LUIS HILÁRIO TOBLER GARCIA

**DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE UMA MINI-IMPRESSORA 3D PARA
CERÂMICAS.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquerio

São Carlos

2010

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G216d Garcia, Luis Hilário Tobler
Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D
para cerâmicas / Luis Hilário Tobler Garcia ; orientador
Benedito de Moraes Purquerio. -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto
Mecânico) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2010.

1. Processos de fabricação - engenharia mecânica -
protótipo. 2. Impressão tridimensional. 3. Cerâmica.
4. Prototipagem rápida. 5. Metodologia de projeto.
6. Mini impressora 3D. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Bacharel LUÍS HILÁRIO TOBLER GARCIA.

Dissertação defendida e julgada em 14/01/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **BENEDITO DE MORAES PURQUERIO - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **CARLOS ALBERTO FORTULAN**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **JOSE HIROKI SAITO**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

A todos aqueles que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por que com ele todas as coisas são possíveis;

Agradeço a minha família, em especial, ao meu pai, por estar ao meu lado nesta jornada;

À minha esposa, Marilena, por me apoiar em todas as minhas decisões;

A minha pequena filha Maria Eduarda, cuja existência me motiva e me faz feliz;

Ao grande amigo Ildeberto de Genova Bugatti e toda a sua família, que não economizaram esforços para me ajudar a realizar este sonho;

Ao Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquerio, cujos ensinamentos e orientações avançaram além de minha vida acadêmica;

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan, cuja orientação, simpatia e amizade fizeram toda a diferença;

Ao pesquisador e amigo Edelto Antunese, cujo exemplo, conduta e ensinamentos colocaram a mim e a minha família ainda mais próximos de Deus;

Ao mestre Luis Antonio Oliveira Araújo, pela atenção e boa vontade empenhados em minha escrita;

Ao Sr. José Carlos Risardi e Sr. José Carlos Botelho, um grande obrigado por todo o esforço e ajuda na fabricação desta máquina;

Ao amigo Nelson Candido de Azevedo Filho pelo auxílio técnico em eletrônica;

Aos amigos Álvaro Fogassa e Paulo Mortari pelas informações técnicas e importantes sugestões relativas ao projeto;

Aos colegas de laboratório, Claudia, Rogério, Romeu, Amaury, Rony, Renan e todos que sempre estavam dispostos a ajudar;

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

RESUMO

GARCIA, L. H. T. (2010). **Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para cerâmicas**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O trabalho trata do estudo do processo de impressão tridimensional e desenvolvimento de uma impressora para a produção de corpos-de-prova cerâmicos. A técnica de impressão tridimensional pertence ao grupo de prototipagem rápida e consiste na obtenção de um corpo sólido a partir de um modelo digital de três dimensões, através do fatiamento do modelo tridimensional e da impressão seqüencial de suas respectivas fatias. Durante o processo de impressão, deposita-se um ligante sobre camadas sucessivas de pó e em cada camada, o ligante consolida o pó no formato bidimensional da fatia, que por fim soma-se as outras fatias subseqüentes, consolidando assim o formato tridimensional do modelo. Os equipamentos convencionais de impressão 3D utilizam pós a base de gesso e acrílico, onde o ligante, a base de água, fornece a primeira adesão química; posteriormente é infiltrada uma resina para fornecer uma ligação com o pó de acrílico. Na impressão de cerâmica a base de alumina ou zircônia, o desenvolvimento de ligantes tem de ser realizado visando à adesão química e orgânica combinadas antes da sinterização. Neste projeto, uma mini impressora 3D para corpos de prova foi desenvolvida e com ela foram produzidos corpos de geometria simples e seção constante, cujo projeto, custo, manutenção simplificada e econômica possibilita também o emprego de materiais agressivos nos ligantes, com risco de danificação de componentes, a exemplo de ácido fosfórico, porém com baixo custo de recuperação. Foram analisados diversos tipos pelo dimensionamento de seus aglomerados, fluidez e densidade. Obteve-se pó a base de gesso por R\$15,00 o quilograma. Corpos de prova foram analisados com relação à resistência mecânica por flexão de três pontos, densidade, porosidade aparente e imagens por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Um protótipo de uma mini-impressora foi idealizado, projetado e fabricado, soluções originais e econômicas foram propostas e na sua validação alguns conceitos necessitam de melhorias, ainda assim foram obtidos resultados promissores. Foi desenvolvida uma formulação de pó baseado em gesso que teve o custo de aproximadamente 5% do produto importado.

Palavras-chave: impressão tridimensional; cerâmica; prototipagem rápida; metodologia de projeto; mini impressora 3D.

ABSTRACT

GARCIA, L. H. T. (2010). ***Development and manufacturing of mini 3D printer machine for ceramics***. Dissertation – School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2010.

The work studies the three-dimensional printing process and the development of a 3D printer to produce ceramic specimen. The 3D printing technique belongs to the rapid prototype group and consists in obtaining a solid body from a three-dimensions digital model, through the slicing of the three-dimensional model and the sequential printing of their respective slices. During the printing process, a binder is deposited upon successive powder layers, and in each layer, the binder consolidates the powder into the bi-dimensional shape of the slice, which ultimately adds to the other slices that followed, consolidating the three-dimensional shape model. The conventional 3D printing equipments uses powder based in gypsum and acrylic, where the water-based binder, provides the first chemical bind; subsequently is infiltrated a resin to provide a binding with the acrylic powder. In the ceramic printing based on alumina or zirconia, the development of binders must be accomplished looking for a organic and chemical bind before sintering. In this project, a mini 3D printer for ceramic specimens was developed and built, with it were be produced bodies of simple geometry and constant section, which design, cost and simplified maintenance and cost also enable the use of aggressive materials in binders, with the risk of components damage, such as phosphoric acid, but with low cost to recovery. Were analyzed several types of powders by the sizing of its clusters, fluidity and density. Were obtained gypsum powder for \$ 7.00 a kilogram. The specimen were analyzed in relation to the mechanical strength by three-point bending, density, apparent porosity and images by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). A prototype of a mini 3D printer was designed, engineered and manufactured, unique and economical solutions have been proposed and in its validation some concepts need of improvement, yet promising results were obtained. It was developed a powder formulation based on gypsum that has cost about 5% of the imported product.

Keywords: Three-dimensional printing; ceramic; rapid prototype; design methodology, 3D print.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Processo de impressão tridimensional (LTC-SEM-EESC-USP, 2006).	24
Figura 2.1 – Vida de um produto (PAHL, 2005).	28
Figura 2.2 – Fases do processo de projeto de um produto (BACK, 1983).....	29
Figura 2.3 – Atividades de projeto – fases primárias (BACK, 1983).	30
Figura 2.4 – Atividades de projeto nas diferentes etapas de desenvolvimento de um produto (BAXTER, 1998).	32
Figura 2.5 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto (PAHL, 2005).	33
Figura 2.6 – Funil de decisões (BAXTER, 1998).	35
Figura 2.7 – Correlação entre atividades de projeto e possíveis ferramentas a serem utilizadas (BAXTER, 1998).	36
Figura 2.8 – Quadro morfológico (PAHL, 2005).	38
Figura 3.1 – Estratégia de projeto proposta.	53
Figura 3.2 – Procedimento de tomada de decisão resumido.....	54
Figura 3.3 – Estrutura tipo ponte (SLOCUM, 1992).	65
Figura 3.4 – Definição de resolução, acuracidade e repetibilidade (SLOCUM, 1992).	67
Figura 3.5 – Idéias sobre organização da movimentação dos eixos.	69
Figura 3.6 – Conceitos de mini-máquinas de impressão 3D.	69
Figura 3.7 – Conceitos escolhidos para o projeto do protótipo de uma mini-máquina de impressão 3D.....	70
Figura 3.8 – Esquema eletrônico do projeto HM3DP	77
Figura 3.9 – Placa principal microprocessada.....	78
Figura 3.10 – Placa de chaveamento de sinais.....	79
Figura 3.11 – Esquema da mini-impressora 3D montada.....	81
Figura 3.12 – Desenho em perspectiva do protótipo da mini-impressora 3D.....	81
Figura 3.13 – Seqüência da montagem (soldagem) da estrutura do protótipo da mini-impressora 3D	83
Figura 3.14 – Corpo principal da caixa de confecção da peça	85
Figura 3.15 – Partes da caixa da confecção da peça e do pistão.....	86
Figura 3.16 – Partes do sistema de guia e transmissão de movimento.....	87
Figura 3.17 – Desenho do conjunto do sistema de transmissão e guia do movimento.....	87
Figura 3.18 – Caixa de confecção da peça montada	88
Figura 3.19 – Mesa de impressão.....	88
Figura 3.20 – Vista frontal do reservatório de pó virgem	89
Figura 3.21 – Vista inferior do reservatório de pó virgem	89
Figura 3.22 – Motor e rolo de nivelamento do pó em detalhe.....	90

Figura 3.23 – Sistema mecânico de movimentação	90
Figura 3.24 – Cremalheira sincronizadora em detalhe	91
Figura 3.25 – Engrenagem da cremalheira sincronizadora	91
Figura 3.26 – Placas eletrônicas de automação da mini-impressora 3D	92
Figura 4.1 – Protótipo de uma mini máquina de impressão 3D	93
Figura 4.2 – Imagens em MEV das amostras E e Padrão.....	97
Figura 4.3 – Classificação granulométrica entre malhas #200 e #400 mesh.....	97
Figura 4.4 – Classificação granulométrica entre malhas #80 e #200 mesh.....	98
Figura 4.5 – Ilustração das superfícies dos corpos de controle prototipado	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cotações iniciais para o projeto	57
Tabela 2 – Cotações para o projeto	59
Tabela 3 – Formulações do pó para prototipagem.....	95
Tabela 4 – Amostras por classificação granulométrica e caracterização.....	96
Tabela 5 – Variação dimensional e densidade relativa dos prototipados	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro morfológico da mini impressora 3D	64
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
β -TCP	Beta-tricalcio Fosfato
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABS	Acrinolitrla Butadieno Estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CMC	Carboximetilcelulose
DC	Direct Current
DIN	Deutsche Ingenieurnormen
DSPC	Direct Shell Production Casting
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FDM	Fused Deposition Modelling
FISP	Fases Integradas da Solução de Problemas
HM3DP	Home Made 3D Print
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
LSD	Laywise Slurry Deposition
LTC	Laboratório de Tribologia e Compósitos
MESCRAI	Modificar, Eliminar, Substituir, Combinar, Rearranjar, Adaptar e Inverter
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MJT	Multi Jet Modeling
PMMA	Polimetil Metacrilato
PVB	Polivinil Butiral
SDM	Shape Deposition Manufacturing
SEM	Scanning Electron Microscopy
SFF	Solid Freeform Fabrication
SGC	Solid Ground Curing
SLS	Seletive Laser Sintering
STL	StereoLithography
USP	Universidade de São Paulo
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 - Motivação	25
1.2 - Objetivos do trabalho	26
1.3 - Descrição do trabalho	26
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 - Metodologia de projeto	27
2.2 – Materiais cerâmicos	39
2.3 – Biomateriais	40
2.4 – Biocerâmicas	41
2.5 – Prototipagem rápida e impressão 3D	42
2.6 – Prototipagem rápida e implantes ósseos.....	42
2.7 – Máquinas de prototipagem rápida	45
2.7.1 – Tipos	46
2.7.1.1 – Estereolitografia.....	46
2.7.1.2 – Manufatura de objetos em lâminas	46
2.7.1.3 – Sinterização seletiva a laser	47
2.7.1.4 – Modelagem por deposição de material fundido	47
2.7.1.5 – Cura sólida na base.....	48
2.7.1.6 – Conformação próxima ao formato final via laser	48
2.7.1.7 – Impressão 3D por jato de tinta.....	49
2.7.2 – Modelos tridimensionais.....	49
2.7.3 – Representação de modelos tridimensionais em STL.....	50
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 - Etapas de projeto.....	54
3.1.1 – Identificação da demanda	54
3.1.2 – Estudo da viabilidade técnica e econômica	55
3.1.2.1 – Reconhecimento da fase do ciclo de vida das impressoras 3D	55
3.1.2.2 – Percepção da capacidade EESC / USP São Carlos	60
3.1.2.3 – Conclusão da análise de viabilidade.....	61
3.1.3 – Projeto conceitual de uma <i>mini-impressora 3D</i>	61
3.1.3.1 – Delimitação do projeto	61
3.1.3.2 – Quadro morfológico	62
3.1.3.3 – Conceito	68
3.1.4 – Projeto detalhado	70
3.1.4.1 – Definição do conjunto de impressão a jato de tinta.....	72

3.1.4.2 – Projeto da estrutura da mini-impressora 3D.....	72
3.1.4.3 – Projeto da caixa de confecção da peça	73
3.1.4.4 - Projeto do suporte do conjunto de impressão a jato de tinta	73
3.1.4.5 - Projeto do sistema de mecânico de movimentação	73
3.1.4.6 - Projeto da mesa de impressão	75
3.1.4.7 – Adaptação do conjunto de impressão a jato de tinta.....	76
3.1.4.8 – Projeto do sistema eletrônico de movimentação.....	76
3.1.4.8.1 – Placa principal microprocessada.....	78
3.1.4.8.2 – Placa de chaveamento de sinais.....	79
3.1.4.8.3 – Driver unipolar.....	80
3.1.4.8.4 – Driver bipolar.....	80
3.1.4.8.5 – Conjunto de alimentação.....	80
3.1.4.9 – Montagem do conjunto	80
3.1.4.10 – Planejamento da fabricação do protótipo.....	82
3.1.5 – Fabricação do protótipo.....	82
3.1.5.1 – Estrutura.....	82
3.1.5.2 – Caixa de confecção da peça.....	84
3.1.5.3 – Mesa de impressão	88
3.1.5.4 – Suporte do conjunto de impressão a jato de tinta	89
3.1.5.5 – Sistema mecânico de movimentação	90
3.1.5.6 – Sistema eletrônica de movimentação	92
4 – RESULTADOS.....	93
4.1 – O protótipo da mini-impressora 3D.....	93
4.2 – Ensaios	94
4.2.1 – Formulação	94
4.2.2 – Corpos de prova de controle	99
4.2 – Validação do protótipo	100
5 - CONCLUSÕES.....	101
5.1 – Sugestões para trabalhos futuros.....	101
6 - REFERÊNCIAS	103

1 - INTRODUÇÃO

A impressão tridimensional é um processo inovador de prototipagem rápida que diminuiu consideravelmente o tempo de manufatura de modelos e de partes de protótipos e da fabricação de ferramentas de máquinas. A fabricação de protótipos através dos processos convencionais de fabricação envolve muitas horas de máquinas, tempo excessivo com passos lentos e custo alto que, impressoras tridimensionais realizam em um único passo, em tempo reduzido. A redução de tempo e de custo proporcionada pela impressão tridimensional revolucionou a prototipagem e a manufatura (HEINZL; HERTZ, 1985).

O processo de produção de protótipos consiste em projetar e manufaturar o modelo de um produto ou peça a ser construído. Apesar dos métodos antigos serem simples quando comparados com os métodos atuais, torna-se inviável quando se pretende criar formas geométricas complexas, vistas em cortes, ou quando o tempo de manufatura precisa ser reduzido. Além de possibilitar a criação de peças em um curto espaço de tempo, a impressão tridimensional possibilita a fabricação de peças precisas, tal precisão está relacionada a necessidade dos grãos do pó utilizado serem inferiores a 100,0µm.

O processo de impressão tridimensional engloba a fabricação de uma peça a partir de um modelo digital tridimensional em CAD. Este modelo é então dividido em camadas por um algoritmo de fatiamento, onde cada fatia possui aproximadamente 150,0µm de espessura, criando assim informações detalhadas sobre cada corte transversal. A máquina de impressão tridimensional inicia o processo de construção de peça depositando uma camada de pó, sobre a qual o fluido ligante é depositado na forma da seção da peça, representando a fatia inicial do modelo, muito parecido com uma impressora de jato de tinta quando imprime em uma folha de papel. O reservatório de pó provê uma nova camada de pó que é depositada sobre a camada anterior e novamente o fluido ligante é depositado, compondo a fatia seguinte do modelo que se consolida com a anterior através desse ligante. O processo é repetido para todas as camadas da peça até que ela seja impressa por completo. Uma vez a peça impressa totalmente, o pó que não recebeu fluido ligante é removido, a peça é limpa e o protótipo está pronto. Neste método podem ser usados pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (GORNÍ, 2001). Havendo a necessidade de agregar uma maior resistência mecânica à peça, ela pode, após o término do processo, ser sinterizada e ou reforçada com outros materiais. A Figura 1.1 ilustra de forma didática o processo de impressão tridimensional, o deslocamento do pó virgem pelo rolo de pó na etapa 1, o retorno do rolo e a deposição de ligante na etapa 2 e a finalização do processo na etapa 3. A impressão tridimensional tem como vantagem adicional sobre a maioria dos processos de prototipagem a não necessidade de imprimir o material suporte, pois o próprio

pó sem ligante suporta a peça em impressão. O pó (suporte) é removido, peneirado e seco, e pode ser reutilizado para outra impressão 3D.

