autor.

O processo de manufatura inicia-se com a resina sendo colocada na cuba que por sua vez é encaixada no protótipo, a plataforma de construção, então, é movimentada para baixo imergindo na cuba até esta ficar nivelada com a superfície da resina. Os parâmetros de impressão são configurados no programa e tem início a fabricação da peça.

Os primeiros testes foram feitos sem o processo de espalhamento do material, sendo feitas operações com variação do tamanho da camada, tempo de cura de cada camada e velocidade da plataforma de construção. Destes testes percebeu-se a necessidade do espalhamento da resina, pois no momento da impressão não foi dado o tempo necessário para a resina escoar da abertura entre a cuba e a plataforma até o centro da base de construção, por isso não ocorreu a cura de resina no centro da peça (primeira peça na Figura 25).

Em seguida realizaram-se outros testes aumentando a velocidade do motor de passo que consequentemente aumentou a velocidade da plataforma de construção fazendo com a

alimentação da resina se tornasse mais rápida. Dessa forma foi obtida uma evolução no aspecto das peças impressas, podendo ser observada claramente a melhora acerca da qualidade das camadas. Na Figura 25 vemos a melhoria obtida nas peças manufaturadas de acordo com que a velocidade da plataforma de construção foi aumentada o que levou a resina a fluir mais rápido sob a plataforma para formar uma camada homogênea.

Figura 25 – Primeiras peças fabricadas apresentando a evolução com o ajuste dos parâmetros de construção das camadas.



Fonte: O Autor.

Além disso, observou-se que a resina empregada apresentou um espalhamento interno da luz de forma que a cura do material apresentou distorção na forma do desenho da projeção. Este comportamento é visivelmente observado quando foi impressa apenas uma camada. A Figura 26 mostra peças com a manufatura de apenas uma camada, porém com tempos de exposição à luz diferentes. É possível ver no aspecto das peças o espalhamento da polimerização além do contorno da imagem projetada e que a resina *Snow White* ao se solidificar apresenta um encolhimento considerável levando à distorção do objeto.

Figura 26 – Peças com impressão de apenas uma camada mostrando o espalhamento da polimerização com o aumento do tempo de exposição a luz



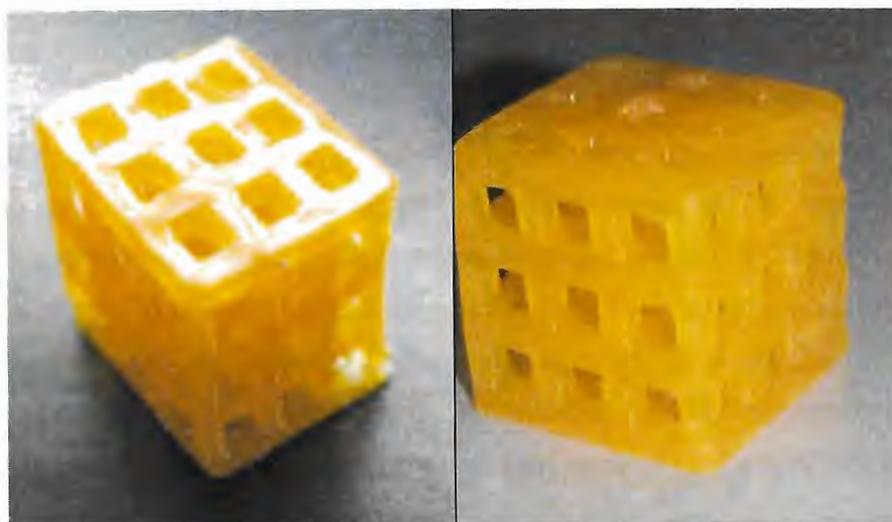
Fonte: O Autor.

Analisou-se também o tempo de cura da camada, de forma a investigar sua influência na propagação da polimerização além do contorno da camada. Na Figura 26 também pode ser vista a melhoria no aspecto da forma da peça, ou seja, há menor propagação da solidificação da resina além do contorno da peça, de acordo com que o tempo de exposição à luz era reduzido.

Na segunda parte dos experimentos foi implementada outra resina, com o intuito de averiguar a qualidade das resinas; para isso foi impresso o componente da Figura 24 com a resina LS 600 do fabricante EnvisionTEC, indicada para protótipos de alta qualidade. Nesses experimentos também foram testados vários parâmetros de impressão buscando-se o melhor ajuste para a resina em questão.

As peças fabricadas com a resina LS 600 mostraram uma melhor resolução de acabamento, com os devidos ajustes nos parâmetros de impressão, como pode ser visto na Figura 27. Por isso optou-se pelo uso da resina LS 600 nas suspensões cerâmicas que foram formuladas na sequência.

Figura 27 – Peças fabricadas com resina LS 600



Fonte: O Autor.

4.1.3 Ensaio das Suspensões Cerâmicas

A zircônia policristalina de estrutura tetragonal parcialmente estabilizada com 3 mol% de ítria, TZ-3Y (TOSOH), foi escolhida pelas suas características de maior pureza, alta reatividade, devido ao tamanho de partículas de pequenas dimensões, e por ser uma referência internacional como matéria prima. De acordo com o fabricante a zircônia TZ-3Y apresenta

diâmetro médio equivalente de partícula de $0,04\mu\text{m}$, área superficial específica de $(16\pm 3)\text{m}^2/\text{g}$, densidade de $6,05\text{g}/\text{cm}^3$ e compostos adicionais apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Componentes da Zircônia 3Y-TZ

Compostos	Especificações (%)	Resultado da Análise (%)
Y_2O_3	4,95 – 5,35	5,28
Al_2O_3	0,15 – 0,35	0,249
SiO_2	Máx 0,02	0,004
Fe_2O_3	Máx 0,01	0,002
Na_2O	Máx 0,01	0,024

Fonte: TOSOH Data Sheet.

Os primeiros ensaios foram feitos com diferentes composições da mistura de resina e pó cerâmico para observar as que apresentariam melhor homogeneidade e viscosidade suficiente para o espalhamento de camadas, no processo de manufatura aditiva. Percebeu-se a necessidade do uso de solventes devido à alta viscosidade das pastas com altas concentrações de zircônia na resina, assim utilizou-se álcool isopropílico e n-metil-2-pirrolidona variando-se também as suas concentrações. Também foram estudadas variações com a adição dos defloculantes PVB e PABA.

Das composições elaboradas foram processadas amostras as quais foram submetidas à luz do projetor. As amostras tinham o formato de um cilindro com camadas de aproximadamente 0,5 milímetro. Depois de polimerizado, o conjunto de amostras das misturas realizadas foi levado para a estufa por onde permaneceu por 6h à 60°C , 12h à 80°C e 12h à 100°C sucessivamente. Após esta etapa, as amostras foram queimadas e sinterizadas com uma rampa de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ até 150°C ; $1,5^\circ\text{C}/\text{min}$ de 150°C à 600°C ; $5^\circ\text{C}/\text{min}$ de 600°C à 900°C e $6^\circ\text{C}/\text{min}$ de 900° à 1500°C sendo mantida neste patamar por 1h; por fim, o aquecimento do forno foi desligado e as peças resfriaram naturalmente dentro do forno.

