

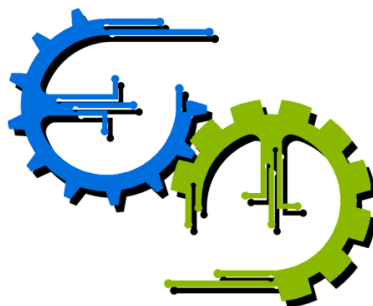


**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**MANUFATURA ADITIVA: DESENVOLVIMENTO  
DE UMA MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM  
RÁPIDA BASEADA NA TECNOLOGIA FDM  
(MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO)**

Por,  
**Bruno Ribeiro Raulino**

Brasília, Julho de 2011



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**MANUFATURA ADITIVA: DESENVOLVIMENTO  
DE UMA MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM  
RÁPIDA BASEADA NA TECNOLOGIA FDM  
(MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO)**

POR,

**Bruno Ribeiro Raulino**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

**Banca Examinadora**

Prof. Alberto José Álvares, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Marco Antonio Egito Coelho, UnB/ ENE

---

Prof. Andrea Cristina dos Santos, UnB/ EPR

---

Brasília, Julho de 2011

## FICHA CATALOGRÁFICA

RAULINO, BRUNO

Manufatura Aditiva: Desenvolvimento de uma Máquina de Prototipagem Rápida Baseada na Tecnologia FDM (Modelagem por Fusão e Deposição) [Distrito Federal] 2011.

xvii, 105p., 210 x 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2011). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Prototipagem rápida  
3. Tecnologia FDM

2. Desenvolvimento de produto  
4. RepRap

I.Mecatrônica/FT/UnB

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RAULINO, B. R. (2011). Manufatura Aditiva: Desenvolvimento de uma Máquina de Prototipagem Rápida Baseada na Tecnologia FDM (Modelagem por Fusão e Deposição). Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Ribeiro Raulino.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Manufatura Aditiva: Desenvolvimento de uma Máquina de Prototipagem Rápida Baseada na Tecnologia FDM (Modelagem por Fusão e Deposição).

GRAU: Engenheiro

ANO: 2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Bruno Ribeiro Raulino  
SQN 212 Bloco J AP. 103 – Asa Norte.  
70864-100 Brasília – DF – Brasil.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço aos amigos e parentes.

## RESUMO

Com o advento da prototipagem rápida, diversas novas funcionalidades têm surgido, e dentre elas o presente trabalho destaca a utilização de máquinas de baixo custo para produção de pequenos objetos funcionais. É feita uma abordagem com visão de produto acerca do processo de desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida. São utilizados métodos e ferramentas para auxiliar no levantamento de soluções e análise de viabilidade do projeto, baseando-se no projeto RepRap. A tecnologia FDM é uma solução econômica utilizada para implementar o sistema. O conceito escolhido demonstrou ser compatível com a especificação e tem grande potencial para ganhar espaço em diversas aplicações de uso pessoal, acadêmico e comercial. Como um objetivo secundário, visou-se criar uma plataforma para futuros trabalhos de aperfeiçoamento.