Figura 1.1 - Processo de impressão tridimensional. (LTC-SEM-EESC-USP, 2006)

Manufatura rápida de materiais cerâmicos

A prototipagem rápida é uma das possibilidades da manufatura rápida e a prototipagem rápida de materiais cerâmicos, por sua vez, tem sido investigada intensivamente nos últimos anos, apesar de se tratar de uma técnica moderna que está em fase inicial de desenvolvimento. A baixa resistência mecânica e a baixa densificação são os obstáculos relativos à impressão tridimensional de cerâmicas a serem superados no momento. Dentre os métodos estudados, destacam-se os seguintes:

- *Laywise Slurry Deposition – LSD*, é um processo onde uma barbotina de cerâmica com polímero polimerizável a laser é prototipada (ligando as partículas cerâmicas); em seguida o material não exposto ao laser é removido por lixiviação e o material conformado é sinterizado;
- *Selective Laser Sintering – SLS*, quando pós cerâmicos (ou ligante entre os pós cerâmicos) são pré-sinterizados por incidência de laser;
- *Shape Deposition Manufacturing – SDM* - baseada no princípio de adição-subtração onde um corpo poroso é preenchido com barbotinas cerâmicas tipo *gelcasting* e cimentos e a matriz polimérica (suporte) é removida posteriormente por degradação térmica;
- *Fused Deposition Modelling – FDM*, quando ocorre a extrusão em camadas de uma massa cerâmica que contém fase líquida solúvel, que se volatiliza parcialmente entre

as deposições, conferindo estabilidade dimensional e adesão com a camada subsequente.

- *Impressão 3D*, que emprega o *spray* de ligante sobre pós cerâmicos; posteriormente a peça pode ser sinterizada; o método também se aplica à prensagem isostática para melhorar a densificação. (LAOUI et al. 2005).

A prototipagem cerâmica está sendo aplicada cada vez mais na fabricação de componentes cerâmicos de formas complexas. Como exemplos de materiais cerâmicos podem ser citados os carbonetos (SiC - carboneto de silício), os nitretos (Si_3N_4 - nitreto de silício), os óxidos (Al_2O_3 - óxido de alumina) e os silicatos (ZrSiO_4 - silicato de zircônio) (BARSOUM, 1997).

A impressão tridimensional é potencialmente de grande interesse na área de biomateriais onde a presença de poros é desejável, bem como a morfologia, distribuição e interconexão dos poros. Nesta área os produtos em destaque são a alumina, a hidroxiapatita, a zircônia e os cimentos baseados em apatita. (HÜBNER; DÖRRE, 1984) (EANES, 1980; WILSON, C.E et al. 2003; GIBSON, L. 2003).

Quando a cerâmica é um gesso ou cimento, o ligante é baseado em água, e após a impressão de uma camada, é iniciada uma reação química que fornece a resistência inicial ao manuseio da peça. Posteriormente, a superfície da peça pode receber uma pintura com adesivo que penetra na peça prototipada conferindo a devida resistência mecânica para acabamento superficial, pintura, furações e manuseio de montagem.

1.1 - Motivação

Embora esta tecnologia tenha sido extensivamente empregada no exterior, no Brasil não existe nenhum fabricante de equipamentos de prototipagem rápida, particularmente para materiais cerâmicos. O Laboratório de Tribologia e Compósitos da Escola de Engenharia de São Carlos têm investigado há anos a aplicação da prototipagem rápida em projetos de produtos, em aplicações médicas e também no projeto e fabricação de máquinas, processos e produtos cerâmicos. Certamente para a comunidade acadêmica e empresarial, é extremamente relevante o desenvolvimento completo da tecnologia de prototipagem rápida de cerâmica através da impressão tridimensional, a saber: o processo, a máquina e os recursos humanos envolvidos. Criando, portanto a possibilidade de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento de centros de pesquisa, de pequenas e médias empresas, assim como de profissionais liberais, produzirem protótipos de modelos digitalizados em computador para os mais diversos fins.

1.2 - Objetivos do trabalho

Objetivo principal

- Estudo do processo de prototipagem rápida de cerâmicas aplicado ao desenvolvimento de impressoras 3D

Objetivos específicos

- Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para impressão tridimensional de cerâmicas;
- Estudo de técnicas em metodologia de projeto e suas aplicações na concepção, desenvolvimento e projeto detalhado de uma mini-impressora 3D;
- Estudo dos materiais atualmente empregados na impressão 3D;

1.3 - Descrição do trabalho

Para fundamentar o trabalho é inicialmente realizada no Capítulo 2 uma revisão da literatura, com foco inicial na metodologia de projeto, uma introdução aos materiais cerâmicos, o estudo do tema Biomateriais, o aprofundamento do tema Biocerâmicas, a relação entre prototipagem rápida e impressão 3D, uma abordagem sobre a relação entre prototipagem rápida e implantes ósseos, e a descrição das principais tecnologias de prototipagem rápida.

No capítulo 3, materiais e métodos, são descritas as etapas do projeto, partindo da identificação da demanda e pelo estudo da viabilidade técnica e econômica, passando pelo projeto conceitual e detalhado de uma mini-impressora 3D, finalizando no detalhamento da fabricação do protótipo.

No capítulo 4 são expostos os resultados relacionados ao projeto da mini-impressora 3D, ao estudo de pó em gesso para prototipagem e a validação da mini-impressora 3D.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são abordados a metodologia de projeto, materiais cerâmicos, biomateriais, biocerâmicas, prototipagem rápida, impressão 3D bem como a relação entre a prototipagem rápida e os implantes ósseos. Observa-se que a revisão não tem como objetivo o estudo intensivo do tema metodologia de projeto e sim uma visão resumida das teorias relacionadas e das vantagens oferecidas para a área de projeto mecânico. Para isto, o estudo baseia-se em técnicas e ferramentas de metodologia de projeto, com as quais, foi desenvolvido o plano de trabalho com o objetivo de construir uma mini-impressora 3D para a impressão tridimensional, visando a concepção, assim como a tomada de decisões e considerações iniciais. No item 2.1 é abordado especificamente o tema Metodologia de Projeto, onde constam as ferramentas e métodos para a análise e o desenvolvimento do projeto, fazendo-se uso de referências específicas (Back (1985), Baxter (1998), Norton (2006), Pahl (2005)). O item 2.2 tem como objetivo uma introdução aos materiais cerâmicos, suas características, classificações, sub-divisões e aplicações, visando o estudo dos materiais empregados na impressão 3D. O estudo do tema Biomateriais no item 2.3, define o conceito de biomateriais, aplicações, materiais e características. Em adição ao tópico Biomateriais fez-se necessário o aprofundamento do tema Biocerâmicas, no item 2.4, que envolve a relação entre biomateriais e cerâmicas, pois estas materiais possuem grande relação com a prototipagem rápida e a impressão 3D, item 2.5. Possibilitando a abordagem da relação entre prototipagem rápida e implantes ósseos, descrita no item 2.6 e a finalização do capítulo com uma descrição das principais tecnologias de prototipagem rápida, no item 2.7.

2.1 - Metodologia de projeto

O processo de criação, adaptação ou alteração de um produto ou serviço, envolve uma demanda ou necessidade, demanda esta que é definida como a origem da atividade de projeto (PAHL, G. et al. 2005).

Segundo Lövgren (2002), a metodologia de projeto foi oficializada como campo de estudo e pesquisa á partir da primeira conferência sobre o assunto, ocorrida na cidade de Londres, Inglaterra, em 1962. Porém, a aplicação de seus conceitos na solução de problemas é bem mais antiga e remonta aos tempos de Leonardo da Vinci e aos períodos da segunda guerra mundial.

Também definida como as ações que orientadas convergem para o atendimento das necessidades humanas (BACK, 1985), a atividade de projeto diferencia o projeto de

engenharia de outros projetos pelo grau de complexidade com que é aplicada, cuja aplicação envolve o uso de procedimentos de otimização, decisão e prognósticos.

Com grande significado em um ciclo de vida de um produto, a atividade de projeto está presente em todas as etapas do ciclo (Figura 2.1) (PAHL, G. et al. 2005).

Contendo diversos modelos morfológicos de projeto, a literatura oferece entre eles o modelo descrito por Back (1985), o qual sugere a divisão das atividades em duas etapas, etapas primárias do projeto e etapas relacionadas ao ciclo produção-consumo. As etapas primárias do projeto têm relação com as atividades de viabilidade técnica do produto, concepção, identificação do mercado consumidor, chegando ao detalhamento do projeto. Já as etapas relacionadas ao ciclo produção-consumo envolvem as atividades relacionadas ao processo de fabricação, os serviços de apoio e o descarte ou reciclagem do produto (Figura 2.2).

Cada etapa possui sua sequência de desenvolvimento, a qual inclui técnicas e ferramentas. As etapas iniciais dependem da equipe de projeto e marketing, enquanto as etapas seguintes, exigem a inclusão de outras equipes, tais como, produção, manufatura, vendas, fornecedores e outros (BACK, 1985).

Figura 2.1 – Vida de um produto (PAHL, 2005).

Fases do desenvolvimento do produto

- Fase 1 – Inicia com a identificação da necessidade, a qual nasce nas inovações tecnológicas, nos avanços científicos, nos fatores econômicos ou nas oportunidades de mercado, o *estudo de viabilidade*, tem como objetivo visualizar os problemas e limitações do projeto. Uma vez que a necessidade, a viabilidade técnica e a viabilidade financeira tenham sido identificadas, inicia-se o projeto conceitual, o qual, por meio de técnicas e ferramentas indica as soluções mais adequadas e potencialmente viáveis;
- Fase 2 – Envolve o *projeto preliminar*, onde se estuda a configuração, os parâmetros do projeto e a viabilidade física, as simulações computacionais, as faixas operacionais para os parâmetros estudados e se possível a construção de um protótipo para a validação do projeto;

Figura 2.2 – Fases do processo de projeto de um produto (BACK, 1983).

- Fase 3 – Responsável pelo *detalhamento do projeto*, onde ocorre a seleção dos componentes, as descrições das peças, o dimensionamento de todas as partes e a

documentação a partir de desenhos técnicos. Esta fase visa a obtenção de todas informações necessárias para a fabricação do produto;

- Fase 4 – Através de *revisões e teste*, tem como objetivo a análise dos limites do funcionamento e do desempenho do produto com o objetivo do aprimoramento e re-trabalho do produto até que um resultado final satisfatório seja obtido;
- Fase 5 – Nesta fase o processo de *planejamento da produção* do produto é estudado e envolve a participação de equipes de produção, manufatura, fornecedores e outros;
- Fase 6 – Aborda o *planejamento de mercado*, onde a viabilidade comercial e a logística de distribuição são de grande importância;
- Fase 7 – O *planejamento do consumo* complementa o estudo da viabilidade com a coleta de informações no campo para o aperfeiçoamento do projeto;
- Fase 8 – Com forte relação com o ciclo de vida do produto e o grau de flexibilidade em sua utilização, o *planejamento da obsolescência* vai de encontro com a necessidade de planejar a retirada de um produto do mercado, nem sempre devido a desgaste técnico, mas muitas vezes por defasagem tecnológica ou mesmo devido as tendências de mercado.

A Figura 2.3 resume as considerações comentadas nas fases iniciais.

Figura 2.3 – Atividades de projeto – fases primárias (BACK, 1983).

As diversas particularidades de todo produto estão intimamente ligadas ao formato e atividades do projeto, mas podem-se observar fases comuns no desenvolvimento da grande maioria dos projetos (BACK, 1985).

Descrita como uma ação complexa, a organização das atividades de projeto depende de uma série de particularidades, entre elas, a filosofia da empresa, o produto a ser projetado, o pessoal envolvido, os custos, os riscos e as incertezas (BAXTER, 1998). Outros fatores de grande benefício para a atividade de projeto são as realimentações, ou reciclagens, e as antecipações, fatores que melhoram o produto, devido a um aprofundamento do conhecimento e da detecção de oportunidades e problemas que muitas vezes acabam despercebidos durante as primeiras etapas do desenvolvimento do projeto.

A Figura 2.4 mostra as atividades de projeto estruturadas nas diferentes fases de desenvolvimento de um produto.

Baxter (1998) sugere que a configuração do projeto está baseada em quatro fases, o desenvolvimento do projeto inicia com a escolha do conceito e finaliza com o protótipo completamente desenvolvido e testado, o qual compreende essas quatro fases:

- Geração das idéias, explorando todas as possibilidades da fabricação o produto;
- Seleção das idéias, comparando-se as especificações do projeto, com o objetivo de selecionar-se a melhor idéia;
- Análise das possibilidades de falha e seus efeitos, para determinar os possíveis pontos de falha do produto;
- Construção e teste do protótipo, para validar ou invalidar o projeto. (BAXTER, 1998, p. 231).

Segundo Pahl (2005), não existe um modelo único para o projeto do produto. Baseado na análise das atividades de projeto, suas organizações e métodos mais comuns, o autor propõe três conjuntos de procedimentos e métodos mais comuns, como segue.

- Procedimentos e métodos da engenharia de sistemas: engenharia de sistemas define que um produto é um sistema formado por um conjunto de elementos ordenados e interligados segundo suas características e delimitado pelo seu ambiente de aplicação;

Figura 2.4 – Atividades de projeto nas diferentes etapas de desenvolvimento de um produto (BAXTER, 1998).

- O método da análise de valor, segundo a DIN 69910 (*Deutsche Ingenieurnormen*). O método de análise de valor tem como objetivo a redução de custos de um produto e, conseqüentemente, do projeto. Esse método possui uma série de ferramentas e procedimentos de análise contábil, tais como, a base de cálculo dos custos os métodos de identificação dos custos, a fixação das metas de custos as regras para minimização dos custos, entre outros;
- Métodos de projeto segundo as diretrizes da VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*). O método de projeto, de acordo com as diretrizes da VDI exhibe em diferentes etapas de um projeto de produto a fatura em métodos de análise. Destacam-se a VDI 2222, que define procedimentos e métodos no desenvolvimento de novos produtos, e a

VDI 2221, Figura 2.5, que define um procedimento geral, atendendo não apenas a novos produtos, mas a um grande número de aplicações. Este método tem um papel motivador para o desenvolvimento de um projeto.

Figura 2.5 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto (PAHL, 2005).

Pahl (2005) define que o procedimento geral para o desenvolvimento de um projeto pode ser classificado em quatro fases:

- Planejamento e esclarecimento da tarefa (Fase I). Devido a uma necessidade comercial, tecnológica ou de qualquer outra origem, há o surgimento de um elemento motivador ou demanda por assim dizer, a partir deste dá-se início ao projeto. Essa fase tem como característica a qualificação e quantificação exata da tarefa em uma lista de requisitos, gerando assim informações, as quais, devem ser atualizadas durante todo o projeto;
- Concepção (Fase II). Fase responsável por uma geração de possíveis soluções de projeto, soluções que devem preencher a lista de requisitos exigidos na fase anterior.

Tendo em vista que pode haver mais de uma solução que satisfaça a lista de requisitos, torna-se necessário, nestes casos, a geração de novos critérios de seleção.

- Anteprojeto (Fase III). Uma vez que uma solução venha a atender a lista de requisitos e alguns critérios de seleção, o anteprojeto avança na especificação técnica e econômica da solução selecionada;
- Detalhamento (Fase IV). Nesta fase, partindo da solução adotada, define-se entre outros, a forma, as dimensões e os componentes que formam o produto, assim como o custo envolvido. O detalhamento deve conter informações suficientes para se construir um protótipo.

Descreve-se cada etapa do trabalho por diferentes métodos, tais como, os métodos para o planejamento, a busca e a avaliação da solução, os métodos para a concepção, os métodos para o anteprojeto, os métodos para o detalhamento, os métodos para o desenvolvimento de produtos em série e modulares e os métodos para o desenvolvimento de produtos com garantia de qualidade, entre outros. Os métodos citados são ferramentas de geração de idéias, conceitos e tomada de decisão (PAHL, 2005).

De suma importância para o sucesso do projeto, as ferramentas de tomada de decisão são cruciais tanto nas fases de planejamento quanto na fase de execução do projeto. Estudos revelam que aplicando-se estudos de viabilidade técnica e econômica antes do desenvolvimento de um produto, aumenta até 2,4 vezes as chances de sucesso, nesta mesma direção, produtos bem dimensionados tem um aumento de 3,3 vezes em suas chances de sucesso (BAXTER, 1998).

Baxter (1998) descreve o funil de decisões como uma das ferramentas usadas durante o desenvolvimento qualitativo do projeto de um produto. Esta ferramenta é uma ordenação do processo de tomada de decisões que visa minimizar as incertezas e os riscos de fracasso durante o desenvolvimento do projeto (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Funil de decisões (BAXTER, 1998).

Um produto deve satisfazer as exigências do consumidor, assim como se diferenciar dos demais produtos existentes no mercado (BAXTER, 1998).

O projeto conceitual é a etapa responsável por desenvolver as linhas básicas de forma e função do produto, é aonde se originam os elementos de diferenciação do produto, onde o uso de técnicas de criatividade é fundamental para o sucesso do projeto e por consequência para o sucesso do produto.

Dentre as ferramentas presentes nas diversas fases do processo criativo estão:

- Análise paramétrica, ferramenta que compara as características de produtos em desenvolvimento com as características de produtos já existentes;
- Análise do problema, ferramenta que organiza os questionamentos sucessivos com o objetivo de explorar o elemento motivador do projeto;
- Anotações coletivas, estímulo grupal e *Brainwriting*, com diferenças operacionais entre si, que podem ser resumidos como procedimentos em que um grupo de pessoas anota suas idéias sobre o tema proposto.

A Figura 2.7 mostra as relações de algumas ferramentas existentes e suas respectivas atividades de projeto:

Figura 2.7 – Correlação entre atividades de projeto e possíveis ferramentas a serem utilizadas (BAXTER, 1998).

Entre as técnicas de geração de idéias, cujo objetivo é a redução, a expansão ou a digressão do elemento motivador do projeto, destacam-se as que se seguem.

- Análise das funções, onde as funções principais e secundárias do produto são listadas, interferindo diretamente na sua forma final;
- Análise das características, que recombina as características de produtos já existentes por meio de permutação e da alteração da forma final do produto;
- Seqüência de ações modificar, eliminar, substituir, combinar, rearranjar, adaptar e inverter (MESCRAI), tem o intuito de verificar possíveis alterações e/ou diferenciações de um produto já existente;
- Análise morfológica, que vislumbra as possíveis soluções para a combinação entre as características do produto. Dentre as possíveis soluções, podem haver diversas opções para uma mesma característica de projeto. Pahl (2005), sugere que a maior vantagem dessa técnica é a visão geral que se tem das possíveis combinações de soluções (Figura 2.8). A decisão sobre qual solução deve-se adotar envolve vários fatores, tais como, os fatores econômicos, os fatores técnicos, os fatores ambientais, entre outros. No entanto, existem ferramentas que auxiliam essa tomada de decisão, como o funil de decisões;
- Analogias e metáforas, que correlaciona produtos diferentes, mas com algumas características similares;
- Clichês e provérbios, que usa ditos populares como orientadores na obtenção de soluções.