A Tabela 4.2 exhibe as composições das amostras que apresentaram bons resultados após a queima, ou seja, obteve-se corpo sólido, adesão entre camadas e ausência de trincas muitas significativas.

As amostras com PABA e PVB não apresentaram boa aparência após a queima, foram observadas bolhas em sua superfície e houve fragmentação do interior das amostras.

A macro e microestrutura da suspensão que continha apenas zircônia, resina e solvente foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A caracterização do corpo de prova para o MEV decorreu com o embutimento das amostras em resina epóxica, que em seguida

foram lixadas com lixas d'água de 180, 280, 320, 400 e 600 respectivamente, e por fim foi feito o polimento com 9 μ m, 4 μ m e 1 μ m. Após polimento as amostras foram submetidas ao ataque térmico à 1450° C por 6 minutos para revelar os contornos de grãos.

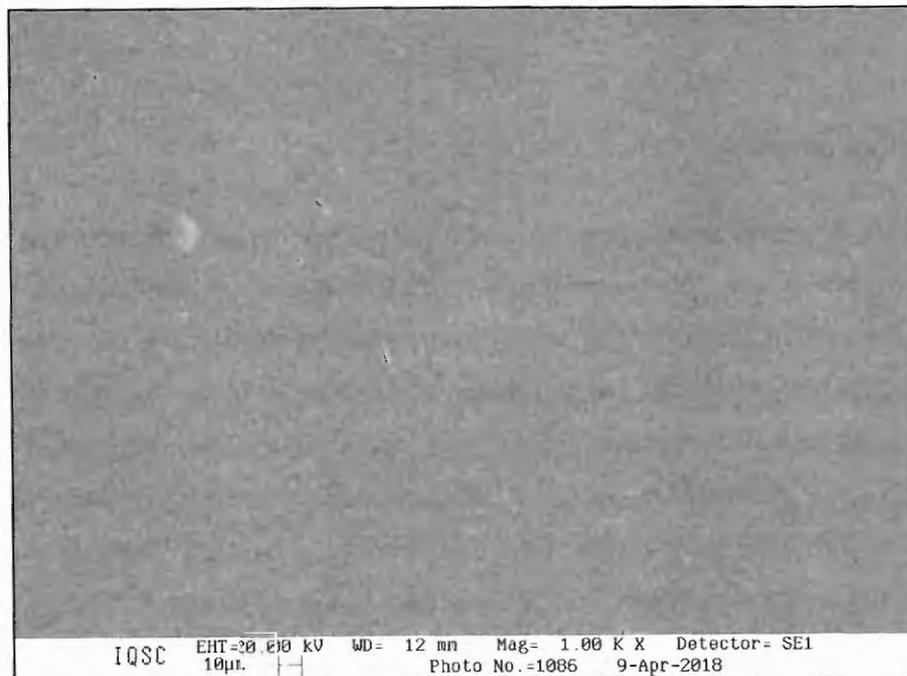
Tabela 4.2 - Concentrações de algumas amostras inicialmente preparadas.

Formulação	Concentração em Volume		Quantidade em gramas	
	Zircônia	Resina LS 600	Álcool Isopropílico	n-metil-2-pirrolidona
A	50%	50%	-	1,2
B	50%	50%	1,5	-
C	50%	50%	1,7	-

Fonte: O Autor.

Na análise das micrografias, foi observada a seção transversal e longitudinal do interior das peças. As imagens micrográficas da seção longitudinal das amostras A, B e C revelaram que as misturas feitas com a resina LS 600 apresentam baixa porosidade e com poros dispersos como mostra a Figura 28.

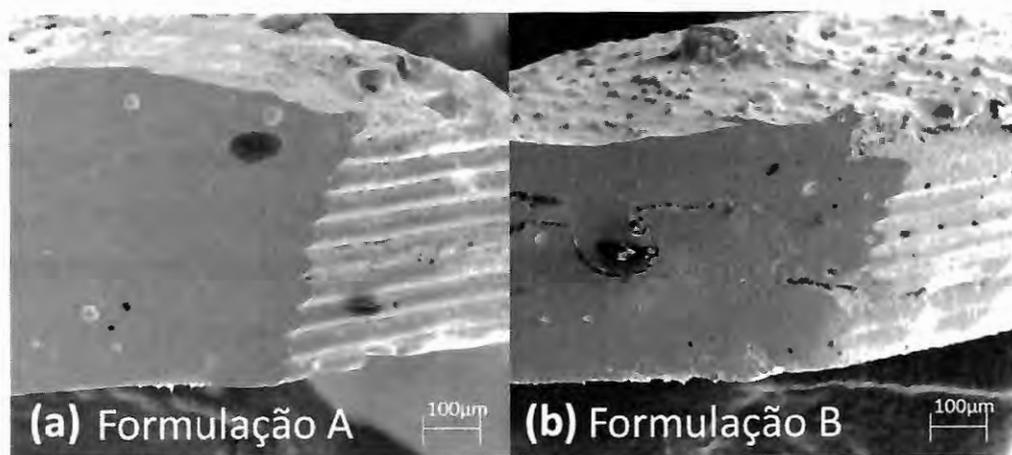
Figura 28 - Micrografia com ampliação de 1000x da amostra de cerâmica com formulação A



Fonte: O Autor.

No entanto, analisando as imagens da superfície transversal das amostras notou-se a presença de trincas menores e em menor concentração nas amostras em que foi utilizado o n-metil-2-pirrolidona como solvente (formulação A), quando comparado com as amostras nas quais se utilizou álcool isopropílico (formulação B e C). A Figura 29 mostra a comparação entre as duas imagens, além disso, nessas imagens pode ser observada a morfologia da superfície lateral das amostras que revela as camadas da manufatura aditiva.

Figura 29 - Micrografia de amostras de cerâmica com ampliação de 119x utilizando como solvente: (a) n-metil-2-pirrolidona e (b) álcool isopropílico



Fonte: O Autor.

4.1.4 Processamento dos Corpos Cerâmicos

Após o estudo das suspensões cerâmicas selecionou-se a mistura que apresentou melhor desempenho, que foi a formulação A (Tabela 4.2) para ser implementada na máquina de manufatura aditiva. Este processo consistiu em introduzir a mistura de resina e pó cerâmico na cuba, na qual a plataforma de construção que se desloca para baixo dentro da cuba de forma que a suspensão cerâmica emerge através de uma folga entre plataforma e cuba. A imagem da Figura 30 mostra o momento em que a pasta de resina com pó cerâmico emerge. Na sequência, o material é espalhado para formar uma fina camada que é exposta à luz do projetor. Continuamente, a base de construção desce e uma nova camada de material é distribuída sobre a anterior para ser polimerizada.

Ao empregar a suspensão cerâmica com composição da formulação A no protótipo os testes experimentais mostraram ser impossível criar camadas muito finas da pasta na plataforma de construção devido à sua alta viscosidade. Assim, foi possível construir peças usando uma

espessura de camada na casa de décimos de milímetros. Isto resultou camadas de material não curado entre as camadas curadas. A Figura 31 mostra a primeira peça em cerâmica verde que foi obtida com o processo após vários testes de espessura de camada e tempo de exposição à luz. Nesta imagem pode-se perceber o material remanescente não curado.