Palavras Chave: prototipagem rápida, tecnologia FDM, desenvolvimento de produto, RepRap.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	ASPECTOS GERAIS	1
1.1	OBJETIVO	3
1.3	SISTEMA PROPOSTO	3
1.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	4
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>5</b>
2.1	TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	6
2.2	CENÁRIO INDUSTRIAL	14
2.3	PROJETO REPRAP	18
2.4	METODOLOGIA	20
<b>3</b>	<b>PROJETO INFORMACIONAL</b>	<b>21</b>
3.1	INTRODUÇÃO	21
3.2	PROBLEMA DE PROJETO	21
3.3	CICLO DE VIDA	22
3.4	NECESSIDADES DOS CLIENTES	23
3.5	REQUISITOS DE PROJETO	26
3.6	ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	34
<b>4</b>	<b>PROJETO CONCEITUAL</b>	<b>36</b>
4.1	INTRODUÇÃO	36
4.2	ESTRUTURA FUNCIONAL DO PRODUTO	36
4.3	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO	40
4.4.1	Software	42
4.4.2	Fonte de potência	57
4.4.3	Controle	57
4.4.4	Extrusora	59
4.5.5	Estrutura	60
4.5.6	Análise das alternativas	61
4.4.7	Concepção escolhida	63
<b>5</b>	<b>PROJETO DETALHADO</b>	<b>64</b>
5.1	INTRODUÇÃO	64
5.2	EIXOS	65
5.3	ELETRÔNICA	69
5.2.1	Firmware	70
5.2.2	Skeinforge	72
5.4	MESA	75
5.5	CONJUNTO ESTRUTURAL	76
5.6	EXTRUSORA	77
5.7	LISTA DE MATERIAIS	80
<b>6</b>	<b>CONSTRUÇÃO E TESTES DO PROTÓTIPO</b>	<b>84</b>
6.1	INTRODUÇÃO	84
6.2.	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	84
6.2.1	Peças prototipadas	84
6.2.2	Estrutura	87
6.2.3	Mesa	89
6.2.4	Extrusora	90
6.2.5	Eletrônica	92
6.3.	TESTES	93
6.3.1.	Cubo de calibração	94
6.3.2.	Tetraedro	98
6.3.3.	Análise final	100
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>103</b>

# 1 INTRODUÇÃO

“Acreditamos que elas podem fazer com os bens físicos o que os computadores fizeram com a informação: descentralizar.” Essa é a previsão de Adrian Bowyer, engenheiro e professor da Universidade de Bath (Inglaterra), e seus colaboradores a respeito das máquinas de prototipagem rápida que criaram. Sua opinião é compartilhada com várias outras pessoas que entram em contato com a idéia, como constata-se na extensa lista de matérias em jornais e publicações científicas disponível no site do projeto RepRap.

O grande diferencial dessas máquinas, que as caracteriza como um produto de ruptura, é a possibilidade de levar às casas de pessoas comuns uma ferramenta capaz de fabricar uma infinidade de produtos úteis a partir de poucos cliques, limitada apenas pela criatividade dos usuários, incluindo as peças necessárias para a fabricação de outra máquina RepRap (daí o nome: Replicating Rapid prototyping).

## 1.1 ASPECTOS GERAIS

A prototipagem rápida (RP – Rapid Prototyping) é um processo de fabricação baseado na adição de material em camadas planas que surgiu no final dos anos 80, devido à crescente necessidade da indústria em reduzir custos no processo de desenvolvimento de produto – “mais rápido é melhor”. O reconhecimento de que uma grande parte dos elevados custos de fabricação se concentram na fase de desenvolvimento está na origem do conceito de engenharia concorrente ou engenharia simultânea. A princípio, pretende-se integrar design e processamento na fase de desenvolvimento do produto, mas em termos mais abrangentes esse envolvimento deve estender-se à análise do mercado e ao setor de comercialização, tal como se ilustra na figura 1 (KUSIAK, 1993).

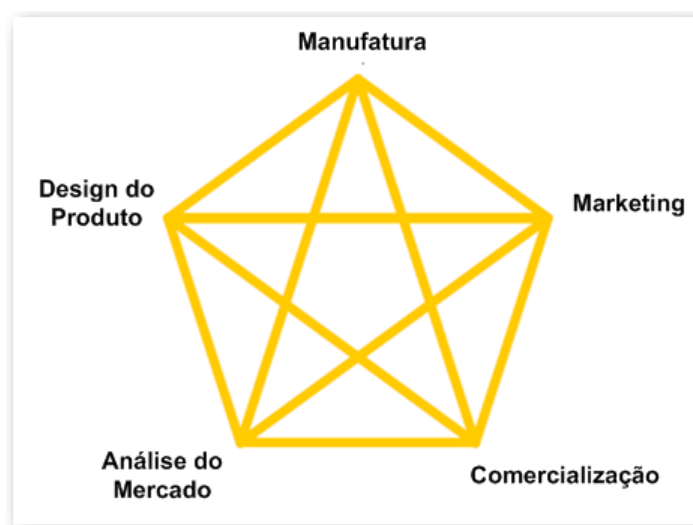


Figura 1.1: Modelo de engenharia concorrente.