A FISP (Fases Integradas da Solução de Problemas) é a última ferramenta útil no desenvolvimento de projeto estudada por Baxter (1998), e avalia a eficiência das técnicas aplicadas anteriormente.

Figura 2.8 – Quadro morfológico (PAHL, 2005).

Pode-se dizer que a metodologia de projeto é uma sistematização de procedimentos executada durante o desenvolvimento de um projeto. De caráter benéfico, a sistematização não reprime a intuição ou a criatividade, mas organiza grupos de atividades, dentro dos quais, não existem fronteiras para o desenvolvimento. Segundo Pahl (2005) os procedimentos podem ser entendidos como as ferramentas de tomada de decisão, solução de problemas, documentação, monitoramento, etc.

Segundo Rozenfeld (2008), para que sejam atingidos os objetivos assumidos em um projeto, existe a necessidade de uma visão integrada de todos os fatores envolvidos, visão esta, que o gerenciamento de projetos oferece, juntamente com uma variedade de ferramentas e técnicas, possibilitando assim, atingir-se os objetivos propostos e planejados.

Dentre as ferramentas que o gerenciamento de projeto oferece, devido a sua grande aplicação, pode-se destacar a rede de precedência, na qual, as atividades de projeto são cronologicamente organizadas, de modo eficiente e racional.

2.2 – Materiais cerâmicos

O setor cerâmico, assim como declara a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), é amplo e heterogêneo e divide-se em sub-setores, classificados por matéria-prima, propriedades e áreas de utilização. Os materiais cerâmicos também se classificam como cerâmica vermelha, materiais de revestimento, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro, cimento e cal, e cerâmica avançada.

- Cerâmicas vermelhas são aquelas que apresentam cor avermelhada como tijolos, telhas e argila;
- Materiais de revestimento são materiais em formas de placas, usados na construção civil, como azulejo, porcelanato, lajota, entre outros;
- Cerâmicas brancas são materiais de corpo branco e recoberto por uma camada vítrea transparente e incolor, necessárias por razões estéticas ou técnicas. São subdivididas em louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos, cerâmica artística e cerâmica técnica;
- Materiais refratários são materiais que tem como sua principal característica, envolver e suportar altas temperaturas nas condições específicas de processo e operação de equipamentos industriais, além de esforços mecânicos, químicos e variações bruscas de temperatura;
- Isolantes térmicos são os materiais refratários isolantes, isolantes térmicos não-refratários, e fibras ou lãs cerâmicas;
- Fritas e corantes são classes de produtos cerâmicos que requerem acabamento. As fritas, também conhecidas como vidrado fritado se dão a partir da fusão da mistura de diferentes vidros moídos. Os corantes são compostos de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos;
- Abrasivos são compostos por matéria-prima e processos semelhante aos da indústria cerâmica, como o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício;
- Vidro, cimento e cal são considerados por alguns autores como integrantes da família das cerâmicas;
- Cerâmicas avançadas são as cerâmicas de qualidade elevada, desenvolvidas com matérias-primas sintéticas de alta pureza e através de processos rigorosos (ABC,2005);
- As cerâmicas avançadas (SMITH,1996) podem ser classificadas em quatro áreas;
- Cerâmicas eletrônicas são as que incluem os substratos e suportes para semicondutores, capacitores, piezoelétricos, resistores e termo-resistores;
- Cerâmicas estruturais são aquelas desenvolvidas para elevadas solicitações e incluem componentes resistentes ao desgaste, como componentes de bombas e válvulas,

componentes de motores automotivos, ferramentas e matrizes de corte e componentes biomédicos;

- Compósitos de matriz cerâmica e matriz metálica são os mais novos itens das famílias dos materiais avançados. Entre as cerâmicas estruturais se encontram os micro-compósitos e os nano-compósito e o hibridismo entre micro e nano-compósitos tem sido o novo conceito em desenvolvimento de cerâmicas super-resistentes e supertenazes;
- Recobrimentos cerâmicos são aqueles que apesar de serem aplicadas em grande parte como soluções provisórias para superar as deficiências das cerâmicas monolíticas, constituem seu próprio segmento de mercado e se destacam nesta década como uma das mais crescentes áreas de aplicação.

Em todos os tipos de cerâmicas, o controle do tamanho e da distribuição granulométrica é de fundamental importância no sucesso e desempenho dos produtos. Em função do método de conformação e do produto selecionado, o tamanho de partículas e o controle da distribuição granulométrica são de grande utilidade, pois partículas pequenas, com tamanho menor que um micrometro ($1\ \mu\text{m}$) são importantes na composição de materias primas de cerâmica avançada, pois apresentam alta reatividade favorecendo a sinterização e garantindo a elevada resistência mecânica do produto final.

2.3 – Biomateriais

O aumento da expectativa de vida do homem, como consequência dos avanços da medicina, da maior preocupação com a alimentação e do conforto gerado pela assim denominada “vida moderna”, tem resultado no aumento da população de idosos e, conseqüentemente, das doenças relacionadas à velhice. Dentre os diversos males que afetam a estrutura óssea, a osteoporose e a perda de massa óssea têm sido intensamente estudados devido a seus efeitos devastadores na qualidade de vida das pessoas. Os problemas de estrutura óssea não são apenas “doença de velhos”, eles também atingem indivíduos jovens em sua fase mais produtiva, em decorrência de acidentes, notadamente os automobilísticos e os de trabalho. A magnitude destes problemas de saúde junto à população tem levado pesquisadores, principalmente dos países mais desenvolvidos, à procura de materiais que possam substituir de forma apropriada os ossos danificados.

Os materiais utilizados na substituição de ossos enquadram-se em uma classe denominada de biomateriais e devem apresentar propriedades físicas e biológicas compatíveis com os tecidos vivos hospedeiros, de modo a estimular uma resposta adequada deles. Tais propriedades caracterizam a biocompatibilidade. Os materiais sintéticos utilizados para esses fins podem ser metais, polímeros, compósitos, cerâmicos e

vidros. Em geral, biomateriais utilizados na reposição dos chamados tecidos moles são muito diferentes daqueles usados na substituição de tecidos duros (ossos e dentes). Para os tecidos duros, dependendo do esforço mecânico a que são submetidos, alguns materiais podem ser mais apropriados que outros, devido à sua maior resistência. A diversidade das aplicações dos biomateriais assim como o amplo espectro de sua composição química e a necessidade de formas e morfologias apropriadas para sua utilização, faz da pesquisa nesta área do conhecimento um trabalho de característica eminentemente interdisciplinar, envolvendo fatores que definem o sucesso de suas aplicações, tais como: rotas de síntese, processamento em formas variadas, qualidade e esterilidade clínica e resposta do tecido hospedeiro. Desta forma, o desenvolvimento de biocerâmicas e de próteses cirúrgicas constituídas destes materiais deve ocorrer sob as mesmas condições de interdisciplinaridade que determinam o desenvolvimento de qualquer outro biomaterial. Dentro deste contexto, os profissionais da área de engenharia, em particular a engenharia mecânica e a engenharia de materiais, e da área de saúde podem contribuir de forma significativa para a evolução desta área para o aumento do leque de sua aplicabilidade, através do desenvolvimento de novos e eficazes biomateriais e também na elucidação dos mecanismos que governam a regeneração óssea.

2.4 – Biocerâmicas

O uso de cerâmicas como biomateriais é citado inicialmente por Dreesman em 1894, que relatou o uso de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) como um possível substituto para ossos. A década de 70 marcou o início do uso mais intenso de materiais cerâmicos com propriedades que possibilitam a sua classificação como biocerâmicas. A primeira biocerâmica com uso muito difundido neste período foi a alumina densa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), que se apresenta como bioinerte. Este material, devido a sua boa biocompatibilidade e elevada resistência mecânica, vem sendo usado com frequência até hoje em próteses cirúrgicas que substituam ossos ou parte deles que são submetidos, na sua atividade funcional, a esforços elevados. Exemplos típicos do emprego de alumina são as próteses cirúrgicas para a substituição da cabeça do fêmur que faz a articulação com o íliaco e a substituição de dentes por dentes artificiais implantáveis. O uso das biocerâmicas tem se estendido desde o emprego isolado do material até outras formas de utilização, como por exemplo, no revestimento de próteses metálicas ou na associação com materiais poliméricos, tais como o colágeno. As biocerâmicas têm sido empregadas na forma densa e na forma porosa. Apesar do aumento da porosidade diminuir a resistência mecânica do material isoladamente, a existência de poros com dimensões adequadas pode favorecer o

crescimento de tecido através deles, fazendo com que ocorra um forte entrelaçamento do tecido com o implante, aumentando, por conseguinte, a resistência do material *in vivo*.

2.5 – Prototipagem rápida e impressão 3D

O termo prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias usadas para se fabricar objetos físicos diretamente a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador. Tais métodos são bastante peculiares, uma vez que eles agregam e ligam materiais, camada a camada, de forma a constituir tridimensionalmente o objeto desejado. Eles oferecem diversas vantagens em muitas aplicações quando comparados aos processos de fabricação clássicos baseados em remoção de material, tais como o fresamento ou torneamento. Os processos de prototipagem rápida permitem, na grande maioria das vezes, que os objetos desejados, sejam feitos mais depressa e de forma mais barata. De fato, estima-se que a economia de tempo e de custos proporcionada pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos seja da ordem de 70 a 90%. Atualmente há pelo menos sete diferentes técnicas de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, entre elas a técnica de impressão 3D, na qual, os modelos são construídos a partir de um material em pó, ligado por intermédio de um ligante líquido. O jato de ligante é aplicado através de cabeças de impressão idênticas às utilizadas pelas impressoras de jato de tinta. A peça em verde é retirada da máquina ficando solto o pó não aglutinado pelo ligante. O modelo sofre, numa segunda fase, um tratamento térmico, ou químico, para aumentar a sua resistência, nesta técnica podem ser utilizados diversos tipos de materiais em pó.

A SOLINGEN utiliza esta tecnologia para a fabricação direta de moldes cerâmicos para fundição de precisão (processo DSPC - Direct Shell Production Casting). Empresas como a Z Corporation, Sanders, Prometal, e Thermoject, baseando-se no método de impressão 3D, com algumas alterações, criaram os seus próprios processos de prototipagem rápida (WOHLERS, 1999).

Uma vez que tais tecnologias estão sendo cada vez mais usadas em aplicações não relacionadas diretamente com prototipagem, é preferível designá-las pelas expressões fabricação sólida com forma livre, manufatura automatizada por computador ou manufatura em camadas.

2.6 – Prototipagem rápida e implantes ósseos

Gibson (2003) observou que um grande número de tecnologias interessantes e inovadoras, apontadas pelo desenvolvimento de materiais de implante ósseos usando a

tecnologia de fabricação de forma livre (SFF), foram apresentadas no 29º Encontro Anual da Sociedade para Biomateriais em Reno, Nevada, entre os dias 30 de abril e três de Maio de 2003. Segundo ele as opções de implantes biológicos são limitadas e possuem grandes desvantagens, favorecendo assim a fabricação de implantes ósseos artificiais, os quais são feitos normalmente de um mineral de fosfato de cálcio, que em termos de composição química possui uma grande similaridade com ossos e dentes. Tais tecnologias envolvem dois métodos de fabricação de estruturas porosas de hidroxiapatita com um alto grau de precisão.

O primeiro método foi apresentado por Jaedeok Yoo (2003) et al, da Therics Inc., os autores introduziram o seu trabalho intitulado "Fabrication of Biomaterial Structures using a Three Dimensional Printing Technique", o qual pode ser traduzido como "Fabricação de Estruturas em Biomateriais usando uma Técnica de Impressão Tridimensional". Eles apresentaram explicações sobre a tecnologia de impressão tridimensional chamada "TheriForm" e sugeriram como exemplos de materiais usados, a hidroxiapatita e o beta-tricalcio fosfato (β -TCP) como o pó da impressão e uma solução aquosa de acrílico ácido como ligante. O problema encontrado foi a introdução de três diferentes tipos de porosidade: macrocanais, formados pela não impressão de ligante em áreas selecionadas, microcanais, que são dependentes de parâmetros de impressão e microporos, que são dependentes da seleção de materiais, de parâmetros de impressão e das condições pós-processadas.

Foram descritos os resultados de um estudo *in vivo*, onde um componente poroso β -TCP foi implantado em um osso úmero defeituoso de um cão; em 12 semanas houve um bom inter-crescimento de osso em comparação com um controle de enxerto. Após 26 semanas, houve aproximadamente 20% de tecido ósseo novo no defeito com uma certa reabsorção da estrutura do componente β -TCP.

O outro método introduzido por Jennifer Dillinger (2006) et al, da Universidade de Illinois, em Urbana-Champaign, Illinois, o qual foi apresentado como um método alternativo para a produção de peças porosas de hidroxiapatita com alto nível de engenharia foi intitulado "*Bone response to 3D periodic hydroxyapatite scaffolds with and without tailored microporosity to deliver bone morphogenetic protein 2*" e envolveu um método de fabricação rápida de sólidos de forma livre (SFF) chamada *robocasting* que foi desenvolvido em colaboração com os Laboratórios Nacionais de Sandia, Novo México. Este método consiste na deposição, feita por robôs, de uma suspensão coloidal altamente concentrada. Para criar uma estrutura pré-projetada, camada por camada, esta suspensão, em forma de pasta, composta de pó de hidroxiapatita misturado com água, aditivos orgânicos e micro esferas de metil-metacrilato (PMMA) é aplicada através de uma seringa ligada a um dispositivo robótico. O processo consiste de barras paralelas de pasta, aplicadas através de seringas, sendo depositadas com um espaço entre barras adjacentes que formam a camada inicial e

então a segunda camada de barras paralelas é depositada sobre a camada inicial, mas em uma direção perpendicular a disposição inicial. Este processo é repetido durante um período de 10 a 15 minutos, até que uma grade tridimensional seja construída, que então é seca e sinterizada para produzir um *scaffold* cerâmico.

Resultados de um estudo *in vitro* sobre a cultura de células em *scaffolds* produzidos por este método demonstraram que osteoblastos (células formadoras de ossos) interagem de forma diferente com três tamanhos de porosidade. Para porosidades de larga escala, células se agruparam nas junções das barras de hidroxiapatita, que se acredita acontecer por alguma relação com o raio de curvatura das superfícies, para microporos, as células responderam estendendo seus processos nestes poros e para nanoporos, as células responderam prendendo seus processos a estes poros.

Já Wilson (2003) et al descreveram a produção e caracterização de *scaffolds* de fosfato de cálcio com porosidade de macro-arquitetura reproduzível e definida além dos resultados preliminares da resposta *in vitro* e *in vivo* da criação de tecidos ósseos. Moldes de cera foram projetados e produzidos usando uma técnica de prototipagem rápida. Uma pasta aquosa de hidroxiapatita foi infiltrada nestes moldes. Após a sinterização a 1250°C a cera foi eliminada e foram definidas a dimensão e caracterização dos *scaffolds*. Os *scaffolds* resultantes mostraram que o projeto e as dimensões foram notavelmente consistentes. A textura inerente à produção, camada por camada, do molde foi impressa nas superfícies verticais dos *scaffolds*. A rugosidade superficial das superfícies que possuíam texturas foi melhor do que as superfícies sem texturas. As análises dos materiais revelaram uma fase β -TCP acrescentada à hidroxiapatita para a cerâmica moldada. As cerâmicas de controle (não moldadas) exibiram apenas hidroxiapatita. Trinta *scaffolds* foram pulverizados com uma cultura expandida de células de ossos de cabra e implantados em ratos por 4 ou 6 semanas. A histologia revelou a formação mineral de ossos em todos *scaffolds* para ambos períodos de implantação. Após 4 semanas, a formação da superfície do osso foi acompanhada pela construção de ossos da superfície e ocasionalmente o atravessamento dos poros. Este crescimento e atravessamento da formação de ossos quase sempre foram associados com as superfícies e com texturas dos *scaffolds*. Contudo, o percentual da área de ossos nos poros foi similar para os implantes de períodos de implantação de 4 e 6 semanas.

Os critérios para o projeto de *scaffolds* foram a porosidade de aproximadamente 50% de diâmetro de canal por poro dentro da faixa descrita na literatura, o tamanho apropriado para implantação em animais pequenos, as dimensões exteriores que permitam a identificação e orientação dos eixos de implantação durante o processamento histológico e a fabricação usando como material a hidroxiapatita. Usando estes critérios, as seguintes especificações foram definidas: um paralelepípedo com dimensões exteriores de 2,6mm x 3,6mm x 5,2mm e uma rede de interseção de 400,0µm x 400,0µm com canais de seção de

corte transversais orientados através de eixos ortogonais e separados por 400,0µm uns dos outros e das extremidades externas.

2.7 – Máquinas de prototipagem rápida

Pode-se entender que uma máquina de prototipagem rápida seja o resultado de uma grande variedade de métodos usados para gerar objetos físicos partindo de fontes de dados digitais, onde os objetos desejados são obtidos através da adição e união de diversos materiais.

Entre as vantagens oferecidas pelos métodos de prototipagem rápida estão: a redução de custo e do tempo de fabricação, a precisão do produto final e a possibilidade de criar formas complexas impossíveis de serem obtidas através de outros métodos de fabricação. Já entre as desvantagens oferecidas está a limitação do volume do objeto a ser fabricado, o qual depende do volume disponível pelo equipamento.