Figura 30 - Processo de manufatura aditiva com suspensão cerâmica



Fonte: O Autor.

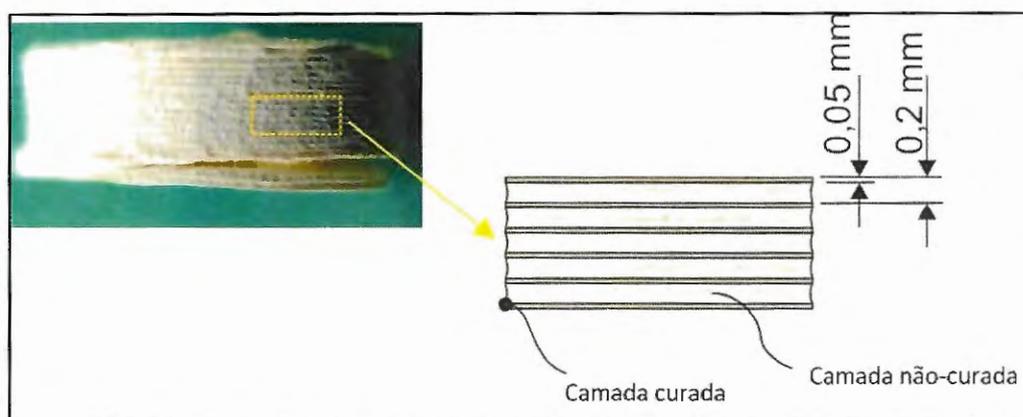
A peça da Figura 31 foi secada em estufa permanecendo 4h a 60°C, 4h a 80°C e 4h a 100°C, sucessivamente. E uma foto aproximada desta peça seca mostrou em mais detalhes o material não curado entre as camadas da peça como pode ser visto no esquema da Figura 32. Esta peça também foi sinterizada, e observou-se que o material não curado ocasionou trincas extensas entre as camadas de construção da peça como pode ser observado na Figura 33.

Figura 31 – Primeira peça verde de cerâmica manufacturada



Fonte: O Autor.

Figura 32 – Esquematização da morfologia do componente cerâmico fabricado



Fonte: O Autor.

Figura 33 – Aspecto do componente cerâmico após sinterização



Fonte: O Autor.

Outro problema encontrado foi o escorregamento das camadas durante o processo de espalhamento da pasta. A Figura 34 mostra um componente no qual as camadas ficaram defasadas umas sobre as outras devido ao material não curado entre as camadas.

Figura 34 – Componente fabricado apresentando escorregamento de camadas



Fonte: O Autor.

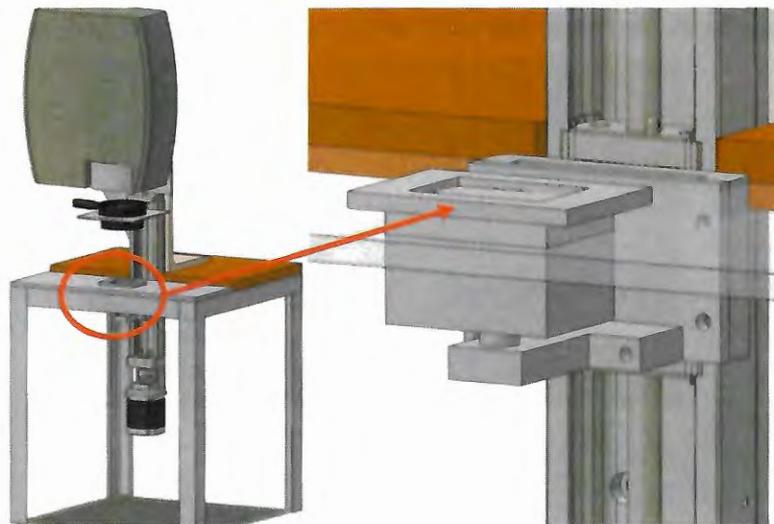
Isto posto, percebeu-se que o método no qual a mistura de resina e pó cerâmico era colocada na cuba e a plataforma de construção que se desloca para baixo adentro da cuba, de forma que a suspensão cerâmica emerge através de uma folga, entre plataforma e cuba, para então o material ser espalhado e formar uma camada que é exposta à luz do projetor, não se mostrou eficiente. Devido ao fato que a quantidade de material que emergia pela folga não era suficiente para formar uma camada homogênea e com este processo não se conseguia obter camadas mais finas.

Portanto, foi necessário efetuar uma adaptação no protótipo anteriormente desenvolvido, para mudar o sistema de alimentação de material. Foi proposta uma modificação na cuba e na plataforma de construção, de forma que a plataforma de construção se movimentasse dentro da cuba sem folga, conforme ilustra a Figura 35. Assim, o novo processo implementado é a aplicação da pasta (mistura pó cerâmico/resina) manualmente sob a plataforma, e esta é espalhada com a ajuda de uma palheta. Em seguida a camada é submetida à luz do projetor, e então a plataforma abaixa para ser espalhada uma nova camada de material. A Figura 36 mostra sequencialmente estas etapas.

Além disso, outra modificação no protótipo foi sugerida, visando solucionar o problema do escorregamento de camadas. Efetuou-se a retirada do filtro UV do projetor de imagens, de forma que este pudesse entregar, além de espectros de luz visível, também ondas da faixa ultravioleta, e assim melhorar o processo de cura da pasta. Foi observado maior

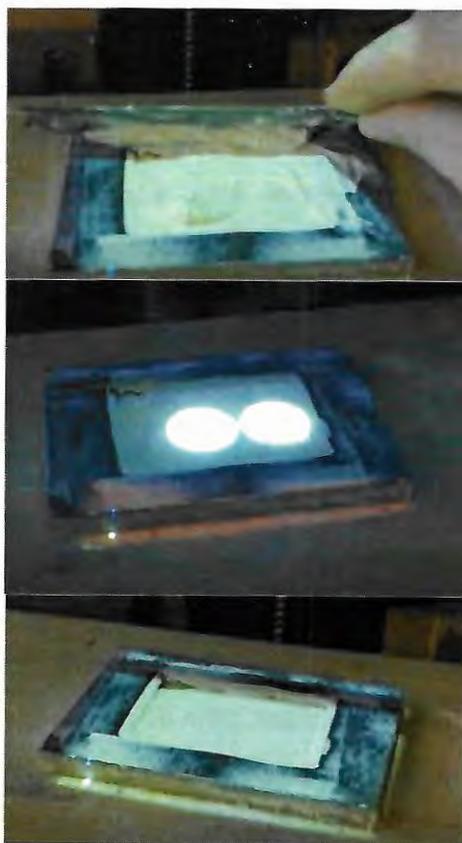
penetração da radiação e diminuição no tempo de cura das camadas, tornando o processo de manufatura aditiva mais rápido.

Figura 35 - Modificação do protótipo da máquina de manufatura aditiva



Fonte: O Autor.