Alterações no design ou na funcionalidade de um produto, quando este já se encontra nas fases de produção e comercialização, implicam normalmente custos elevados. Estima-se que, em média, estas alterações aumentem aproximadamente uma ordem de grandeza entre duas fases significativas do ciclo do produto, conforme indicado na figura 1.2. Isto é, uma alteração realizada na fase de produção provavelmente terá um custo cem vezes superior ao que teria se o design do produto fosse corrigido na fase de prototipagem e ensaios. Isto sugere que a equipe multidisciplinar deve investir um maior esforço nas fases preliminares de concepção de modo a obter o máximo de informação, realizar mais iterações e revisões de projeto.

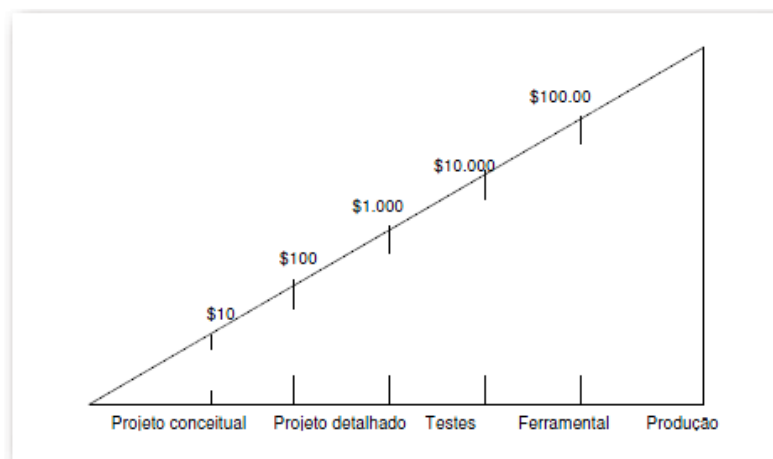


Figura 1.2: Custo de alteração de projeto ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto (Wohlert, 2008).

Neste contexto se inserem as máquinas de RP, comumente chamadas também de impressoras 3D – este último termo, no entanto, é utilizado para indicar uma classe específica de equipamentos de RP rápidos, fáceis de usar e relativamente baratos que garantem qualidade razoável para modelagem conceitual e análise de engenharia. Elas abarcam um conjunto de tecnologias de modelação física para produzir rapidamente protótipos – ou mesmo peças funcionais, com todas as propriedades mecânicas desejadas – a partir da informação de desenhos do modelo gerados em CAD ou de dados digitalizados por varrimento (engenharia reversa) que são usados para o planejamento do processo. Além disso, não há a necessidade de moldes ou ferramentas - como ocorre em máquinas CNC convencionais -, nem mesmo para fixação (geralmente, as peças são fixadas nas mesas de construção por material de suporte criado pela própria tecnologia), o componente é fabricado em uma única etapa, e uma só máquina é necessária para realizar sua construção completa. Essas características tornam o processo facilmente automatizável.



Essa tecnologia tem o potencial de transformar a indústria porque diminui os custos e os riscos, e outro ponto forte que contribui para isso é a baixa geração de ruídos e desperdícios, possibilitando a instalação em ambientes não industriais. Dessa forma, abre-se espaço para as pequenas empresas ao permitir que um comércio local ofereça produtos personalizados criados na sua impressora. Os consumidores não se contentam mais com itens produzidos em massa, que são todos idênticos, e a impressão 3D faz com que produtos customizáveis sejam acessíveis e fabricáveis em grande escala.