Os modelos sólidos gerados pelos atuais métodos computacionais constituem uma excelente ferramenta de auxílio visual de grande importância durante o processo de desenvolvimento de um projeto, além de permitir a elaboração de testes e ensaios prévios.

A palavra rápida usada para definir esta tecnologia é relativa, pois o tempo de fabricação de alguns protótipos pode chegar a 72 horas, mas mesmos nos casos mais demorados, o tempo e o custo para a fabricação através dos métodos tradicionais, superam com grande margem os novos métodos oferecidos pela prototipagem rápida.

Também conhecido como “Fabricação Sólida de Forma Livre”, “Manufatura Automatizada por Computador” ou “Manufatura em Camadas”, o método, em sua grande maioria, é descrito através dos seguintes passos:

- **Passo 01** – Cria-se um modelo CAD equivalente ao objeto a ser fabricado;
- **Passo 02** – Converte-se o arquivo CAD para o formato STL;
- **Passo 03** – Um software “fatia” o modelo tridimensional gerado em diversas camadas finas, transversais e dispostas umas sobre as outras, com aproximadamente 0,1 mm de espessura;
- **Passo 04** – Através de um processo chamado “aditivo” combina-se camadas de papel, cera, plástico, cerâmica ou mesmo metal, correspondentes as fatias previamente obtidas para assim criar um objeto sólido.
- **Passo 05** – Providencia-se a limpeza e acabamento do protótipo.

2.7.1. Tipos

Conforme VOLPATO et al (2007), atualmente há diversos métodos de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, entre os quais os de maior utilização comercial estão:

- Estereolitografia (SLA, *Stereolithography*);
- Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, *Laminated Object Manufacturing*);
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS, *Selective Laser Sintering*);
- Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*);
- Base de Cura Sólida (SGC, *Solid Ground Curing*);
- Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS, *Laser Engineered Net Shaping*);
- Impressão 3D por Jato de Tinta (MJT, *Multi Jet Modeling*; BPM, *Ballistic Particle Manufacturing*).

2.7.1.1. Estereolitografia

Método considerado pioneiro entre os métodos de prototipagem rápida. Foi patenteado em 1986, tornou-se um padrão de avaliação entre os métodos de prototipagem rápida que surgiram após o seu desenvolvimento.

A construção dos modelos sólidos que se faz por esse método a partir de polímeros no formato líquido sensíveis a luz, os quais, uma vez expostos à radiação ultravioleta, catalisam e se solidificam. Neste modelo, uma plataforma móvel é montada dentro de um reservatório preenchido com resina epóxi ou acrílica; esta plataforma situa-se logo abaixo da superfície e sobre ela encontra-se uma camada de aproximadamente 150,0µm de resina. Um raio laser ultravioleta de alta precisão solidifica o desenho bidimensional referente a primeira fatia, deixando as demais partes líquidas, a plataforma mergulha levemente no recipiente, expondo uma nova camada de resina, quando então o laser solidifica a segunda camada acima da primeira. O processo se repete sucessivas vezes até que todas as fatias do objeto sejam criadas. Por fim, o modelo sólido é removido e lavado, os suportes são retirados e a peça pronta é colocada em um forno para a cura completa.

2.7.1.2. Manufatura de objetos em lâminas

Neste método, a fabricação do protótipo é feita através de dois rolos de papel laminado, um responsável por fornecer material e outro responsável por recolher a

sobra. O papel possui uma superfície adesiva, proporcionada pela aplicação prévia de uma cola ativada pelo calor.

Na plataforma de construção do equipamento encontra-se uma base feita de papel e fita com espuma em ambas as faces; durante o processo de fabricação um rolo aplica tiras deste papel sobre a base; em seguida um segundo rolo aquecido pressiona o papel contra a base com o objetivo de garantir a fixação deste na base. Em próximo passo, um laser de alta precisão corta o contorno da primeira camada e enfraquece o excesso de papel retalhando-o, tornando a sua remoção mais fácil. Este material retalhado forma uma espécie de suporte para todas as partes delicadas do protótipo, tornando-as resistentes ao processo de fabricação. Uma vez concluída a primeira camada, a plataforma é abaixada e uma nova camada é aplicada pelo rolo coletor, dando início a um novo ciclo do processo de fabricação. Este processo é repetido até que o protótipo tenha sido construído. A peça final apresenta uma textura semelhante à da madeira. Tendo sido fabricado em papel, o modelo deve ser selado e revestido com verniz ou tinta para garantir sua resistência à umidade e conservação.

Em estudos recentes novos tipos de materiais como plásticos, pós cerâmicos e metálicos vem sendo utilizados, porém o tratamento aplicado a peça à verde envolve a sinterização através do aquecimento em fornos.

2.7.1.3. Sinterização seletiva a laser

Através desta técnica, patenteada em 1989, se obtém um modelo sólido através de materiais pulverulentos possíveis de serem fundidos por calor nas condições do equipamento, tais como, o náilon, elastômeros e metais. Para tal, um laser sinteriza o material em pó situado em uma plataforma localizada abaixo da superfície de um recipiente de pó; a plataforma é abaixada, o pó é reaplicado e novamente o laser sinteriza o perfil bidimensional da fatia do modelo a ser fabricado. O processo é repetido até que a última fatia do objeto seja terminada. Neste processo, a função de suporte é exercida em parte pelo excesso de pó.

2.7.1.4. Modelagem por deposição de material fundido

Este método faz uso de filamentos de resina termoplástica aquecidas e extrudadas a partir de uma matriz em forma de furo circular, com liberdade de movimento nos eixos X e Y.

Semelhante ao processo de criação de enfeites para confeitos, através do uso de um saco de confeitaria com furo circular, a matriz de extrusão garante a deposição de filetes muito

finos sobre a plataforma de construção. Durante o processo, a plataforma é mantida em uma temperatura inferior à temperatura do material, favorecendo assim o resfriamento e endurecimento do material depositado. As camadas de material representando os desenhos bidimensionais referentes às camadas do objeto desejado são depositadas até que o objeto seja fabricado.

No início e durante o processo de fabricação, um segundo material mais fraco é usado para criar suportes com geometrias que tornem fácil a sua remoção. Este processo usa resinas termoplásticas, entre elas, o poliéster, o polipropileno, o ABS, elastômeros e ceras.

2.7.1.5. Cura sólida na base

Com grande semelhança ao processo de estereolitografia, este processo também faz o uso de radiação ultravioleta para endurecer polímeros sensíveis à luz de forma seletiva. Porém diferente da estereolitografia, neste processo uma camada inteira é curada de uma só vez. Inicialmente a resina foto-sensível é aplicada sobre a plataforma, em seguida, uma foto-máscara correspondente a camada que se deseja gerar é criada pela máquina. Esta foto-máscara é impressa em uma placa de vidro que se localiza acima da plataforma de construção; a seguir uma grande quantidade de radiação ultra-violeta é aplicada sobre esta placa e atravessa apenas as porções transparentes da placa de vidro. Neste momento, as porções referentes ao perfil bidimensional da camada desejada, são endurecidas. Uma vez concluída esta etapa, a máquina remove através de vácuo o excesso da resina líquida; cera é borrifada em seu lugar para servir de suporte ao objeto durante sua construção. Em passo adicional, a superfície superior da camada é fresada com o objetivo de torná-la plana. O processo é repetido até obter-se o objeto desejado, quando então a peça pronta é mergulhada em um banho de solvente, para remover a cera presente. Este método é usado em máquinas de grande porte que podem produzir modelos de grande tamanho.

2.7.1.6. Conformação próxima ao formato final via laser

Método novo que possibilita a fabricação, sob velocidades razoáveis, de objetos metálicos plenamente densos e com boas propriedades metalúrgicas. Neste método, um laser de alta potência é usado para fundir um pó metálico usado como material para deposição. O raio laser lê focado em um pequeno ponto dentro de um cabeçote e transforma o pó metálico em um material viscoso que é depositado sobre uma plataforma com liberdade de movimentação nos eixos X e Y e que se move formando o perfil

bidimensional da camada a ser criada. Uma vez que uma camada é concluída, a plataforma se move abrindo espaço para a criação de uma nova camada, e assim o processo é repetido até que o objeto desejado seja concluído. A distribuição dos pós metálicos é feita através do cabeçote, por gravidade ou a partir de um gás portador inerte pressurizado. Uma corrente de gás inerte é fornecida constantemente, mesmo não havendo a necessidade de transportar o pó metálico, com o objetivo de garantir as propriedades metalúrgicas e promover uma melhor adesão entre as camadas. Pós de diversas ligas metálicas podem ser usados, tais como aço inoxidável, inconel, cobre, alumínio e titânio. A potência do gerador de raio laser varia conforme o material usado. Uma vez concluídos, os protótipos requerem usinagem para acabamento. Apresentando densidade plena, boa microestrutura e propriedades similares ou melhores ao metal convencional.

2.7.1.7. Impressão 3D por jato de tinta

A impressão tridimensional é um processo inovador de prototipagem rápida que diminuiu consideravelmente o tempo de manufatura das partes de um protótipo e da fabricação de ferramentas de máquinas. Atualmente, a fabricação de protótipos envolve muitas horas de máquinas, tempo excessivo com passos lentos e custo alto que, impressoras tridimensionais realizam em um único passo, em tempo reduzido. A redução de tempo e de custo proporcionada pela impressão tridimensional revolucionou a prototipagem e a manufatura (HEINZL; HERTZ, 1985). Outra vantagem é a possibilidade da criação de formas geométricas complexas, de vistas em cortes e a fabricação de peças precisas.

O processo de impressão tridimensional engloba a fabricação de uma peça a partir de um modelo digital tridimensional em CAD. Este modelo é então dividido em camadas por um algoritmo de fatiamento, onde cada fatia possui aproximadamente 150,0 μ m de espessura, criando assim informações detalhadas sobre cada corte transversal. A máquina de impressão tridimensional inicia o processo de construção de peça depositando uma camada de pó, sobre a qual o fluido ligante é depositado na forma da seção da peça, representando a fatia inicial do modelo, muito parecido com uma impressora de jato de tinta quando imprime em uma folha de papel. A camada de pó é então baixada, e uma nova camada de pó é depositada sobre a primeira camada e novamente o fluido ligante é depositado, compondo a fatia seguinte do modelo que se consolida com a anterior através do ligante. Esse processo é repetido para todas as camadas da peça até que ela seja impressa por completo. Uma vez a peça impressa totalmente, o pó que não recebeu fluido ligante é removido, a peça é então limpa e o protótipo está pronto. Neste método podem ser usados pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (GORNÍ, 2001). Havendo a necessidade de agregar uma maior resistência mecânica à peça, ela pode, após o término

do processo, ser sinterizada e ou reforçada com outros materiais. A impressão tridimensional tem como vantagem adicional sobre a maioria dos processos de prototipagem a não necessidade de imprimir o material suporte, pois o próprio pó sem ligante suporta a peça em impressão. O pó (suporte) é removido, peneirado e seco, e pode então ser reutilizado.

2.7.2. Modelos tridimensionais

A criação de modelos tridimensionais é basicamente a formação de objetos através de um programa com ferramentas direcionadas para este tipo de atividade. Os programas mais utilizados na prototipagem rápida são: o AutoCad, o SolidEdge, o SolidWorks, o 3DS Max, entre outros.

Basicamente, dois tipos de abordagens são muito utilizadas através dos modelos tridimensionais, o projeto auxiliado por computador ou CAD, que é um termo que resume a criação, modificação, análise e otimização de tais modelos, e a manufatura auxiliada por computador ou CAM, que envolve a utilização de sistemas computacionais nas tarefas de planejamento, gerenciamento e controle da manufatura destes modelos. Como benefícios de seu uso concomitante, podem ser citadas: a boa integração do projeto e sua respectiva fabricação e a redução de tempo entre o projeto e a fabricação de um protótipo.

2.7.3. Representação de modelos tridimensionais em STL

Em uma representação de modelos tridimensionais no formato STL tem-se a união de tetraedros que relacionados entre si geram uma aproximação do objeto original. Na representação em STL de sólidos simples todas as superfícies de limite são planas e as facetas triangulares representam exatamente o objeto, já para modelos com superfícies curvas, como superfícies cônicas e linhas irregulares a representação em STL pode apenas gerar uma aproximação do modelo original. Neste caso, para alcançar um nível maior de precisão, é necessária a aplicação de uma trama de facetas triangulares mais densa.

A especificação do formato STL recomenda ordenar as facetas triangulares pelo valor de z, do mais baixo para o mais alto, com o objetivo de acelerar o tempo de processamento, mas isto é opcional. Nos modelos STL, embora sejam espacialmente relacionadas, as facetas triangulares são tratadas como independentes umas das outras, o mesmo vértice é repetido tantas vezes quanto o número de facetas que compartilha. Em termos de tamanho de arquivo e velocidade de processamento, o formato STL é ineficiente; a eficiência de análise dos modelos STL pode ser dramaticamente melhorada organizando

as facetas para representar explicitamente as relações de topologia entre os vértices, arestas e facetas.

No formato STL, cada faceta triangular é definida pelas coordenadas x , y , z de seus três vértices, somado aos três componentes de suas unidades de direção normal. Uma faceta normal ou vértice é usado para distinguir o interior do exterior do objeto; os pontos normais são dispostos a uma certa distância do objeto; a ordem dos vértices segue a regra de mão direita em relação à normal. Embora a informação da faceta normal seja redundante, desde que possa ser computada a partir dos vértices, é conveniente seu uso. Outra regra para a criação de arquivos STL é a regra do vértice por vértice, onde cada faceta compartilha dois vértices comuns com cada uma das facetas adjacentes; em outras palavras, cada faceta triangular tem exatamente três outras facetas triangulares adjacentes que compartilham respectivamente suas três arestas; isto garante uma superfície interligada e de volume fechado.

O formato de um arquivo STL é definido em dois formatos, no formato ASCII e no formato binário. No formato binário, os pontos são representados por números inteiros e flutuantes de quatro em quatro *bytes* de acordo com o padrão IEEE. Apesar de não ser padrão em todas as plataformas de computador (3D SYSTEMS, INC, 1988), é comum que o *byte* mais significativo esteja posicionado no endereço mais alto do arquivo, porém a ordem do *byte* tem que ser trocada quando necessário.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de uma abordagem ao processo de impressão tridimensional, propõe-se uma estratégia para o projeto de uma mini-impressora 3D, estratégia na qual, são aplicadas, em cada etapa do projeto conceitual, técnicas para o estudo de possíveis configurações e tomada de decisões. É proposto um fluxograma, baseado em modelos citados no capítulo de revisão bibliográfica, conforme é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Estratégia de projeto proposta.

3.1 - Etapas de projeto

O projeto envolve etapas propostas no modelo, nas quais são constantes as interações, iterações e a retroalimentação.

Em grande parte do projeto, conforme a proposta de Pahl (2005) e Baxter (1998), adotou-se procedimentos de tomada de decisão resumido (Figura 3.2), onde dado o fator motivador, é feito um levantamento das opções e, segundo um critério que envolve os recursos, a demanda ou qualquer fator relevante, faz-se a seleção da melhor opção.

Figura 3.2 – Procedimento de tomada de decisão resumido.

3.1.1 – Identificação da demanda

Embora esta tecnologia tenha sido extensivamente empregada no exterior, no Brasil ainda não existe nenhum fabricante de equipamentos de prototipagem rápida. Este fator unido à necessidade de desenvolvimento tecnológico e ao interesse por gerar riquezas que o País possui, demonstra uma demanda crescente por novas tecnologias, assim como pelo beneficiamento e enriquecimento das matérias primas internas, através da manufatura e industrialização de nossos produtos. Torna-se assim importante investir, não apenas em novas tecnologias, mas em tecnologias existentes fora de nosso território. O Laboratório de Tribologia e Compósitos – LTC têm investigado há anos a aplicação da prototipagem rápida em projetos de produtos, em aplicações médicas e também no projeto e a fabricação de máquinas, processos e produtos cerâmicos. Certamente para a comunidade acadêmica e empresarial, é extremamente relevante o desenvolvimento completo da tecnologia de

prototipagem rápida de cerâmica através da impressão tridimensional, a saber: o processo, a máquina e os recursos humanos envolvidos. Portanto, criando com este contexto a possibilidade de Laboratórios de Pesquisa e Desenvolvimento de centros de pesquisa, de pequenas e médias empresas, assim como de profissionais liberais, produzirem protótipos de modelos digitalizados em computador para os mais diversos fins.

Portanto, o projeto de uma máquina impressão tridimensional e estudo do processo de prototipagem rápida vem de encontro com a motivação do País em alcançar capacidade na área de manufatura, assim como com a necessidade interna do Laboratório de Tribologia e Compósitos por uma máquina que possibilite o estudo e desenvolvimento de novos materiais e novas tecnologias relacionadas a implantes ósseos e materiais cerâmicos.

3.1.2 – Estudo da viabilidade técnica e econômica

Etapas que envolveu um estudo de viabilidade econômica e técnica de se projetar e produzir um protótipo de uma mini-máquina de impressão tridimensional, onde foram adotadas sugestões da literatura citada na revisão bibliográfica, como o reconhecimento da fase do ciclo de vida do equipamento e da capacidade de se produzir o protótipo (PAHL, 2005).

3.1.2.1 – Reconhecimento da fase do ciclo de vida das impressoras 3D

O levantamento técnico sobre o equipamento de impressão tridimensional foi feito com base em manuais, patentes e literatura referente ao processo de prototipagem rápida e projeto de máquinas de precisão.

Observou-se que existe uma certa variedade de modelos com diferentes níveis de sofisticação, porém, a grande maioria possui quatro elementos em comum:

- Movimentação linear principal acionado por motores (passo ou servo);
- Conjunto de impressão por jato de tinta;
- Mesa de impressão constituída de caixa de fornecimento de pó e de caixa de confecção da peça;
- Movimentação axial das caixas de pó e de peça acionada por motores (passo ou servo).