Figura 36 – Etapas do processo de manufatura aditiva de cerâmica com espalhamento manual



Fonte: O Autor.

Visando ter o controle da composição da resina e assim melhor compreender o comportamento das formulações resina+cerâmica, visto que, resinas fotopolimerizáveis comerciais podem apresentar eventuais resíduos inorgânicos, e outros componentes químicos não conhecidos, procedeu-se com a elaboração de uma resina fotocurável a partir das matérias primas de base. Esta etapa foi baseada no trabalho desenvolvido por Muskin, Ragusa e Gelthorpe (2010) que elaboraram uma resina composta da mistura de 0,006g de Sudan I, 2,00g de fenilbis(2,4,6-trimetilbenzol)-óxido de fosfina, e 98 mL de diacrilato de polietileno glicol, no trabalho destes autores a mistura dos componentes permaneceu sob agitação mecânica durante 72 horas na ausência de luz. O Sudan I (1- fenilazo-2-naftol) absorve luz no espectro visível ultravioleta e de comprimento de onda curto, com absorbância máxima ocorrendo em 418 nm.

Foram feitos, então, novos ensaios testando formulações da suspensão cerâmica aplicando-se a resina com esta nova formulação e bons resultados foram obtidos, porém observando ainda uma baixa resolução do objeto construído, como pode ser visto nas amostras mostradas na Figura 37.

Figura 37 – Primeiros componentes cerâmicos fabricados sem o filtro UV no projetor de imagens



Fonte: O Autor.

A Tabela 4.3 mostra a composição das amostras indicadas na Figura 37, as quais foram construídas com camadas de 100 μ m de espessura e variando-se o tempo de exposição da camada à luz para ser averiguado o tempo ótimo que forneceria a melhor resolução do objeto construído, e também analisando quais misturas apresentariam melhor fluidez para o espalhamento. Assim, na amostra 4 o tempo de cura da camada foi de 10 segundos, em seguida na amostra 5 aplicou-se o tempo de 5 segundos; nas amostras 6 e 7 o tempo de cura da camada foi de 3,5 segundos e na amostra 8 de 4 segundos.

Tabela 4.3 – Concentrações das primeiras amostras testadas sem o filtro UV no projetor de imagens

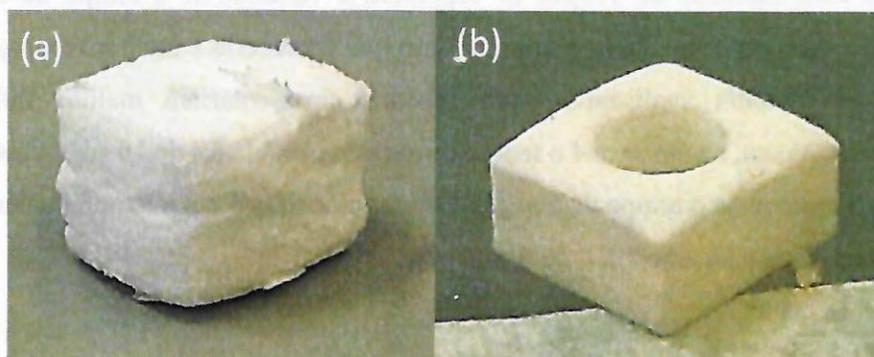
Amostra	Composição (% massa)		
	Zircônia 3Y-TZP	Resina	n-Metil-2-pirrolidona
4	63,2	36,8	-
5	63,2	36,8	-
6	68,2	18,2	13,6
7	65,2	21,7	13,1
8	65,2	21,7	13,1

Fonte: O Autor.

Adicionalmente, outros ensaios, foram realizados propondo-se: a aplicação de surfactante, o aumento da proporção de solvente e, também, estudar a aplicação de outros tipos de solventes na composição das suspensões cerâmicas. Com o intuito de observar o comportamento viscoso da pasta, visando melhorar o espalhamento com a possibilidade da formação de camada mais finas de material para a construção do componente e, também, observar a absorção de luz da suspensão.

Como resultado destes ensaios obteve-se expressiva melhoria na definição da geometria do componente com a adição do xilol como solvente. A Figura 38 mostra o comparativo entre dois componentes cerâmicos fabricados com a mesma geometria, um cubo com furo circular no centro. Na Figura 38(a) a peça fabricada possuía a composição, com proporções em massa, de 65,16% de zircônia, 13,03% de n-metil-2-pirrolidona e 21,81% de resina e parâmetros de impressão de 0,1 milímetros de espessura de camada e 4 segundos de tempo de exposição da camada (amostra 8 da Tabela 4.3). As proporções em massa da peça na Figura 38 (b) são de 61,92% de zircônia, 18,57% de n-metil-2-pirrolidona, 6,19% de xilol; 12,38% de resina e 1% de ácido esteárico e parâmetros de impressão: 0,05 mm de espessura de camada e 5 segundos de tempo de exposição.

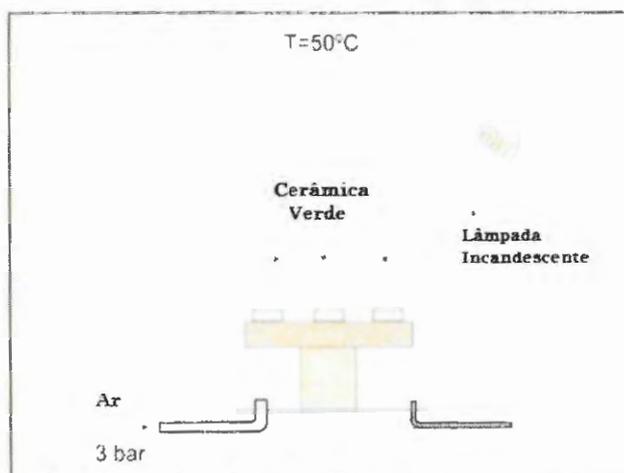
Figura 38 – Componentes de zircônia processados com manufatura aditiva.



Fonte: O Autor.

Foi proposto, também, o emprego de uma estufa de secagem sob pressão, conforme o esquema da Figura 39, para testar a possibilidade de melhoria de adesão entre as camadas e minimizar o processo de laminação (separação das camadas do componente durante a secagem). A utilização da estufa mostrou-se efetiva acarretando a diminuição da porosidade em 17% para camadas de 100 μ m e 12% para camadas de 50 μ m comparado com o componente seco a temperatura ambiente (RT).

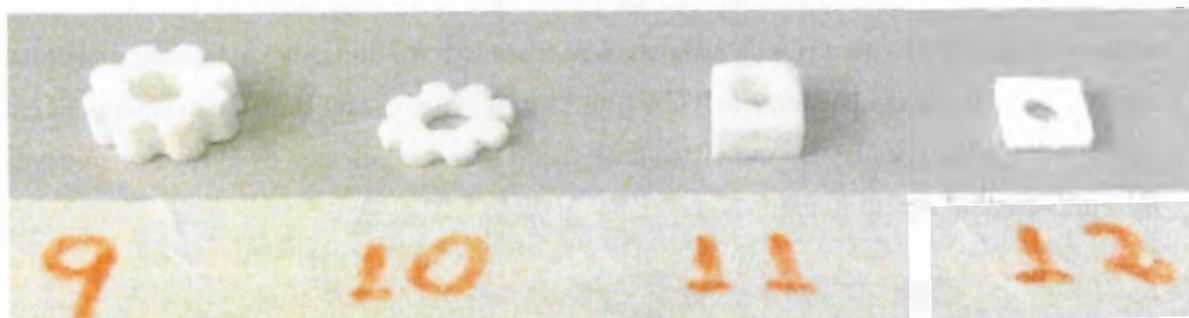
Figura 39 - Esquemática da estufa de secagem sob pressão



Fonte: o Autor.