A movimentação linear principal tem o objetivo de deslocar o conjunto de impressão por jato de tinta pela extensão da mesa de impressão.

O conjunto de impressão por jato de tinta promove a deposição do ligante nos diversos pontos da geometria requerida para cada fatia do objeto tridimensional desejado.

A mesa de impressão normalmente é constituída de uma área livre onde se encontram a caixa de pó e a caixa da peça, as quais fazem pequenos deslocamentos opostos a cada passo de impressão com o objetivo de estabelecer novas camadas de pó para a impressão de cada fatia do sólido sendo impresso.

A movimentação axial das caixas de pó e da peça tem o objetivo de deslocar o conjunto de cada caixa para cima e para baixo, a fim de movimentar pó e alimentar a peça com nova matéria prima.

São conhecidas diversas configurações mecânicas com a finalidade de executar as tarefas descritas. O custo envolvido em cada configuração pode variar muito, principalmente no uso dos mancais para a movimentação das diversas partes e na definição dos materiais a serem usados para a confecção das peças.

A movimentação acionada por motores visa a obtenção de precisão, força e controle da velocidade e da aceleração. Também neste caso, o custo do sistema pode variar dependendo da configuração escolhida.

Sendo assim pode-se dizer que um projeto ideal envolveria um alto custo de fabricação. As cotações iniciais foram resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cotações iniciais para o projeto.

Componente	Descrição	Fornecedor	Custo aproximado*
Estrutura básica do equipamento	Peças em aço perfilado com 20,0 mm de largura, 1000,0 mm de comprimento e 2,0 mm de espessura para o corte e montagem por soldagem.	PAPARA AÇO E METAIS	R\$50,00
Superfície para mesa de impressão	Peça de alumínio bruto para usinagem com 330,0 mm de comprimento, 270,0 mm de largura e 40,0 mm de espessura.	PAPARA AÇO E METAIS	R\$479,00
Recipientes de armazenamento e deposição de pó e peça dotados de base móvel	Peças cilíndricas em aço inox para usinagem com 120,0 mm de diâmetro e 200,0 mm de comprimento.	PAPARA AÇO E METAIS	R\$1600,00
Sistema de movimentação e posicionamento motorizado	Sistema servo acionado de movimentação MP2300 de 3 drives e 3 servo motores de 2,5N.m.	YASKAWA Auto elétrico do Brasil	R\$25.000,00
Movimentação linear (eixos lineares)	Eixos lineares Tekkno 12H6-400 de 400,0mm de comprimento e diâmetro de 12,0mm.	TEKKNO MECATRÔNICA	R\$50,00/unid.
Movimentação linear (<i>pillow block</i> + rolamentos lineares)	<i>Pillow block</i> com rolamento Tekkno TW12UU para eixo de 12,0mm.	TEKKNO MECATRÔNICA	R\$170,00/unid.
Movimentação linear (fuso + castanha)	Fuso de esferas ECS 08015 de 400,0mm de comprimento, diâmetro 8,0mm x passo 1,5mm.	KALATEC AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	R\$1.490,00/unid.
Impressora a jato de tinta	Impressora a jato de tinta profissional.	OFFICER DISTRIBUIDORA DE INFORMÁTICA	R\$1259,00

* Valores obtidos no período de Janeiro à Junho de 2007.

São duas as principais tecnologias usadas para a impressão a jato de tinta atualmente, o método de impressão contínua e o método de impressão por deposição de gotas de tinta por demanda, o qual, é dividido em dois sub-métodos, o método térmico e o método piezoelétrico. Verificou-se que os métodos mais usados atualmente são os métodos

que descendem do método de deposição de tinta por demanda, dentre os quais, o método térmico é o mais adotado entre os fabricantes de impressoras a jato de tinta, como a Canon, a Hewlett-Packard e a Lexmark.

Entre as marcas mais conhecidas a Epson emprega o método piezoelétrico em seus equipamentos, o qual oferecia a vantagem de não aplicar calor ao conteúdo do reservatório de tinta, permitindo o uso de materiais orgânicos que teriam suas propriedades alteradas caso fossem expostos ao calor gerado pelos outros métodos de impressão a jato de tinta. Em contrapartida, através de pesquisas constatou-se que as versões de impressoras comerciais oferecidas por este fabricante tinham como característica um cabeçote de impressão fixo ao equipamento, fazendo-se necessário, somente a substituição do reservatório de tinta, preservando assim o cabeçote de impressão. Essa solução oferece um menor custo na reposição da tinta, porém implica em um risco de inutilização de todo o conjunto mecânico de impressão caso ocorra um dano ao cabeçote de impressão.

Sabe-se que a principal característica do método térmico, adotado pela grande maioria dos fabricantes deste equipamento, é a presença de calor. Sabe-se também, como citado anteriormente, que isto poderia gerar resultados inesperados na composição química do fluído utilizado como aglomerante (ligante), porém, uma das características comuns aos equipamentos que usam este método é a possibilidade, em caso de dano, da fácil substituição do cabeçote de impressão.

Uma vez que o objetivo do projeto é a construção de um equipamento robusto, de fácil manutenção, e que possibilite a utilização de uma grande variedade de materiais, optou-se, pela impressora a jato de tinta da marca Lexmark, modelo Z12, a qual faz uso do método térmico.

Neste trabalho, foi decidida a elaboração de um projeto de baixo custo, para isso, algumas das opções cotadas inicialmente para a viabilização da fabricação e montagem do equipamento foram revistas e foram definidas alternativas para elas. O sistema de movimentação e posicionamento motorizado, cotado inicialmente foi substituído por alternativas de fabricação própria. Tal componente do projeto envolve o motor responsável pelo deslocamento do conjunto mecânico de impressão por jato de tinta, o motor responsável pelo deslocamento do pistão da caixa da peça e o conjunto eletrônico de automação, sincronia e gerenciamento dos movimentos dos motores citados. As novas cotações podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Cotações para o projeto.

Componente	Descrição	Fornecedor	Custo aproximado* R\$
Recipiente de armazenamento e deposição de pó por gravidade	Peça de alumínio bruto para usinagem com 230,0 mm de comprimento, 80,0 mm de largura e 60,0 mm de espessura.	PAPARA AÇO E METAIS	120,00
Recipiente de armazenamento de peça dotado de base móvel	Peças cilíndricas em aço inox para usinagem com 120,0 mm de diâmetro e 200,0 mm de comprimento.	PAPARA AÇO E METAIS	600,00
Sistema de movimentação e posicionamento motorizado (Motores de passo)	Conjunto de motores de passo.	Motores KALATEC.	50,00 / cada
Sistema de movimentação e posicionamento motorizado (Placas de automação)	Conjunto de placa controladora, placa de chaveamento de sinal e drives fabricados pelo LTC.	Projeto da placa controladora, da placa de chaveamento e dos drives acessível na Internet.	Placa controladora (montagem) 120,00 Placa de chaveamento (montagem) 45,00 Drive (montagem): 170,00 / cada
Movimentação linear (engrenagem + cremalheira)	Sistema de deslocamento linear por cremalheira sincronizadora.	Fabricado pelo LTC	25,00.
Impressora a jato de tinta	Impressora a jato de tinta Lexmark modelo Z12.	OFFICER DISTRIBUIDORA DE INFORMÁTICA	319,00

* Valores obtidos no período de Janeiro à Junho de 2007.

Visto que se trata de um protótipo, fez-se necessária a elaboração de um sistema de deposição de pó simples e resumido, o qual envolve um reservatório suspenso com um orifício inferior de largura correspondente ao diâmetro da caixa da peça, para que o pó ali armazenado, através da força da gravidade, se deposite em todo espaço livre na caixa da peça. Tendo o equipamento, em seu sistema de armazenamento de pó e peça, um mecanismo capaz de movimentar com precisão sua base para cima e para baixo, o pó armazenado no sistema de deposição pode assim ser responsável por preencher o espaço livre gerado a cada passo no reservatório em questão.

Dispositivos de alimentação externa de ligante ao cartucho de tinta, usados para tornar maior a capacidade de impressão, não se aplicara ao projeto.

O estudo dos diversos tipos de materiais a serem usados através desta técnica de prototipagem restringe a fabricação de peças com geometria simples e tamanho reduzido, nas quais serão aplicados ensaios mecânicos e aferimentos dimensionais. Para tanto, não se faz necessário a aplicação de grandes quantidades de ligante.

Evidentemente, características como repetibilidade e resolução dos eixos de movimentação, são importantes para o posicionamento preciso do cabeçote de impressão e para a exata espessura da cama de pó.

A análise econômica do processo de impressão 3D revelou que este é um processo relativamente caro, pois tem relação direta com os materiais envolvidos. Entre os materiais, alguns demandam métodos e etapas que envolvem tecnologias de ponta e custo elevado.

Durante o projeto conceitual a escolha de algumas opções teve uma influência significativa nos custos de fabricação e operação do equipamento, como por exemplo, a escolha em fabricar os controles eletrônicos de automação.

Há um grande número de publicações sobre as abordagens adotadas para a operação e funcionamento destes tipos de equipamentos, gerando diversas opções de escolha para o desenvolvimento desta máquina. Na literatura científica brasileira foram encontradas poucas citações, reforçando mais uma vez a relevância deste projeto. A literatura internacional tende a ser maior, pois a maior parte dos desenvolvimentos no ramo está fora do Brasil.

Outro aspecto avaliado nesta etapa foi a metodologia de projeto e a otimização do produto final assim como dos processos de fabricação deste. Mesmo havendo várias fontes publicadas sobre o tema “Metodologia de Projeto”, poucas aplicações dentro do País foram encontradas. Tendo em vista que poucos produtos tecnológicos são desenvolvidos inteiramente em nosso território, a aplicação da metodologia de projeto na geração de novos conceitos e idéias reforça os objetivos deste projeto.

O total gasto envolvido na fabricação deste protótipo atingiu o valor de R\$20.000,00.

3.1.2.2 – Percepção da capacidade EESC / USP São Carlos

Durante esta etapa do projeto observou-se as competências profissionais disponíveis e a infra-estrutura do local escolhido para a fabricação e o desenvolvimento do projeto. Duas frentes foram criadas:

- Análise das competências e recursos oferecidos pela EESC, LTC e outros laboratórios;
- Aumento das competências dos envolvidos no projeto sobre impressão tridimensional.

Com diversos trabalhos executados e em desenvolvimento na área de projeto de equipamentos e manufatura de materiais cerâmicos e compósitos o laboratório LTC-USP oferece larga experiência de grande importância ao projeto em questão, também de grande importância para o contexto deste projeto, o Departamento de Engenharia Mecânica possui diversas publicações nas áreas de projeto mecânico, o Laboratório de Processos de Fabricação, com um leque de ferramentas universais de alta precisão e o Laboratório de Metrologia, capaz de aferir as dimensões das peças e componentes fabricados para compor o equipamento proposto. Ainda no ambiente do Campus USP – São Carlos, com o objetivo de aprofundar o estudo dos corpos de prova obtidos, pode-se encontrar equipamentos como microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microscópio óptico.

3.1.2.3 – Conclusão da análise de viabilidade

Considerando-se os ganhos substanciais à tecnologia brasileira gerados por este projeto e tendo em vista a riqueza dos temas abordados, tais como, metodologias de projeto, máquinas de precisão, prototipagem rápida e impressão tridimensional, faz-se viável a concepção desse projeto. A metodologia adotada para a elaboração do projeto e para a fabricação do protótipo mostrou-se viável em face aos recursos e tecnologia disponíveis. Conclui-se que o estado da arte é perfeitamente acessível, em conjunto com o contato com empresas do ramo.

3.1.3 – Projeto conceitual de uma mini-impressora 3D

Durante esta etapa, várias opções para o projeto de impressora 3D foram elaboradas, entre os quais os melhores conceitos se encontram nesse item.

O uso do quadro morfológico como ferramenta geradora de idéias justificou seu uso nesse projeto, principalmente devido o grande volume de idéias geradas.

3.1.3.1 – Delimitação do projeto

Durante a concepção da mini impressora 3D, alguns limites de projeto precisaram ser definidos.

Uma vez que a qualidade de acabamento da peça produzida por este equipamento é um dos fatores mais relevantes para esse estudo, concluiu-se que o nível de precisão oferecido pelo sistema de impressão por jato de tinta escolhido é aceitável, concentrando assim a preocupação com a seleção adequada do sistema mecânico de deslocamento do conjunto de impressão, dos eixos lineares e respectivos pares tribológicos e o sistema de movimentação (motores e drives).

Optou-se inicialmente por um conjunto comercial de elementos responsáveis pelos movimentos empregados no equipamento, porém, em meio a discussões em grupo, verificou-se a viabilidade e as vantagens em construir o sistema de movimentação.

Com o objetivo do estudo de materiais caros e de difícil processamento, é desejada a impressão 3D de corpos de prova, a exemplo de barras retangulares de dimensões 6x4x40mm.

O recipiente de armazenamento da peça dotado de base móvel deverá ter as dimensões necessárias para oferecer assim um espaço útil para impressão que possibilite não haver contato entre as suas paredes e os limites da peça a ser impressa.

Toda peça é composta de diversas fatias a serem impressas umas sobre as outras; portanto, o equipamento deve ter pelo menos dois graus de liberdade quando se fala na impressão das fatias de forma individual, dotado de mais um grau de liberdade que representa o deslocamento do conjunto de fatias previamente impressas, permitindo assim a criação de uma nova camada de pó livre de ligante.

3.1.3.2 – Quadro morfológico

Com o objetivo de aplicar uma ferramenta de geração de novos conceitos, durante esta etapa, usou-se um quadro morfológico e para a seleção dos melhores conceitos usou-se o procedimento de tomada de decisão citado em 3.1.

Este procedimento define que a seleção da melhor opção envolve os recursos, a demanda e outros fatores de relevância e, no caso do projeto em questão, os elementos envolvidos são: materiais usados, o tamanho e a forma da estrutura, precisão, custos e facilidade de fabricação e montagem.

No Quadro 1 pode-se ver o resumo das funções de maior importância no projeto (colunas) contra as possíveis soluções (linhas tracejadas). Uma vez definidas essas variáveis, é possível traçar uma linha (vermelha) indicando as soluções escolhidas em relação aos critérios adotados, gerando assim um conceito que satisfaça as demandas identificadas em 3.1.1.

- **Movimentação** – Optou-se por um equipamento capaz de movimentação X, Y e Z. Essa é a movimentação observada nos equipamentos de impressão 3D atuais. A capacidade de movimentação nas três direções faz parte do conceito de prototipagem rápida por impressão tridimensional, possibilitando a impressão de cada fatia bidimensional em uma camada de pó livre de ligante e a criação das novas camadas de pó necessárias para a composição da peça prototipada, possibilitando assim a elaboração de estudos detalhados que contribuam mais ao processo de impressão 3D e ao estudo de novos materiais;
- **Tamanho e Forma da Estrutura** – O tamanho e a forma da estrutura é de grande relevância uma vez que o formato final da estrutura deve ser o menor possível além de oferecer robustez e baixo custo. As máquinas de impressão tridimensional convencionais trabalham com diferentes conceitos, tradicionalmente possuem uma estrutura robusta e grandes dimensões, diferente do conceito abordado em nosso projeto, cuja redução de tamanho é um dos principais critérios analisados;
- **Manutenção e Custo** – De grande importância para a elaboração de um equipamento que vislumbre o uso de uma grande diversidade de materiais, a manutenção visa à capacidade de se substituir com facilidade quaisquer partes que venham a ser danificadas por materiais agressivos. Em conjunto com um baixo custo para a execução de tais procedimentos, pode-se oferecer um equipamento de grande potencial para o estudo de materiais, uma vez que os equipamentos tradicionais impõem custos altos, pessoal especializado e procedimentos específicos para toda manutenção e substituição de peças, característica esta que impõem limitação para a experimentação de novos materiais.

Quadro Morfológico - Estrutura da mini-máquina				
Movimentação	XY	XYZ	XYZθ	
Material da Estrutura	Aço SAE 1020	Aço SAE 1045	Aço Inox	Alumínio
Forma da Estrutura	Chapas parafusadas	Chapas soldadas	Perfilados parafusados	Perfilados soldados
Material Mesa	Aço SAE 1020	Aço Inox	Alumínio	Polímero
Guias Eixo Z	Guias lineares com patins de esfera	Guias lineares com patins de roletes	Eixos Lineares com pillow block dotado de rolamento axial	Eixos Lineares com pillow block dotado de mancais secos
Fuso Eixo Z	Fuso de esfera recirculante	Fuso de esfera simples	Barra roscada com bucha	Barra cremalheira com pinhão
Parafusos	Sextavado	Allen	Fenda	Fenda Philips
Mecanismo de Impressão a Jato de Tinta	Marca HP, modelo Designjet 10	Marca HP, modelo Officejet Pro K8600	Marca LexMark, modelo Z12	Marca Canon, modelo BJC 2100
Sistema de Movimentação (Drives + Controlador + Motores)	YASKAWA	BOSCH	DELTAU	HM3DP Full Controller

Quadro 1 – Quadro morfológico da mini máquina.

Tomando como referência o que foi exposto por Koenigsberger (1978), opta-se por adotar o aço 1020 como o material da estrutura, uma vez que as características do aço 1020 quando aplicado com o objetivo estrutural não oferece grandes diferenças ao aço 1045. Esta decisão foi tomada em paralelo à definição da forma da estrutura, gerando assim uma considerável economia. Tendo em vista o módulo de elasticidade pequeno, que segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) é de 7030 kg/mm² e o alto coeficiente de expansão térmica, de $2,31 \times 10^{-5}$ (1/°C), apresentados na composição mais comum e econômica do alumínio, não recomenda-se o seu uso em estruturas de máquinas. O ferro fundido envolveria um processo de fundição da estrutura e o custo do material somados a tornariam maior e mais onerosa. O quadro a seguir resume este estudo de caso:

- Forma da estrutura – Observando as estruturas das impressoras 3D comerciais é possível concluir que o padrão a ser seguido apresenta um conjunto composto de corpo estrutural, sobre o qual tem-se uma mesa de impressão, um conjunto de impressão a jato de tinta que se move axialmente à mesa de impressão e um ou mais reservatórios de pó/peça acondicionados nela, preservando a sua planicidade. Tomando como exemplo a ZPrinter 310 Plus da ZCORP, semelhante à estrutura citada anteriormente, ela apresenta uma caixa de pó e uma caixa de peça, diferente do que pretende-se fazer.

O uso de estrutura do tipo pórtico para aplicações de precisão é recomendado devido à divisão de esforços em dois pontos de apoio (SLOCUM, 1992). Devido às características dos conjuntos de impressão a jato de tinta disponíveis no mercado, esse tipo de estrutura torna-se uma provável escolha para o projeto. De caráter inovador e característica compacta este equipamento exige uma estrutura interessante, compacta e de baixo custo. Sendo um padrão excelente para pequenas máquinas torna-se ideal para a construção de um equipamento que vislumbre a execução de testes contínuos e estudos de materiais (Figura 3.3). Se adotada, essa estrutura seria fabricada através do processo de soldagem.

Figura 3.3 – Estrutura tipo Pórtio (SLOCUM, 1992).

Uma estrutura com um conjunto de caixa de abastecimento de pó e caixa de confecção de peça simplifica o processo de fabricação, mas envolve um acréscimo nas dimensões do equipamento. Um reservatório de pó suspenso, que tenha uma saída com largura idêntica à largura da caixa de confecção da peça e que se desloque o mais próximo possível da mesa de impressão, permite uma redução nas dimensões do equipamento além de uma economia na sua fabricação. Um sistema de ajuste assim como uma superfície flexível entre a mesa de impressão e a saída da caixa de pó suspensa faz-se necessária;

- Material/Mesa de impressão – O conceito abordado neste equipamento envolve uma fabricação de baixo custo e a obtenção de um equipamento robusto que possibilite o

uso de diversos materiais, incluindo materiais agressivos. Uma vez que os materiais agressivos terão um contato direto somente com o reservatório de pó e com a caixa de fabricação da peça a escolha pela fabricação desta peça em alumínio baseou-se no custo e na facilidade de fabricação. No entanto, a escolha da melhor opção de material para a mesa seguiu outros critérios;

- Fuso (eixos Y) – Com o objetivo de obter uma maior simplicidade sem sacrificar a precisão usou-se um fuso inserido em um furo dotado de rosca interna posicionado no centro do eixo do motor (passo);
- O passo do fuso, junto com a resolução do motor (passo / servo) e acoplamento, definem a resolução do sistema de movimentação (SLOCUM, 1992);
- Eixos lineares (eixo Z) – Optou-se por eixos lineares retificados com rolamentos lineares de esferas, devido a necessidade de uma maior precisão. Em nenhum momento pretendeu-se optar pelo uso de mancais de deslizamento;
- Mancais de rolamento (eixo Z) – Os mancais de rolamento escolhidos para o eixo Z são rolamentos lineares que uma vez montados fornecem uma movimentação livre e precisa;
- Fuso (eixos Z) – Uma vez que o movimento no eixo Z é gerado pelo motor (passo) do conjunto de impressão a jato de tinta responsável por alimentar o papel para a impressão, optou-se pelo uso de uma nova engrenagem no conjunto de impressão a jato de tinta e uma cremalheira fixada no corpo do equipamento projetado.

Slocum (1992) define que a resolução do sistema de movimentação depende do passo, da resolução do motor (passo / servo) e do acoplamento usado, conforme mostra a relação 21.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{Passo do fuso}}{\text{Número de pulsos do motor}} \quad (21)$$

Segundo Slocum (1992), a menor mudança de posição possível que um equipamento pode realizar ou que o seu sistema de controle pode perceber é definido como “resolução”, dividido em resolução mecânica e resolução do sistema de movimentação (associada aos motores);

Ainda segundo Slocum (1992), existem mais dois termos de grande importância para o projeto de máquinas de precisão, os quais definem erros de posicionamento:

- Acuracidade: Habilidade do equipamento em alcançar uma posição no espaço. É o erro entre o ponto previsto e o ponto atingido, também chamado de exatidão. O termo em inglês é *Accuracy*;
- Repetibilidade: Habilidade do equipamento em retornar a uma posição previamente alcançada, também chamada de precisão. O termo em Inglês é *Repeatability*.

Figura 3.4 – Definição de resolução, acuracidade e repetibilidade (SLOCUM, 1992).

De interesse do projeto, o desenvolvimento de um equipamento de precisão envolve a precisão na faixa de 5,0 a 0,5 μm . Porém, considerando que cada camada de pó a ser depositada na caixa de confecção da peça deve ter aproximadamente 100,0 μm a fabricação das partes móveis do equipamento deve ser o mais preciso possível e os motores de passo devem ter a maior resolução possível. Para aumentar a acuracidade e repetibilidade do sistema de movimentação da base da caixa de confecção da peça, optou-se por simplificar o processo de transferência de movimento perfurando o eixo do motor de passos escolhido e criando uma superfície roscada no furo criado, possibilitando o uso de um fuso que transpassa o eixo do próprio motor, tornando o protótipo apto a movimentar a base da caixa de confecção da peça pela distancia planejada de 0,1 μm , além de tornar o sistema simples e econômico de ser fabricado.

- Conjunto de impressão a jato de tinta – Dentre os diversos equipamentos de impressão a jato de tinta disponível no mercado o equipamento da marca Lexmark modelo Z12 ofereceu a melhor possibilidade de adaptação, além de ser um

equipamento de fácil manutenção e de baixo custo, o que favoreceu ainda mais a sua escolha;

- Sistema de movimentação e posicionamento motorizado – Com o objetivo favorecer ainda mais a obtenção de conhecimento e com o objetivo de reduzir os custos para a fabricação do equipamento, o desenvolvimento de um sistema de movimentação eletromecânico nas dependências do LTC prevaleceu sobre a opção de obter-se um sistema comercial do fabricante YASKAWA para executar a mesma função.

3.1.3.3 – Conceito

Durante o período conceitual, diversas idéias foram propostas, com maior intensidade nos aspectos relacionados ao número e a disposição dos reservatórios e dos conjuntos de impressão a jato de tinta (Figuras 3.5a, 3.5b, 3.5c).

Tendo como objetivo um equipamento pequeno, robusto, de baixo custo, e que possibilitasse o uso de uma grande diversidade de materiais, optou-se pela versão com uma única caixa de confecção de peça, onde a caixa de fornecimento de pó apresenta-se suspensa, e um único conjunto de impressão a jato de tinta (Figura 3.5 d).

a)

b)

Figura 3.5 – Idéias sobre o número de reservatórios e de conjuntos de impressão a jato de tinta. Em a) Dois reservatórios e dois conjuntos de impressão. Em b) Um reservatório e dois conjuntos de impressão. Em c) Dois reservatórios e um conjunto de impressão. Em d) Um reservatório e um conjunto de impressão.

O processo de estudo e desenvolvimento da estrutura foi baseado em antigos conceitos e novas idéias (Figura 3.6), mas principalmente no formato da impressora a jato de tinta escolhida, a qual, uma vez desmontada apresentou uma geometria específica, definindo a largura da mesa de impressão e os rebaixos laterais necessários para sua acomodação.

Figura 3.6 – Conceito para a estrutura do protótipo de uma mini-máquina de impressão 3D.

Tendo sua decisão final baseada no modelo abaixo (Figura 3.7):

Figura 3.7 – Conceito escolhido para a estrutura do protótipo de uma mini-máquina de impressão 3D.

3.1.4 – Projeto detalhado

Durante esta etapa, o detalhamento do conceito selecionado é executado. Através do quadro morfológico (Figura 3.1) teve-se a orientação da especificação de todos os itens do projeto e assim foi possível organizar o projeto da seguinte forma:

- Definição do conjunto de impressão a jato de tinta; neste tópico definiu-se a melhor opção disponível no mercado;
- Projeto da estrutura da mini-máquina; este tópico baseou-se na discussão sobre a movimentação, a forma e o material usado para a estrutura;

- Projeto da caixa de confecção da peça; a seleção das dimensões e dos materiais usados foi baseada no espaço livre necessário e nos materiais (pós e ligantes) a serem usados no equipamento;
- Projeto da mesa de impressão; baseado nas características da estrutura, da caixa de confecção da peça e do sistema de movimentação linear escolhido;
- Projeto do suporte do conjunto de impressão a jato de tinta; o tópico envolveu a fabricação de um suporte a ser fixado no conjunto de impressão a jato de tinta, no qual foram montados o reservatório de pó virgem, o rolo de assentamento do pó e o motor para a geração do movimento no rolo citado;
- Projeto do sistema mecânico de movimentação; as informações referentes à seleção dos eixos lineares, formas de fixação dos mesmos, seus respectivos rolamentos lineares, cremalheira e pinhão a ser usado para gerar o deslocamento compõem a base de toda movimentação do projeto;
- Adaptação do conjunto de impressão a jato de tinta; esse tópico concentrou as características necessárias para a fabricação de peças que fazem a ligação do conjunto de impressão a jato de tinta e o sistema de movimentação linear;
- Projeto do sistema eletrônico de movimentação; a definição dos conjuntos eletrônicos responsáveis por controlar a dinâmica de todo equipamento, incluindo uma placa principal, uma placa de chaveamento de sinais, um *driver* para motores unipolares, um *driver* para motores bipolares e conjunto de alimentação elétrica;
- Montagem do conjunto.

Optou-se por iniciar o projeto detalhado pela definição do conjunto de impressão a jato de tinta devido ao fato de ser esta a peça principal de equipamentos de impressão 3D; sendo assim, todo o restante deveria respeitar as suas dimensões e limitações.

3.1.4.1 – Definição do conjunto de impressão a jato de tinta

A impressão a jato de tinta deve atender aos critérios de custo, facilidade de manutenção e recarga de cartuchos, facilidade de adaptação e bom funcionamento com redução de componentes. Segundo pesquisas feitas em alguns modelos disponíveis durante o desenvolvimento do projeto foram obtidos os resultados que se seguem:

a) Impressora Canon BJC 2100

Esta impressora ofereceu a vantagem de ser portátil, de mecânica simples e de fácil recarga, mas em contrapartida não permitiu o funcionamento sem seu conjunto de tracionamento de papel. Descobriu-se que parte do movimento gerado pelo motor de passos responsável pelo tracionamento do papel criava um movimento no lado oposto do motor que alimenta um sensor de posicionamento que impossibilitava a adaptação deste modelo de impressora no corpo da máquina desenvolvida neste projeto.

b) Impressora Epson Stylus Color 800

Apesar da tecnologia conhecida como Bubble Jet, usada na cabeça de impressão deste equipamento, permitir o uso de ligantes sensíveis ao calor, uma cabeça de impressão fixa ao corpo do equipamento e a possibilidade do seu entupimento, poderia acarretar em uma inutilização da mini-máquina, forçando assim o estudo para uma nova escolha.

c) Impressora Lexmark Z12

Impressora de baixo custo e de fácil manutenção, este modelo mostrou-se robusto e possibilitou o uso das funções de impressão mesmo estando em um estado mais básico, ou seja, o equipamento executou a impressão mesmo estando presente somente a estrutura metálica principal, o conjunto de movimentação do cartucho de tinta e a placa eletrônica de controle, tornando assim possível o aproveitamento deste na composição final da mini-máquina em desenvolvimento.

3.1.4.2 – Projeto da estrutura da mini-impressora 3D

Optou-se por uma estrutura em aço 1020 com partes soldadas que permitissem a movimentação nas direções cartesianas X,Y e Z.

A dimensão inicial da mesa de impressão teve como base as características e medidas do conjunto de impressão a jato de tinta, as dimensões da caixa de confecção de

peça e as dimensões da área de impressão equivalente ao formato A4 adotado como padrão para este trabalho.

Com base nas características do conjunto de impressão a jato de tinta, após a remoção das peças desnecessárias ficou definida a necessidade de rebaixos nas duas laterais da estrutura capazes de acomodar os eixos lineares, os adaptadores e *pillow blocks* e o conjunto de impressão propriamente.

Foi reservado espaço suficiente para acomodar a caixa de confecção de peça, com condições que permitisse acomodar também o sistema de deslocamento do pistão de acionamento.

3.1.4.3 – Projeto da caixa de confecção da peça

A confecção desta parte da mini-máquina teve sua motivação no uso de materiais agressivos. Devido esta característica, optou-se pelo aço inox como melhor opção em material a ser usado. Com o objetivo de tornar este conjunto de fácil manutenção, seu projeto envolveu o uso de mancais de bronze para todas as peças com movimento relativo, uma base de pistão dividida em duas partes e um conjunto de deslocamento resumido, evitando partes desnecessárias e assim diminuindo possíveis problemas mecânicos.

A dimensão final do conjunto objetivou tornar possível a confecção de corpos de prova em um espaço útil com altura de 70,0 mm e diâmetro de 70,0 mm.

3.1.4.4 – Projeto do suporte do conjunto de impressão a jato de tinta

Uma estrutura em aço 1020 com partes soldadas que permitisse a fixação do reservatório de pó virgem, a fixação do rolo de assentamento do pó e para a fixação do motor responsável pela geração do movimento no rolo citado, foi baseada no conceito de redução do tamanho físico do equipamento.

3.1.4.5 – Projeto do sistema mecânico de movimentação

Para especificar claramente o detalhamento deste item, torna-se necessário à divisão em subitens: Eixos lineares, Rolamentos lineares e Sistema motor para o movimento linear.

a) Eixos lineares

O movimento axial responsável pelo deslocamento do conjunto de impressão a jato de tinta através da extensão da mesa de trabalho, será viabilizado

em parte, por um conjunto de dois eixos lineares e seus respectivos rolamentos lineares, incluindo um par de *pillow blocks* responsável por estabelecer a saudável de interação entre os rolamentos lineares e o conjunto a ser deslocado. Foi definido que o equipamento em questão deveria possuir uma área de impressão equivalente ao espaço disponível em um papel padrão A4, ou seja, deveria possuir a liberdade de se deslocar 210,0 x 297,0 mm em cada etapa do processo de impressão 3D.

Segundo pesquisas e discussões entre os colaboradores do projeto, a montagem sugerida seria composta de dois eixos lineares retificados, sendo o primeiro dotado de dois rolamentos lineares, acondicionados em um *pillow block*, enquanto o segundo teria apenas um rolamento linear também acondicionado em um *pillow block*, evitando assim qualquer travamento e dispensando ajustes finos no alinhamento deles.

O sistema de movimentação no eixo X diz respeito ao próprio mecanismo de deslocamento do cartucho do conjunto de impressão a jato de tinta. A carga aplicada sobre os eixos lineares responsáveis pelo movimento no eixo Z é aproximadamente o peso do conjunto de impressão a jato de tinta somado ao peso dos dois *pillow blocks*, ou seja, aproximadamente 2,5 kg, no entanto, a disponibilidade de eixos robustos a um baixíssimo preço teve grande influência na seleção deste item, adotando-se o modelo 12H6-400, do fabricante Tekkno.

Devido a baixa complexidade e baixo custo de fabricação, os suportes para fixação dos eixos lineares e os *pillow blocks* foram desenhados e confeccionados nas dependências do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, mais especificamente no Laboratório de Processos de Fabricação.

Adotou-se 390,0 mm de curso para o eixo Y. Tendo em vista que em X ficou-se preso às medidas do conjunto de impressão a jato de tinta, para efeito de padronização adotamos a 210,0 mm de curso. Para o eixo Z, com base nas dimensões previamente definidas para a estrutura do protótipo e observando o objetivo de obter um equipamento com tamanho reduzido, adotou-se 70,0 mm de curso.

Neste projeto, não se aplicam algumas das características citadas, porém, várias delas são convenientes, como: facilidade de montagem e desmontagem.

Mesmo acreditando que os critérios adotados para definir a maior carga aplicada ao conjunto possam estar incompletos, ainda assim a margem de erro obtida com a seleção deste item torna viável o bom funcionamento do equipamento.

b) Rolamentos lineares

Para evitar balanços no conjunto de impressão a jato de tinta durante o movimento e para assim promover um resultado de precisão na deposição do ligante, foi escolhida a composição de dois rolamentos lineares em um dos lados e apenas um rolamento linear no eixo linear do lado oposto. Respeitando as medidas dos eixos lineares já escolhidos, optou-se por rolamentos lineares modelo TW12UU, também do fabricante Tekkno.

c) Sistemas de transmissão de movimento

Durante a elaboração do projeto conceitual, diversas opções para a transmissão de movimento foram propostas e até mesmo testadas em escala.

Em relação ao movimento aplicado ao eixo Y, ficou claro que a opção mais adequada envolveria o motor existente no conjunto de impressão a jato de tinta, em uma situação normal, responsável por puxar o papel a ser impresso. A solução adotada foi a instalação de uma cremalheira paralela ao comprimento da mesa de impressão em conjunto com a instalação de uma engrenagem projetada para permitir que o movimento gerado pelo motor represente o equivalente a área de impressão em uma situação normal.

Já o eixo Z teve seu sistema projetado com simplicidade e objetivando uma economia de espaço e a redução de pontos críticos para o bom funcionamento desta máquina. O motor adotado foi um motor nema 13 marca Sanyo Denki modelo 103-545-1750, para transferir o movimento gerado, seu eixo recebeu um furo, no qual foi feita uma rosca M3 onde uma barra roscada de mesma medida foi montada. Foi desenvolvido um sistema estável para a transmissão do movimento gerado pela barra roscada para a peça que se deseja movimentar.