Foram testadas variações nas composições das amostras com ácido esteárico (surfactante) e o xilol (solvente). Amostras resultantes destes testes estão apresentadas na Figura 40 e a Tabela 4.4 mostra as suas composições.

Figura 40 – Componentes cerâmicos fabricados utilizando suspensão cerâmicas com acréscimo de ácido esteárico e o xilol.



Fonte: O Autor.

Tabela 4.4 – Concentrações das amostras elaboradas testando a concentração de xilol e ácido esteárico

Amostra	Composição (% MASSA)			Solvente (% MASSA)	
	Zircônia 3Y-TZP	Resina	Ácido Esteárico	n-Metil-2- pirrolidona	Xilol
9	57,7	19,3	-	11,5	11,5
10	61,9	12,4	0,9	18,6	6,2
11	61,9	12,4	0,9	18,6	6,2
12	63,9	9,6	0,9	19,2	6,4
13	62,6	12,1	2,4	17,4	6,9
14	62,5	11,9	1	17,8	6,9

Fonte: O Autor.

4.1.5 Caracterização das Amostras

Os componentes fabricados foram analisados com microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar sua macro e microestrutura. Foi realizado também um ensaio de medição de porosidade, com base no método da imersão, experimento baseado no Princípio de Arquimedes. E ainda foi possível a fabricação de corpos de prova para um ensaio de flexão.

4.1.5.1 Densidade

Utilizando o princípio de Arquimedes, foi realizado um experimento para medir a porosidade das amostras de zircônia, baseando-se nos procedimentos descritos na norma ASTM C373 – 88 (2006).

A norma delimita o uso de uma balança de precisão de 0,01 grama, porém foi empregada balança com resolução de 0,00001g, água destilada, um *becker* e um conjunto de uma cesta com um suporte de arame, no qual foi possível manter a amostra imersa na água para fazer medições de massa suspensa. A Figura 41 mostra a estrutura utilizada para medição da porosidade.

O procedimento para medição da porosidade iniciou pesando as amostras secas, determinando a massa seca (D) de cada amostra. Para isso foi utilizada uma balança analítica com dupla escala Shimadzu, modelo AUW220D. Em seguida, as amostras foram emergidas em água destilada e colocadas em um sistema de vácuo para garantir que os poros das amostras fossem preenchidos pelo fluido.

Figura 41 – Conjunto empregado para medição da porosidade



Fonte: O Autor.

Então, com a estrutura mostrada na Figura 41, foi possível manter a amostra suspensa na água e medir a sua massa suspensa (S). Após esse procedimento a amostra foi secada em um papel levemente umedecido para a retirada da água na sua superfície e foi novamente pesada a amostra para determinar a sua massa saturada (M).

Com estes dados foi possível calcular a porosidade fechada dos materiais cerâmicos obtida empregando a seguinte equação:

$$Pf = \left[\left(1 - \frac{D}{D - S} \right) \times \left(1 - \frac{M - D}{M - S} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

Em que: Pf é a porosidade fechada; D é a massa seca; S é a massa suspensa; e M é a massa saturada;

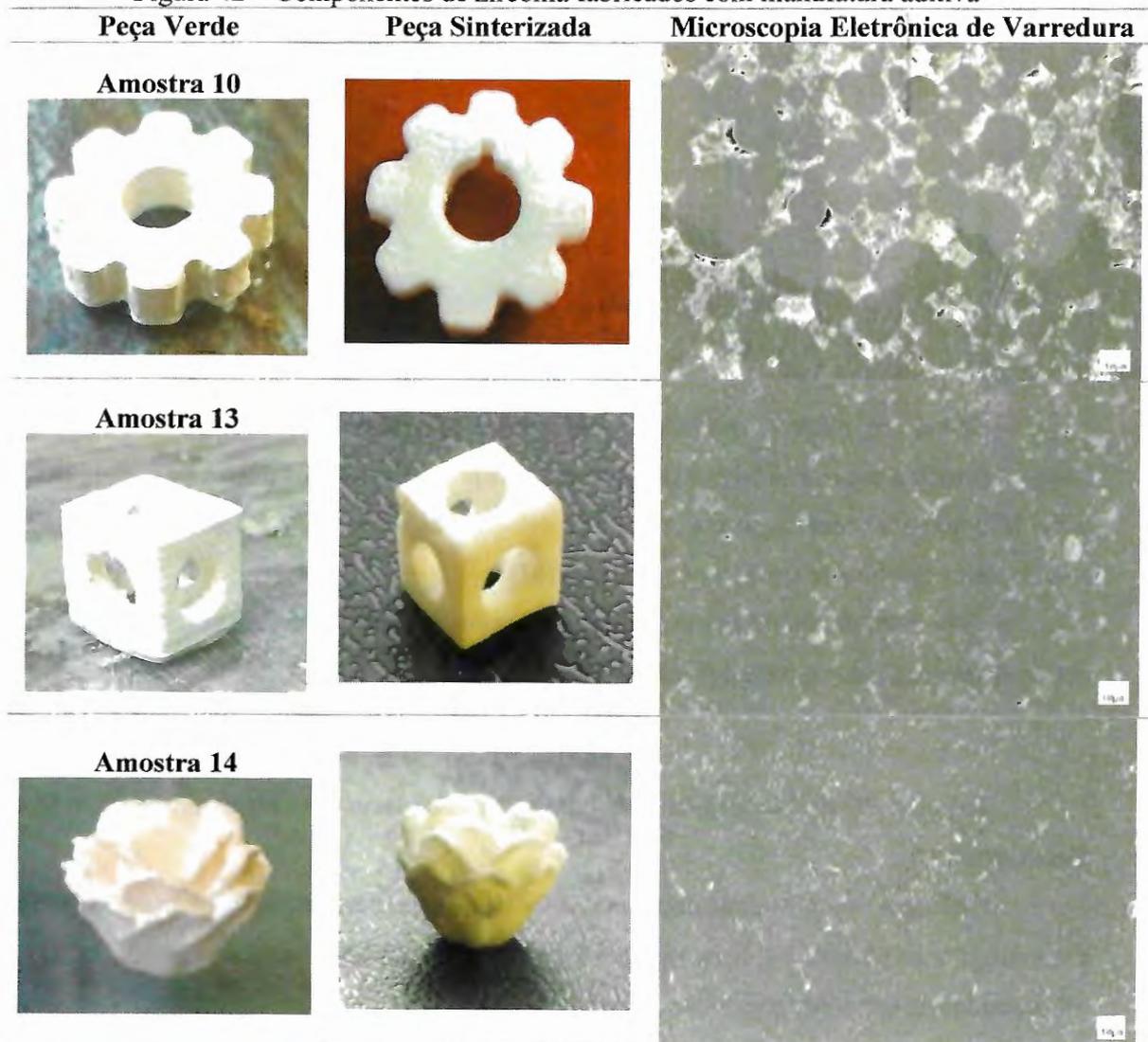
Conseguiu-se densidade máxima de 96,4%, ou seja, porosidade fechada de 3,6%, com a formulação da amostra 14. Essa amostra foi processada com espessura de camada de 50 μm e 9 segundos de tempo de exposição da camada à luz.