3.1.4.6 – Projeto da mesa de impressão

A confecção desta parte da mini-máquina teve sua motivação no baixo custo de fabricação e na boa adequação de todos os seus componentes Alumínio foi selecionado como material a ser usado e com o objetivo de tornar possível a combinação das diversas partes que se relacionariam durante a montagem e funcionamento deste equipamento, foi necessário o uso de dimensões baseadas em todas as outras partes deste projeto. Para o efeito de padronização, a dimensão final da mesa do conjunto ficou definida em 390,0 mm de comprimento, 210,0 mm de largura e 16,0 mm de espessura sobre a qual ainda foram usinados os rebaixos para o encaixe da caixa de confecção de peça e para o encaixe da saída de excesso de pó.

3.1.4.7 – Adaptação do conjunto de impressão a jato de tinta

A confecção de adaptadores que possibilitassem a interligação entre os *pillow blocks* e a estrutura do conjunto de impressão a jato de tinta escolhido foi feita combinando as medidas dos *pillow blocks*, das bases esquerda e direita do conjunto de impressão citado e a altura necessária entre este conjunto e a mesa de impressão. Por fim tais peças de adaptação tornaram-se também peças de ajuste, facilitando a montagem e manutenção da mini-máquina.

3.1.4.8 – Projeto do sistema eletrônico de movimentação

O sistema eletrônico responsável pela automação dos movimentos do protótipo da mini-impressora 3D teve inspiração em trabalhos desenvolvidos por Fogassa, 2009. Seu projeto batizado como HM3DP é dotado de placas de controle capazes de controlar toda a dinâmica e funcionamento da mini-máquina (Figura 3.8).

O projeto eletrônico definido foi dotado de uma placa principal micro-processada, responsável por receber estímulos e gerar sinais para outras placas, e uma placa de chaveamento de sinais, que tem o objetivo de promover a trocas da alimentação de sinais do motor de passos da impressora a jato de tinta, o qual é responsável por movimentar a impressora pela mesa de impressão durante o processo de impressão do perfil bidimensional de uma das camadas do objeto desejado.

Uma vez concluída a impressão de uma camada, o sinal do sensor de fim de curso (*cycle start*) é enviado para a placa principal e neste momento essa placa dispara uma série de eventos. Entre os sinais de estímulo gerados, está um sinal com numero de passos e a direção que o movimento deve assumir, o qual é enviado para uma controladora de motor de passos (unipolar), responsável por acionar o motor de passos da caixa de confecção da peça, o que resulta em um pequeno movimento no pistão de aproximadamente 100,0µm.

No mesmo momento um sinal semelhante é enviado para a placa de chaveamento de sinais e o motor de passos da impressora a jato de tinta passa a ser controlado por uma nova placa, uma controladora para motor de passos (bipolar), que também recebe da placa principal o sinal com numero de passos e a direção que o movimento do motor de passos deve assumir para que a impressora a jato de tinta retorne a sua posição inicial.

Após o movimento de retorno da impressora a jato de tinta ser concluído a placa eletrônica do conjunto de impressão volta a ser a fonte de sinais para o motor de passos e um novo ciclo de impressão tem início.

Uma vez adotado este sistema, a interação de computadores no processo de impressão 3D, se resume em enviar trabalhos de impressão bidimensional sucessivos, os

3.1.4.8.1 – Placa principal microprocessada

A placa principal microprocessada usa um microcontrolador Atmel AT90S2313, no qual foi descarregada uma seqüência de instruções que definem quais estímulos devem ser reconhecidos e quais reações devem ser executadas. A placa aguarda um sinal de fim de curso, quando então gera um sinal de acionamento para a placa de chaveamento de sinais, um sinal para pausar os trabalhos de impressão do conjunto de impressão a jato de tinta e sinais de acionamento de fase para os dois motores de passo da mini-máquina (Figura 3.9).

a)

b)

c)

d)

Figura 3.9 – Placa principal microprocessada.

a) layout da face superior b) layout da face inferior c) placa pronta - inferior d) placa pronta – superior.

3.1.4.8.2 – Placa de chaveamento de sinais

A placa de chaveamento de sinais possui dois relês, um relê de dois pólos, responsável por acionar o motor do rolo que acomoda novas camadas de pó e interromper o fio ligado ao pino 11 da porta paralela, com o objetivo de parar momentaneamente os trabalhos presentes na fila de impressão. Já um segundo relê de cinco pólos, é responsável por efetuar a troca do controle do motor de passos responsável por deslocar o conjunto de impressão a jato de tinta entre duas fontes de sinal diferentes (Figura 3.10).

a)

b)

c)

d)

Figura 3.10 – Placa de chaveamento de sinais.

a) layout da face superior b) layout da face inferior c) placa pronta - inferior d) placa pronta – superior.

3.1.4.8.3 – Driver unipolar

O *driver* unipolar transforma as instruções geradas pela placa principal microprocessada em uma série de estímulos elétricos sincronizados que alimentam as bobinas do motor de passos e cria o movimento responsável pelo deslocamento do pistão da caixa de confecção de peça para baixo e assim permitir a sobreposição de uma nova camada de pó a ser impressa.

3.1.4.8.4 – Driver bipolar

O *driver* bipolar também transforma as instruções geradas pela placa principal microprocessada em uma série de estímulos elétricos sincronizados que alimentam as bobinas do motor de passos e cria o movimento responsável por deslocar todo o conjunto de impressão a jato de tinta para a posição inicial e permitir assim o início de um novo ciclo de impressão.

3.1.4.8.5 – Conjunto de alimentação

O conjunto de alimentação é constituído de transformadores e fontes chaveadas que alimentam as diversas placas do equipamento, inclusive o conjunto de impressão a jato de tinta. Estão dispostos em um mesmo ponto de fixação e com isso facilitam a manutenção da mini-máquina.

3.1.4.9 – Montagem do conjunto

O conjunto montado proposto para o protótipo da mini-impressora 3D está ilustrado pelo esquema da Figura 3.11 e pela Figura 3.12.

Figura 3.11 – Esquema da mini impressora 3D montada.

Figura 3.12 – Desenho em perspectiva do protótipo da mini-impressora 3D.

3.1.4.10 - Planejamento da fabricação do protótipo

Uma vez definido o melhor conceito da mini-impressora 3D, a fase de planejamento da fabricação da mini-máquina teve início. Definir um cronograma especificando o tempo necessário para a fabricação também é parte importante de um projeto. Um cronograma com a ordem das tarefas e tempo estimado para cada uma delas foi elaborado definindo um intervalo de 34 semanas. Para estimar o tempo de execução de tarefas como a usinagem, alterações, correções e montagem, foi levado em consideração a experiência prática dos colaboradores do projeto, a disponibilidade de materiais e a disponibilidade de mão de obra capacitada. As tarefas de fabricação foram divididas em duas linhas principais, a fabricação do conjunto mecânico e a fabricação do conjunto eletrônico.

A fabricação do conjunto mecânico envolveu a compra de matéria prima, a usinagem das diversas partes e a montagem, enquanto a fabricação do conjunto eletrônico dependeu da compra de materiais, a fabricação das placas de controle e a montagem. É importante citar que apesar de terem sido confeccionadas pelo autor, os projetos das placas de controle foram selecionados na Internet, obedecendo assim a uma filosofia de compartilhamento de conhecimento e tecnologia difundido pela Internet.

3.1.5 - Fabricação do protótipo

Diversas alterações e mudanças de abordagem foram feitas durante o processo de fabricação do protótipo da mini-impressora 3D, tais alterações foram motivadas por sugestões, adaptações e incompatibilidade de alguns itens.

Tendo como referência o detalhamento do projeto, torna-se interessante explicitar o detalhamento das diversas partes da fabricação.

3.1.5.1 – Estrutura

Uma vez cortados e preparados os corpos metálicos que foram usados para a fabricação da estrutura, seguiu-se à montagem das estruturas básicas.

A sequência da montagem (soldagem) da estrutura do protótipo da mini-impressora 3D é mostrada na Figura 3.13.

a)

b)

c)

d)

Figura 3.13 – Seqüência da montagem (soldagem) da estrutura do protótipo da mini-impressora 3D. Em a) Montagem das laterais da estrutura. Em b) Montagem da parte superior da estrutura. Em c) Estrutura montada. Em d) Estrutura finalizada.

Baseado nos desenhos previamente preparados para auxiliar a fabricação da estrutura, o material foi inicialmente montado em dois conjuntos referentes as laterais da estrutura através de solda elétrica convencional (Figura 3.13a).

A parte superior da estrutura deteve uma atenção maior devido a sua complexidade e a necessidade de manter as dimensões e alinhamentos conforme os desenhos fornecidos.

Um conjunto referente à parte inferior da estrutura também foi produzido e todos os conjuntos previamente montados foram unidos por solda, concluindo assim a primeira etapa da fabricação da estrutura. A estrutura soldada apresenta uma maior rigidez em relação a estruturas somente parafusadas (KOENIGSBERGER, 1978). Novas etapas, que envolveram o reforço das soldas e a adição de pequenos blocos em aço carbono em oito pontos distintos da parte superior da estrutura com o objetivo de permitir a fixação da mesa principal e dos suportes dos eixos lineares, também foram executados (Figura 3.13b).

Durante a soldagem foi utilizado o processo MIG com gás inerte, onde um arame MIG ER-7056 (AWS A5.18/ A5.18M2005) de bitola 0,2mm (Gerdau, corrida 92446600, Jan/2008) e o gás Inerte ATAL 25 produto M21 respeitando a norma Européia pr EM 439 (Air Liquide Brasil Ltda). O processo MIG com o referido arame e mistura de gases é recomendado para a solda de peças em aço carbono e peças em aços de baixa liga; nesta etapa do projeto foi utilizado o Aço ABNT 1020. Por fim foi feito o fresamento dos blocos soldados com o objetivo de eliminar distorções geométricas, obter a planicidade e nivelamento das superfícies que receberiam a mesa principal e os suportes dos eixos, concluindo assim todo o processo de fabricação da estrutura. Foi garantindo um resultado robusto e preciso, satisfazendo as expectativas iniciais do projeto (Figura 3.13c).

Na fase final de fabricação algumas alterações na estrutura foram feitas. Uma vez concluída esta etapa da soldagem da estrutura de acordo com as expectativas, ela recebeu um acabamento e posteriormente a pintura propriamente dita (Figura 3.13d).

3.1.5.2 – Caixa de confecção da peça

Tendo em vista a necessidade de suportar ataques químicos e a abrasão de materiais cerâmicos a fabricação do corpo principal da caixa de confecção da peça foi feita partindo de uma peça maciça em aço inoxidável, a qual foi torneada para atingir as dimensões desejadas e furada, na flange superior, para permitir sua fixação na mesa de impressão, assim como, na no borda inferior, para permitir a fixação do restante das peças que compõem o conjunto da caixa de confecção da peça, conforme ilustra a Figura 3.14.

Figura 3.14 – Corpo principal da caixa de confecção da peça.

Na seqüência foram confeccionados o fundo da caixa, o suporte do pistão em aço inoxidável e a parte superior do pistão em alumínio, todas as peças foram niveladas, torneadas, fresadas e perfuradas com precisão para atingir a geometria desejada e garantir o bom encaixe com as demais peças do conjunto (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Partes da caixa da confecção da peça e do pistão.
a)fundo b)base do pistão c)pistão.

Com o objetivo de garantir a precisão e uniformidade no sistema de transmissão de movimento e deslocamento do pistão pela extensão da caixa de confecção da peça, foi fabricado um sistema reforçado, composto por guias, torneadas, perfuradas e rosqueadas, juntamente com mancais personalizados, nivelados e fresados e perfurados (Figura 3.16).

Esse sistema é fixado na base do pistão, passa através de mancais no fundo da caixa de confecção da peça e tem parte da sua estrutura presa ao fuso responsável por promover a transferência de movimento do motor de passos para o pistão, conforme ilustra a Figura 3.17. A Figura 3.18 ilustra a caixa de confecção da peça completa.

Figura 3.16 – Partes do sistema de guia e transmissão de movimento.

Figura 3.17 – Desenho do conjunto do sistema de transmissão e guia do movimento.

Figura 3.18 – Caixa de confecção da peça montada.

3.1.5.3 - Mesa de impressão

A mesa de impressão foi confeccionada conforme ilustra a Figura 3.19, onde o material bruto foi cortado, nivelado e rasgos, rebaiços e furos roscados foram feitos com o objetivo de acondicionar e fixar a caixa de confecção da peça, a moldura da saída de excesso de pó e a base para fixação da cremalheira sincronizadora.

Figura 3.19 – Mesa de impressão.

3.1.5.4 – Suporte do conjunto de impressão a jato de tinta

O suporte do conjunto de impressão a jato de tinta foi confeccionado em chapas dobradas, soldadas e perfuradas (Figura 3.20), formando uma estrutura na qual foram fixados:

- O reservatório de pó virgem, usinado em duas partes, um funil em alumínio e uma base em nylon (Figura 3.20);
- O rolo de assentamento de pó, adaptado no conjunto com o objetivo de promover o assentamento preciso do pó (Figura 3.21);
- O motor DC responsável por gerar o movimento do rolo citado anteriormente (Figura 3.22).

Figura 3.20 – Reservatório de pó virgem: vista frontal.

Figura 3.21 – Reservatório de pó virgem: vista inferior.

Figura 3.22 – Motor e rolo de nivelamento do pó em detalhe.

3.1.5.5 – Sistema mecânico de movimentação

O sistema mecânico de movimentação é formado por um par de eixos lineares (guias) e rolamentos lineares acondicionados em *pillow blocks* conforme ilustra a Figura 3.23. Nesta etapa foram feitos cortes para o ajuste dimensional dos eixos lineares, a fabricação dos 4 suportes de dos respectivos eixos, a fabricação dos 2 *pillow blocks* e a montagem do conjunto.

Figura 3.23 – Sistema mecânico de movimentação.

A adaptação do conjunto de impressão a jato de tinta envolveu a confecção de um sistema de cremalheira formado por uma cantoneira e dois fixadores responsáveis por prender a correia sincronizadora escolhida como mostra em detalhe a Figura 3.24.

Figura 3.24 – Detalhe da cremalheira sincronizadora.

Ainda com o objetivo de promover o movimento do conjunto de impressão a jato de tinta fazendo o uso do motor e engrenagens já existentes, foram fabricados, uma pequena engrenagem em nylon com diâmetro externo de 10,8 mm, largura de 8 mm, 25 dentes e módulo de 0,4 mm e seu suporte em alumínio, tornando possível a transferência de movimento para o tucho de correia sincronizadora fixado na mesa principal (Figura 3.25).

Figura 3.25 – Engrenagem da cremalheira sincronizadora.

3.1.5.6 – Sistema eletrônico de movimentação

Os negativos dos layouts das placas eletrônicas foram impressos em uma impressora laser monocromática marca HP modelo 1020 usando papel acetinado; o lado impresso foi fixado em placas de cobre, nas quais foi aplicado calor e pressão. Como resultado o tonner representando o layout das placas eletrônicas foi transferido para as placas de cobre; elas foram tratadas com uma solução de percloroeto de ferro em meio aquoso e tal solução foi responsável por remover o cobre das áreas desprotegidas. Foi possível obter placas de circuito impresso de excelente qualidade a um baixíssimo custo, conforme ilustra a Figura 3.26.

a)

b)

Figura 3.26 – Placas eletrônicas de automação da mini-impressora 3D. Em a) Placa principal microprocessada. Em b) Placa de chaveamento de sinais.

Uma vez concluída a etapa de fabricação e montagem da placa principal, um programa escrito em AVRBasic e compilado através do compilador BASCOM-AVR foi transferido para o microcontrolador Atmel AT90S2313 através do software de gravação ICProg e o hardware de gravação “Fun Card Programmer”.

4 – RESULTADOS

Os resultados foram divididos em 3 grupos, o projeto da mini-impressora 3D, o estudo da manufatura de pó em gesso para prototipagem e a validação da mini-impressora 3D.

4.1 – O protótipo da mini-impressora 3D

O protótipo de uma mini-máquina de impressão 3D foi concluído conforme ilustra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Protótipo de uma mini máquina de impressão 3D.

4.2- Ensaios

Este trabalho também tem o objetivo de estudar a aplicação de materiais cerâmicos usados em Implantes e Próteses. Com pouco material publicado nesta direção, é então necessário a validação do equipamento e a criação de referência.

Para a comparação foi desenvolvida uma nova formulação de pó, corpos de prova foram prototipados em um equipamento de impressão 3D existente e corpos de prova foram prototipados no equipamento desenvolvido neste projeto, permitindo comparações e a validação do trabalho.

4.2.1 - Formulação

É desejado que o pó para prototipagem rápida possua fluidez para distribuição homogênea, alto empacotamento para densificação máxima do prototipado, que não seja higroscópico, que as dimensões dos aglomerados sejam menores que 0,1mm (espessura da camada) e que apresente bom acabamento superficial da camada depositada. Aglomerados em formato esférico são idealizados.

Foram elaboradas composições do material sólido para serem analisados, os constituintes principais propostos foram: o gesso em pó para pega química inicial, micro esferas de poli (metacrilato de metila) para posterior matriz estrutural e auxílio na obtenção de fluidez e o CMC como absorvente do excesso de fluido.

Para a formulação do pó foram selecionados os materiais listados, a saber:

- Gesso: Novo Gesso Mangueira, Lote 18/05/09. Densidade real da Gipsita 2 g/cm³;
- Poli(metacrilato de metila) micro esferas: VIPI FLAS^{H®}, densidade 1,18 g/cm³;
- Carboximetilcelulose (CMC): C₂₈H₃₀Na₈O₂₇ do laboratório Sigma - Aldrich – C 5678, com densidade 1,59 g/cm³, pó absorvente: evita que os *binds* se propagem;
- PVB: Poli Vinil Butiral (Butum B98), com densidade 1,1 g/cm³. Ligante para aglomeração das partículas;
- Álcool isopropílico: densidade 0,786 g/cm³, fase líquida da mistura dos materiais, solvente do ligante PVB.