4.1.5.2 Análise da microestrutura do material com MEV

Algumas das amostras mostradas na Tabela 4.4 foram avaliadas com o MEV. A Figura 42 mostra as fotos das amostras e suas respectivas imagens microscópicas.

Na Figura 42 observa-se, através do MEV das amostras, melhoria na densidade na amostra, ou seja, poros menores e em menor ocorrência de acordo com que era aumentada a concentração de zircônia na suspensão. Do mesmo modo, exemplifica também, o aumento da densidade com a diminuição da espessura da camada.

Figura 42 – Componentes de zircônia fabricados com manufatura aditiva

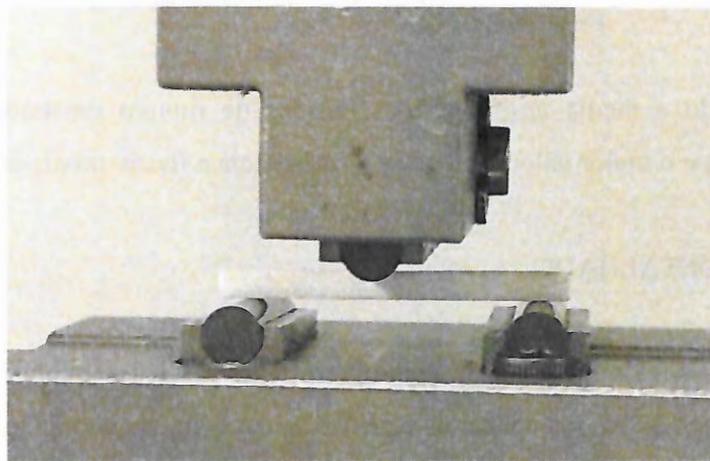


Fonte: O Autor.

4.1.5.3 Ensaio de Flexão

Foi realizado um ensaio de flexão para observar a resistência do material desenvolvido que apresentou menor porosidade total e empregando diretrizes descritas na norma ASTM C1161-02c. Utilizou-se a configuração de três pontos de fixação conforme mostra a Figura 43.

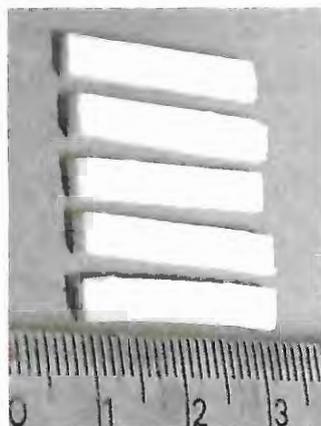
Figura 43 - Ensaio de flexão de componentes cerâmicos fabricados com manufatura aditiva



Fonte: O Autor.

Foram construídos corpos de prova empregando a composição da Amostra 14 (Tabela 4.4) devido esta composição apresentar maior densidade, com dimensões aproximadas de 24 mm de comprimento, 4 mm de largura e 2 mm de espessura, a Figura 44 mostra os corpos de prova sinterizados. Porém devido ao tipo de processo empregado houve pequenas variações dessas dimensões dos corpos de prova. A Tabela 4.5 apresenta os dados colhidos no ensaio.

Figura 44 – Corpos de prova utilizados no ensaio de flexão



Fonte: O Autor.

Tabela 4.5 – Dados colhidos do ensaio de flexão

Amostr a	Espessura x Largura [mm]	Tensão De Ruptura [MPa]
A	1,73 x 3,96	293.6632
B	2,00 x 3,83	342.5329
C	1,46 x 3,81	344.8330
D	1,64 x 3,92	263.3942
E	1,60 x 3,89	385.0771

Fonte: O Autor.

Calculando a média aritmética das tensões de ruptura mostradas na Tabela 4.5, excluindo o menor e o maior valor, obteve-se a resistência a flexão média de 337 ± 51 MPa.

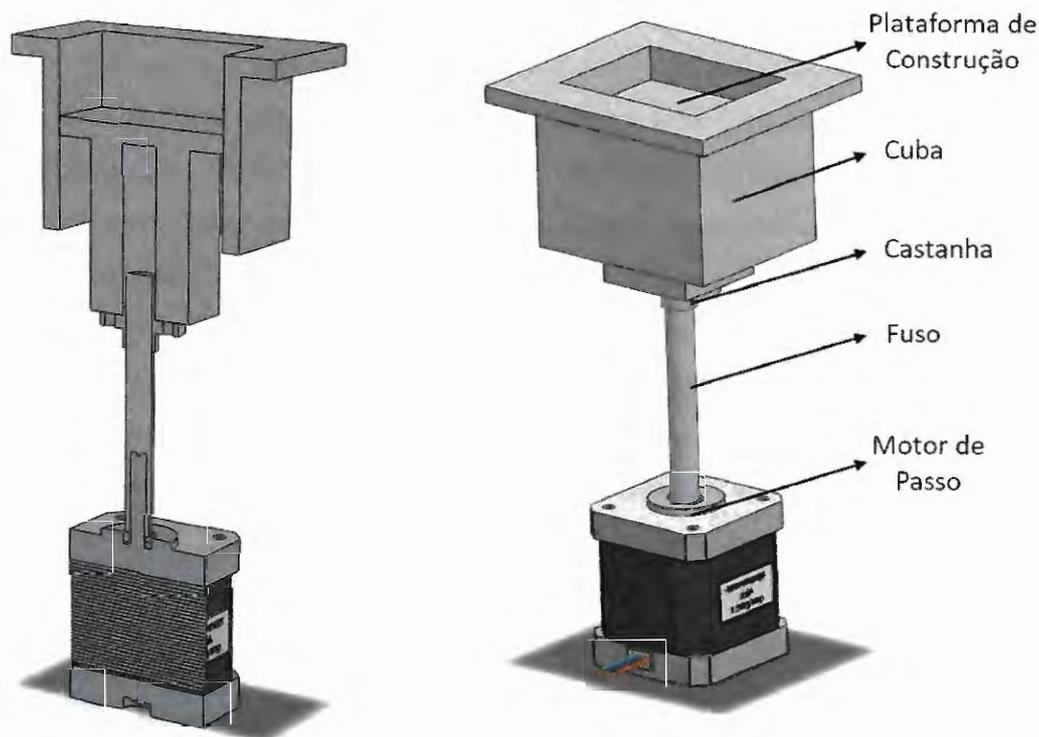
4.2 PROJETO DETALHADO

O projeto final da máquina de manufatura aditiva foi desenvolvido em um modelo virtual aplicando-se alguns dos conceitos testados e, também, aprimorando ideias concebidas com a experiência adquirida nas fases dos ensaios. Optou-se por simplificar mecanismos e buscar a praticidade do equipamento.