A formulação inicial A foi proposta baseada em gesso puro. Adições de PVB e CMC foram introduzidas na busca pelo aglomeramento (fluidez) do pó e contenção da propagação ligante (*binds*) e finalmente adição de superior a 20vol% em esferas de acrílico, com o objetivo de se obter melhor fluidez e possibilidade de *cross link* após conformação com a pintura de cianoacrilato. O número inicial de 20vol% foi para prover a percolação, pois

o arranjo de partículas esféricas de dois materiais diferentes, distribuídas randomicamente apresenta o comportamento de percolação acima de 16vol% e percolação em rede tridimensional acima de 22vol%. A tabela 3 apresenta as formulações idealizadas, onde D_{th} é a densidade teórica.

Tabela 3. Formulações do pó para prototipagem.

Composição	Gesso (vol %)	Esferas de Acrílico (vol %)	CMC (vol %)	PVB (vol %)	D_{th} (g/cm ³)
A	100	0	0	0	2,00
B	97,5	0	1	1,5	1,98
C	96	0	1	3	1,97
D	94	0	1	5	1,95
E	78	20	1	1	1,82

Os pós foram misturados em moinho de jarros carregado de esferas de alumina, e colocado no equipamento numa concentração de 30vol% de sólidos formando uma barbotina. Foi utilizado um jarro de nylon, com diâmetro interno de 100,0 mm, diâmetro externo de 120,0 mm e altura de 160,0 mm, com volume total de 1250 mL. O mesmo foi carregado com 40vol% de cilindros regulares de alumina (1000g) perfazendo 400 mL de volume útil. O carregamento do jarro seguiu a sequência: álcool isopropílico e PVB misturados por 30 minutos, em seguida foi adicionado gesso e CMC, que foi misturado e homogeneizado por 2 horas. Após esse período houve o descarregamento do jarro e secagem com soprador de ar quente a aproximadamente 80°C. O pó foi granulado durante o sopro de ar quente e classificado em malhas (peneiras) de aço inoxidável. As amostras classificadas foram submetidas a densidade de empacotamento através do carregamento do pó em uma proveta e submetida a quedas sobre a mesa de granito. Foram feitas medidas de fluidez utilizando-se um Viscosímetro Copo Ford nº 8. Variações granulométricas das composições estão apresentadas na Tabela 4. As amostras classificadas entre malha #80 e #200 mesh apresentaram a melhor fluidez, sendo que a amostra D1 foi a única que obteve fluidez para escoar pelo orifício do viscosímetro Copo Ford 8, apresentaram também as melhores densidades de empacotamento relativa a classificação mais fina. A amostra A1 (mesh #80 - #200) que foi experimentada na impressora não apresentou as escamações no tanque de alimentação de pó igualmente ao verificado pelas amostras abaixo de #200mesh (Figuras 4.3a e 4.3b). Entretanto ao ser aplicado na Impressora 3D a deposição das camadas não foi homogeneamente preenchida

formando descontinuidade entre os pós, fazendo uma superfície texturizada, as Figuras 4.4a e 4.4b ilustram a amostra A2 depositada no tanque reservatório ilustrando a citada textura e a C4 sendo impressa ilustrando o não preenchimento da camada, respectivamente. As malhas empregadas permitem a passagem de partículas com dimensões máximas (equivalentes) às apresentadas: malha #80 mesh $\leq 180,0\mu\text{m}$; #170 mesh $\leq 90,0\mu\text{m}$; #200 mesh $\leq 74,0\mu\text{m}$; #400 mesh $\leq 38,0\mu\text{m}$.

Tabela 4 – Amostras por classificação granulométrica e caracterização.

Identificação	Malha	Densidade Empactotamento (g/cm ³)	D/Dth (%)	R Flexão (MPa)	IF
A1	$80 \leq x \leq 200$	0,85	42,5	$0,38 \pm 0,07$	0
A2	$200 \leq x \leq 400$	0,77	38,5	-	0
B1	$x \leq 200$	0,74	37,4	-	0
C1	$x \leq 400$	0,71	36,0	-	0
C2	$x \leq 200$	0,83	42,1	-	0
C3	$200 \leq x \leq 400$	0,91	42,2	$0,23 \pm 0,01$	0
C4	$80 \leq x \leq 400$	1,01	51,3	-	0
C5	$80 \leq x \leq 200$	0,98	49,7	-	0
D1	$80 \leq x \leq 200$	1,03	52,8	-	0
D2	$200 \leq x \leq 400$	0,95	48,7	$0,35 \pm 0,01$	6,81s
E	$(200 \geq x \geq 400)$	0,98	53,8	-	0
Padrão	$x < 170$	1,9	57	$0,69 \pm 0,05$	57,0s

As amostras classificadas entre as malhas #200 e #400 mesh não mostraram as melhores densidades relativas e sua fluidez somente pode ser observada visualmente pela distribuição e empacotamento nos tanques da impressora. A amostra em gesso puro (A1) teve escamações exageradas apresentando vazios na deposição nos tanques, a Figura 4.3a mostra este efeito. As amostras com adição de PVB mostraram avanço e estão ilustrados pela Figura 4.3b, 4.3c e 4.3d, respectivamente. Notou-se progresso com o aumento desta adição, também na densidade de empacotamento, onde houve aumento progressivo. Este progresso também pode ser observado pela imagem da superfície superior dos corpos prototipados mostrados na Figuras 4.5a, 4.5b e 4.5c, correspondente às amostras A1, C3 e D2. É observado que a amostra A1, com gesso puro na granulometria entre #80 e #200 mesh teve suas camadas pouco preenchida e conseqüentemente muita porosidade e deformação da superfície. A amostra C3 (Figuras 4.5b e 4.3c) apresentou evolução na

qualidade superficial, mas ainda com preenchimento ineficiente das camadas devido à baixa fluidez e baixa densificação 42,2 % da densidade teórica que resultou em acabamento superficial ainda irregular. A amostra D2 (Figuras 4.3d e 4.5c) apresentou bom desempenho e devido a sua boa distribuição e empacotamento na camada depositada mostrou melhor acabamento superficial, teve 48,7% da densidade teórica. O padrão mostrada pela Figura 4.5d, ainda apresenta o melhor acabamento superficial, isto devido ao seu alto empacotamento com 57% da densidade teórica e sua fluidez que já pode ser aferida no Copo Ford 8.

a) b)
Figura 4.2 – Imagens em MEV das amostras E (a) e Padrão (b).

c) d)
Figura 4.3 – Classificação granulométrica entre malhas #200 e #400 mesh. Em a) amostra A2, em b) amostra B1, em c) amostra C3 e em d) amostra D2.

A amostra E na qual foi adicionado micro esferas de acrílico (Figura 4.2a) apresentou melhoria na densidade de empacotamento, 53,8% da densidade teórica. Apresenta potencial para pintura com cianoacrilato para obtenção das ligações cross link com as esferas de acrílico, não foram prototipados corpos desta amostra.

Figura 4.4 – Classificação granulométrica entre malhas #80 e #200 mesh. Em a) amostra A1, Em b) a amostra C4 sendo impressa.

A variação dimensional é uma característica importante para a montagem de peças, o CMC conjugado com o empacotamento dos pós forneceu esta função que é ilustrada na Tabela 5 onde são apresentadas medidas da largura (projeto no CAD 6mm) e densidade relativa com a teórica. Observa-se que as amostras com adição de PVB (C3 e D2) tiveram melhor desempenho que a com gesso puro (A1), porém inferior ao padrão que teve sua largura mais próxima a do projeto, sugere que a participação do CMC foi efetiva, porém requer estudo de variações na sua concentração.

Tabela 5 – Variação dimensional e densidade relativa dos prototipados.

Amostra	Largura (mm)	Densidade Relativa D/Dth (%)
A1	6,71 $\pm$ 0,18	35
C3	6,94 $\pm$ 0,06	32
D2	6,94 $\pm$ 0,07	35
Padrão	6,28 $\pm$ 0,09	40

A resistência mecânica é de fundamental importância no manuseio para remoção e pintura das peças, a Tabela 4 apresenta valores de resistência à flexão 3 pontos, a amostra com apenas com gesso (A2) obteve valor de mesma magnitude (0,38 $\pm$ 0,07 MPa) que a amostra com 5vol% de PVB (D2) com 0,35 $\pm$ 0,01 MPa, e superior à amostra com 3 vol% de

PVB (C3), mostrando que há um compromisso com a densificação da amostra, sugere que o PVB depositado sobre as partículas de gesso iniba a ação reativa da água, maior desvio padrão observado na amostra com apenas gesso é devido a sua distribuição e empacotamento não uniforme. A amostra padrão forneceu o dobro da resistência mecânica. O projeto de um ligante considerando a reação com o PVB pode promover melhorias.

4.2.2- Corpos de prova de controle

Para se obter os corpos de prova de controle foi utilizado para a prototipagem o equipamento ZPrinter® 310, produzido pela Z.Corporation.

Para preenchimento mínimo do reservatório e impressão longitudinal das amostras foram planejados lotes de 800 cm³, estimados em 700g de pó.

Conformação, corpos cilíndricos, discos e em barras foram prototipados para ensaios mecânicos, físicos (densidade e porosidade) e metrologia.

Caracterização Física, para os ensaios mecânicos foram obtidos corpos para flexão 3 pontos (ASTM C1161-90), em barras retangulares de dimensões 6x4x40mm com *Support Span* de 20mm.

Figura 4.5 - Ilustração das superfícies dos corpos de controle prototipados, em a) amostra A1, em b) amostra C3, em c) amostra D2 e em d) padrão.

4.3 – Validação do protótipo

Embora a máquina tenha sido capaz de imprimir camadas sucessivas, tendo cada camada 100,0µm de espessura, foi necessária a intervenção manual na alimentação das subseqüentes camadas de pó, o que aponta para a necessidade de melhorias no sistema de deposição de pó.

No protótipo testado, o sistema do rolo funcionou adequadamente, porém o funil de alimentação depositou pó em demasia, causando um grande atrito e por consequência algumas camadas anteriormente impressas tiveram deslocamento de sua posição original.

Atualizações no produto se fazem necessárias para validar o conceito, as principais são:

- A remoção do funil de alimentação de pó;
- O desenvolvimento e instalação de um sistema automatizado de dosagem e deposição de pó;

Dois conceitos para o novo sistema tem sido considerados, o primeiro envolve um mecanismo dosador baseado em uma rosca sem fim controlada por um motor de passo, já o segundo envolve um sistema de dosagem baseado em um dosador circular multi-câmaras.

É esperado que o projeto de um produto seja um processo altamente iterativo e iterativo e, portanto atualizações constantes e contínuas deverão ser realizadas no decorrer da vida deste projeto e produto.

5 – CONCLUSÕES

A prototipagem cerâmica ou mesmo a manufatura direta para alguns produtos é uma alternativa real, atual e comercialmente viável. Nos dias atuais existem enormes desafios quanto à minimização da porosidade das peças prototipadas, mas certamente nos próximos anos avanços significativos serão apresentados.

Um protótipo de uma mini-impressora foi idealizado, projetado e fabricado, soluções originais e econômicas foram propostas e na sua validação alguns conceitos necessitam de melhorias, mesmo assim foram obtidos resultados promissores.

A metodologia de projeto adotada auxiliou no estudo de sistemas eletro-mecânicos e na adoção de soluções, possibilitando a criação de sistemas alternativos aos sistemas comercialmente adotados.

O projeto de uma mini-impressora 3D baseado na adaptação de uma impressora a jato de tinta comum se mostrou viável, pois, o compromisso com o baixo custo econômico foi atingido, permitindo uma maior liberdade e arrojo no uso de matérias primas reativas; abrasivas e ou contaminantes.

A obtenção de uma mini-impressora 3D se mostrou de grande importância no desenvolvimento de matéria prima, quando é recomendada pouca quantidade de material, devido ao custo econômico da matéria prima ou quando é exigido manufatura rápida, principalmente a parcela relativa à preparação manual do pó.

Foi desenvolvida uma formulação de pó baseado em gesso que teve o custo em peso de 5% do produto importado. Caso se considere o volume de material, o custo pode ficar próximo a 3% do produto comercial. Embora melhorias relacionadas as propriedades mecânicas necessitem de melhorias, nota-se um grande potencial no desenvolvimento deste material no país, tendo em vista sermos detentores de uma das principais reservas minerais de gesso do mundo.

O protótipo estruturado na reprodução continuada de uma mesma imagem possibilitou a fabricação de corpos de provas sem prejuízo em desempenho quando comparado a um equipamento comercial.

5.1 – Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos através do desenvolvimento deste trabalho podem ser consideravelmente ampliados através dos seguintes trabalhos futuros:

- A elaboração de um sistema de deposição e dosagem de pó, possibilitando o funcionamento autônomo do protótipo;
- A otimização do algoritmo de automação do equipamento, reduzindo assim o tempo necessário para a confecção dos objetos desejados;
- O estudo de novos materiais aplicados a próteses e implantes ósseos baseados em materiais agressivos e de alto custo;
- A substituição do conjunto de impressão a jato de tinta por um conjunto com reservatórios distintos para cada uma das cores que compõem a impressão, visando a utilização de ligantes multicomponentes.

6 – REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS, INC. *Stereolithography Interface Specification*, 1988.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A.B. 21 Gipsita. *Rocha e Minerais Industriais: Usos e Especificações* (Comunicação Técnica Elaborada). CETEM: Rio de Janeiro, 2005.

BACK, N. *Metodologia de projeto de produtos industriais*. Editora Guanabara Dois, 1985.

BARSOUM, M.W. *Fundamentals of Ceramics*. New York: McGraw-Hill, 1997.

BAXTER, M. *Projeto do produto*. Editora Edgard Blücher, 1998.

DELLINGER, J. G. et al. *Bone response to 3D periodic hydroxyapatite scaffolds with and without tailored microporosity to deliver bone morphogenetic protein 2*. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2006. v 76A, p. 366–376.

DREESMAN, H. *Resorption characteristics of calciumsulphate implants*. Beitr. Klin. Chir., 1894. v.9, p. 804.

EANES, E.D. Crystal growth of mineral phases in skeletal tissues. Prog. Crystal Growth Charact., 1980. v.3, p. 3-15,

FOGASSA, A. M. Homemade 3d printer. Disponível em: <<http://homemade3dprinter.blogspot.com/>>. Acessado em: 20/12/2009.

FORTULAN, C. A.; da Silva Jr., C. E.; da Silva, E. J.; Aguiar, P. R.; Bianchi, E. C.; Advanced ceramics: evaluation of the ground surface. Revista Cerâmica, 2003. v 49, p. 174 – 177.

GIBSON, I.; ROSEN, D.W.; STUCKER, B., *Additive Manufacturing Technologies, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010.

GIBSON, L. *Current status of calcium phosphate-based biomedical implant material in the USA*. In: www.medical-devices-faraday.com, 2003.

GORNI, A. A. *Introdução à Prototipagem Rápida e seus Processos*. Revista Plástico Industrial, 2001. p. 230-239.

HEINZL, J.; HERTZ, C.H. *Ink-Jet printing. Advances in Electronics and Electron Physics*. Orlando, 1985. v.65, p. 91-171.

HÜBNER, H.; DÖRRE, E. *Alumina: Processing, Properties, and Applications*, Berlin, Springer-Verlag, 1984.

KOENIGSBERGER, F. *Fundamentos do projeto de máquinas ferramentas para usinagem dos metais – Fascículos I, II e III*. Tradução Rosalvo T. Ruffino. São Carlos: EESC/USP, 1978. p 129.

LAOUI, T.; SHAIK, S.K.; HALL, R.F.; SCHNEIDER, A. *Microfabrication of dental root implants with a porous surface layer by micro-stereolithography*. 2nd International Conference on Advanced Research in Virtual and an Rapid Prototyping. Leiria, Portugal, 2005. p. 47-51.

LERICHE, A.; MOORTGAT, G.; CAMBIER, F.; HOMERIN, P.; THEVENOT, F.; ORANGE, G.; FANTOZZI, G. *Preparation and microstructure of zirconia-toughened alumina ceramics*. Advances in Ceramics. Science and Technology of Zirconia III. Ed. The American Ceramic Society, Inc., 1988. v.24, p.1033-1041.

LÖVGREN, R. *Product development methods: Leonardo Da Vinci versus modern engineering education*. Department of Innovation, Design and Product development (IDP). Mälardalen University (Mdh), Eskilstuna, Sweden, 2002.

NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas*. Editora Bookman, 2ª edição, 2006.

PAHL, G. et al. *Projeto na Engenharia*. Editora Edgard Blücher, 6ª edição, 2005.

PORTO, A. J. V.; DA SILVA, H. A. T.; DUDUCH, J. G.; RÚBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; JASINEVICIUS, R. G.; DE ALMEIDA, R. M.; SCHROETER, R. B. *Usinagem de Ultraprecisão*. São Carlos: Editora Rima, 2004. p. 293.

ROZENFELD, H; VALERI, S. G. *Gerenciamento de projetos*. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/Gerenciamento_Projetosv2.html>. Acessado em: 20/12/2008.

SLOCUM, A. H. *Precision Machine Design*. Prentice Hall, 1992.

SMITH, F. W. *Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais*. 3ª Edição. Portugal: McGraw-Hill, 1996.

VOLPATO, N. et al. *Os principais processos de prototipagem rápida*, 2007. Cap. 3, p. 31-57.

WILSON, C.E.; BRUIJN, J.D. de; BLITTERSWIJK, C.A. van; VERBOUT A.J.; DHERT, W.J.A. *Design and fabrication of standardized hydroxyapatite scaffolds with a defined macro-architecture by rapid prototyping for bone-tissue-engineering research. In HA scaffolds for bone-tissue research*, 2003. p.123-132.

WOHLERS, T.; *Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry: Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., USA, 1999.

YOO, J.; M. ZHOU et al. *Fabrication of biomaterial structures using a three dimensional printing technique. 29th Annual meeting of Society for Biomaterials, Reno, NV., 2003.*