Dos ensaios das suspensões cerâmicas e a caracterização das amostras observou-se que quanto menor a espessura da camada menor a porosidade apresentada pelo componente fabricado, além disso, menores espessuras de camada proporcionaram melhor acabamento na peça. No protótipo, a menor espessura de camada que foi possível depositar foi de $50 \mu\text{m}$, em função desta medida ser a menor leitura que o *software* empregado é capaz de processar.

Para o projeto final da máquina sugeriu-se depositar espessuras de camadas de até $10 \mu\text{m}$. O deslocamento vertical da plataforma de construção irá definir a espessura da camada. Portanto, para dimensionar o sistema de deslocamento da plataforma de construção, visando simplicidade do mecanismo, optou-se por selecionar um fuso acoplado a um motor que permita uma precisão de no mínimo $0,1 \text{ mm}$. Para isso escolheu-se um motor de passo, com passo de ângulo de $1,8^\circ$ e fuso com passo de 2 mm , de forma que o fuso possua uma castanha no qual foi acoplado a plataforma de construção que se movimenta dentro da cuba sem folga. A Figura 45 mostra este conjunto.

Figura 45 – Conjunto do mecanismo de movimentação da plataforma de construção do projeto final



Fonte: O Autor.

Quanto ao sistema de espalhamento, realizaram-se alguns testes. No primeiro foi empregado no protótipo uma adaptação do sistema de um drive de computador, o qual possuía um motor com torque suficiente para vencer a alta viscosidade da matéria prima. Então empregou-se o sistema de uma impressora que conseguia espalhar a pasta. Porém, foi observado que no movimento da plataforma de construção adentro da cuba a pasta cerâmica não submergia em volume suficiente para um espalhamento homogêneo da camada.

Então foi idealizado o emprego de um sistema externo, que depositasse a matéria-prima sobre a plataforma de construção que em seguida era espalhada. Para isso sugeriu-se o emprego de uma bomba dosadora que depositasse a suspensão cerâmica na lateral da plataforma de construção de forma que atuasse em conjunto com uma palheta de espalhamento acoplada em um móculo linear.

Para o sistema de projeção optou-se pela aplicação de um sistema multimídia comercial que utilize tecnologia DMD, visando à simplicidade de montagem da máquina. Como



parâmetros de escolha foram observadas a potência de luz entregue dentro da faixa necessária para a cura da resina desenvolvida de pelo menos 2200 lúmens e com boa resolução.

A Figura 46 mostra o desenho virtual do projeto final idealizado. Nesta imagem visualizamos a máquina montada visando integrar seus principais componentes, de forma que possui na parte inferior uma partição fechada para alojamento de alguns componentes como o motor de passo, acoplado ao fuso e a bomba dosadora com o reservatório da matéria base empregada (suspensão cerâmica). A partição do meio é a área de trabalho onde será fabricado o componente cerâmico, estão nessa parte o conjunto da palheta de espalhamento do material, o bico de injeção da bomba dosadora fixado a uma guia linear que desloca para cima da plataforma de construção quando o material deve ser depositado e recua quando a palheta ou a projeção da luz estão funcionando. Esta área é aberta de maneira que facilite a remoção do componente fabricado, mas possui portas fabricadas em material translúcido para evitar interferência da luz externa na fabricação do componente. E acima desta área de trabalho está fixado o projetor de imagem.

Figura 46 – Projeto final da máquina de manufatura aditiva

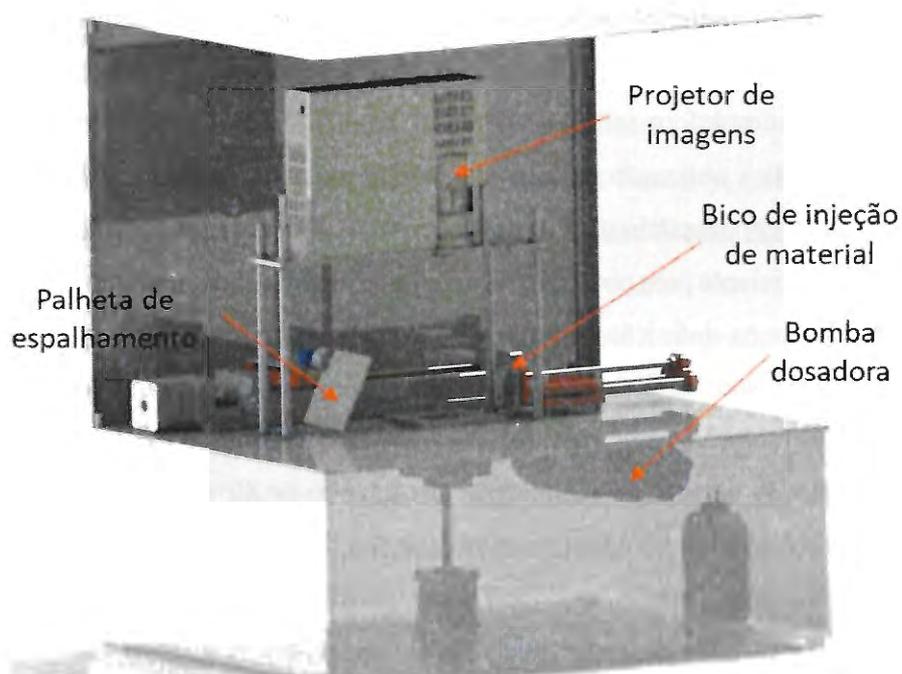


Fonte: O Autor.

A Figura 47 mostra o mesmo desenho em perspectiva, sem as portas, tendo em vista mostrar em mais detalhes os seus componentes. Além dos componentes mostrados o

equipamento deve possuir sistema de controle, formado por placas de Arduino e *drive*, semelhante ao desenvolvido no protótipo.

Figura 47 – Vista em perspectiva do projeto final da máquina de manufatura aditiva com detalhes dos seus principais componentes



Fonte: O Autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi construído um protótipo de impressora 3D, baseado na tecnologia de projeção de camada sendo possível fabricar corpos de zircônia com variadas geometrias e obtendo-se boa definição geométrica. Foram manufaturadas várias amostras, através de testes com a composição do material variando-se a quantidade de zircônia com resina e aditivos. Desses testes foram obtidos corpos cerâmicos sem a presença de trincas críticas, bolhas, delaminações e grandes deformações.

Foi necessária a utilização de solventes nas formulações, pois para o procedimento de manufatura aditiva era necessário obter uma suspensão supercarregada de pó de zircônia, porém com viscosidade suficiente para obtenção de uma fina camada. O emprego do xilol acrescentou significativa melhora na definição geométrica de peças e o emprego do n-metil-2-pirrolidona garantiu o ajuste da viscosidade da pasta.

Com a formulação, em volume, de 48% de zircônia 3Y-TZP, 47% de resina fotopolimerizável, 5% de ácido esteárico e acrescentando-se 80% de n-metil-2-pirrolidona e 37% de xilol, foi obtido um componente com retração linear de 36%, porosidade fechada de 3,4% e resistência à flexão média de 337 ± 51 MPa.

Dos testes realizados com a utilização da autoclave, que permitia a secagem dos corpos cerâmicos verdes sob pressão do ar de 3 bar, observou-se uma diminuição na porosidade do material tanto com a aplicação de camadas mais espessas, quanto nas mais finas.

Desses resultados, concluímos que o processo de manufatura aditiva com projeção de camada é um método promissor para a fabricação de materiais cerâmicos, pois permite a fabricação de componentes com as mais diversas geometrias e apresenta características que podem atender às mais diversas aplicações.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Estudo do comportamento de diferentes elementos da formulação ao espectro da radiação ultravioleta empregadas.
- Estudo do emprego da diminuição dos aditivos orgânicos, consequentemente resultando na redução da contração, aumento da densidade e resistência mecânica.
- Aplicação de outros materiais cerâmicos como matéria prima de base, ao mesmo tipo de processo.

6 REFERÊNCIAS

AMARO, MARIANA. **As impressoras 3D vão mudar o mundo e esses setores já estão se adaptando.** Revista EXAME. 31 jan. 2019. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/carreira/as-impressoras-3d-vaio-mudar-o-mundo-e-esses-setores-ja-estao-se-adaptando/>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C373 - 88: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products.** Pennsylvania, United States, 2006.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. **Projeto Integrado de Produtos.** 1º ed. Barueri, SP: Editora Manole Ltda., 2008.

BERTOLINO, L. C.; PALERMO, N.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. C APÍTULO 40: Zirconita. In: **Rochas e Minerais Industriais.** 2. ed. [s.l.] CETEM, 2008. p. 917 a 930.

BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G.; ROSEN, D.; BEESE, A. M.; CLARE, A. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>>.

BOURELL, D. L. D.; BEAMAN, J. J.; LEU, M. C.; ROSEN, D. W. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. **US-Turkey Workshop on ...**, n. 2, p. 2005–2005, 2009. Disponível em: <<http://iweb.tntech.edu/rrpl/rapidtech2009/bourell.pdf>>.

CALIGNANO, F.; MANFREDI, D.; AMBROSIO, E. P.; BIAMINO, S.; LOMBARDI, M.; ATZENI, E.; SALMI, A.; MINETOLA, P.; IULIANO, L.; FINO, P. Overview on Additive Manufacturing Technologies. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 4, p. 593–612, 2017.

CANGANI, M. P. **Caracterização microestrutural de ZrO₂ estabilizada com Y₂O₃ sinterizada a partir de pós nanocristalinos.** 2011. Universidade de São Paulo, 2011.

CASTRO E COSTA, E.; DUARTE, J. P.; BARTOLO, P. A review of additive manufacturing

for ceramic production. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 5, p. 954–963, 2017. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/RPJ-09-2015-0128>>.

CATRAMBY, M. F. **Avaliação do comportamento mecânico e da microestrutura de duas marcas comerciais de zircônia monolítica 3Y-TZP sob influência de diferentes parâmetros de sinterização**. 2014. Universidade de São Paulo, 2014.

DYM, C. L. **Engineering design: a synthesis of views**. Mesbourne, Australia: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995.

FIOCCHI, A. A. **Ciência e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: Lapidorretificação Ud de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria**. 2014. Universidade de Sao Paulo, 2014.

FUJISHIMA, M.; ODA, Y.; ASHIDA, R.; TAKEZAWA, K.; KONDO, M. Study on factors for pores and cladding shape in the deposition processes of Inconel 625 by the directed energy deposition (DED) method. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 19, p. 200–204, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.003>>.

GARDAN, J. Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. November, p. 3118–3132, 2016.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. [s.l.] Springer, 2015.

GUTIERREZ, V.; ZAMBRANO, P. Resina Acrílica de curado de alta velocidad. **Química Hoy - Chemistry Sciences**, v. 1, No. 1, p. 34, 2009.

HINCZEWSKI, C.; CORBEL, S.; CHARTIER, T. Ceramic suspensions suitable for stereolithography. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 18, n. 6, p. 583–590, 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221997001866>>.

KELLY, J. R.; DENRY, I. Stabilized zirconia as a structural ceramic: An overview. **Dental Materials**, v. 24, n. 3, p. 289–298, 2008.

LEE, B. Introduction to ± 12 Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs). n. July 2008, p. 1–13, 2008. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/dlpa008b/dlpa008b.pdf>>.

LIGON, S. C.; LISKA, R.; STAMPFL, J.; GURR, M.; MÜLHAUPT, R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. **Chemical Reviews**, v. 117, n. 15, p. 10212–10290, 2017.

MUSKIN, J.; RAGUSA, M.; GELSTHORPE, T. Three-dimensional printing using a photoinitiated polymer. **Journal of Chemical Education**, v. 87, n. 5, p. 512–514, 2010.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHSSEN, J.; GROTE, K.-H. **Projeto na engenharia fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. 6^o ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2005.

PAN, Y.; ZHOU, C.; CHEN, Y. A Fast Mask Projection Stereolithography Process for Fabricating Digital Models in Minutes. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 134, n. 5, p. 051011, 2012. Disponível em: <<http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1484473>>

RICHUSO, J. **TI DLP® Pico™ System Design: Optical Module Specifications**. Application Report. DLPA078A–February 2017–Revised August 2017.

RODRIGUES, M. R.; NEUMANN, M. G. Fotopolimerização: princípios e métodos. **Polímeros**, v. 13, n. 4, p. 276–286, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000400013&lng=pt&tlng=pt>.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C. de; SILVA, S. L. da; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SANTOS, É. M. B. **Desenvolvimento e caracterização de cerâmicas biocompatíveis a base de zircônia e ítria visando aplicações em próteses**. 2008. Universidade de São Paulo, 2008.

SANTOS, M. L. M. **Caracterização estrutural e eletrônica da zircônia pura e com defeitos e impurezas Michel**. 2011. Universidade de São Paulo, 2011.

SCHWENTENWEIN, M.; HOMA, J. Additive manufacturing of dense alumina ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 12, n. 1, p. 1–7, 2015.

SUN, C.; FANG, N.; WU, D. M.; ZHANG, X. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 121, n. 1, p. 113–120, 2005.

VAEZI, M.; CHUA, C. K. Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1–4, p. 275–284, 2011.

VOLPATO, N.; MUNHOZ, A. L. J.; COSTA, C. A.; AHRENS, C. H.; CARVALHO, J.; SANTOS, J. R. L.; SILVA, J. V. L.; FOGGIATTO, J. A.; LIMA, M. S. F. **Manufatura aditiva**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgarg Blucher, 2017.

WANG, J. C.; DOMMATI, H. Fabrication of zirconia ceramic parts by using solvent-based slurry stereolithography and sintering. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1–10, 2018.

ZOCCA, A.; COLOMBO, P.; GOMES, C. M.; GÜNSTER, J. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 98, n. 7, p. 1983–2001, 2015.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.