Entretanto, a RP está ainda restrita a alguns segmentos por envolver um alto custo de aquisição de equipamentos e manutenção. O desenvolvimento de um sistema de prototipagem rápida de baixo custo que permita a difusão dessa tecnologia constitui um desafio que tem sido buscado por diversos grupos de pesquisa, dentre os quais destacam-se nos últimos anos RepRap, Fab@Home e Makerbot.

## **1.1 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho de graduação é o desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida com tecnologia FDM baseada no projeto RepRap, utilizando uma abordagem metodológica de desenvolvimento de produto, e espera-se que possa ser utilizada como base para posteriores melhoramentos.

## **1.3 SISTEMA PROPOSTO**

A máquina de RP utilizará a estrutura mecânica, eletrônica e software propostos pelo projeto RepRap. Seguindo a filosofia do projeto, as peças que compõem sua estrutura são feitas pela própria tecnologia – utilizando-se outras máquinas RP previamente adquiridas –, exceto elementos de fixação (parafusos, porcas, arruelas), rolamentos, eixos e placas de suporte. Além dos planos de movimentação, a máquina também possui um sistema de aquecimento e extrusão do material. O controle da temperatura utiliza um PID implementado na plataforma de código aberto Arduino. As placas de controle são adquiridas semi-prontas, bastando algumas configurações e o download do firmware desenvolvido para a máquina.

O software recebe como entrada o modelo sólido em CAD no formato STL, uma representação desenvolvida para esse tipo de aplicação que descreve apenas a superfície do objeto. Este modelo é cortado em planos paralelos (slicing) cuja distância corresponde à espessura da camada a ser depositada por adição de material plástico fundido. Os comandos gerados em código G são transmitidos pela porta USB do computador ou via cartão SD para a placa mãe da máquina, que por sua vez transmite as instruções para as placas controladoras dos motores de passo e da extrusora.

## 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho contém, além deste, outros seis capítulos. Durante o desenvolvimento do projeto procurou-se, na medida do possível, adequar a metodologia aqui apresentada às particularidades do conhecimento em questão. A abordagem sistemática do projeto de produtos de engenharia é amplamente empregada no mundo empresarial, obtendo sucesso indiscutível. Com essa abordagem, o produto é projetado numa evolução sistemática de modelos, na qual um modelo simples e abstrato é substituído por outro mais detalhado e concreto, até a viabilização física do objeto projetado.

O capítulo 2 enfoca o Estado da Arte da prototipagem rápida, abordando de forma sucinta as principais técnicas existentes atualmente. Também são apresentadas algumas aplicações industriais da prototipagem rápida, contextualizando o projeto RepRap.

O capítulo 3 descreve o Projeto Informacional, no qual são relacionadas as atividades desenvolvidas no processo de geração das especificações de projeto. Nessa fase, as necessidades dos clientes (usuários da máquina proposta) são levantadas, e a partir delas busca-se mais informações sobre o tema para se determinar a maneira como elas serão atendidas.

O capítulo 4 apresenta o Projeto Conceitual, fase em que são estudadas as estruturas funcionais da função global, parciais e de cada uma das suas variantes. Aqui, foram estabelecidos os princípios de solução para atender às funções da estrutura e possíveis concepções resultantes desses princípios, para comparar com o conceito da RepRap.

O capítulo 5 trata do Projeto Detalhado, no qual se expõem as particularidades do sistema, dando forma e dimensões, selecionando materiais e processos de obtenção e construção. É gerada a documentação técnica, incluindo desenhos e listagem de componentes.

O capítulo 6 relata a Construção e Testes do Protótipo, com a análise dos resultados obtidos com a máquina construída, ressaltando as principais características e discutindo as avaliações de desempenho.

O capítulo 7 apresenta as Conclusões, comentários e impressões finais relativos ao trabalho, para julgar o atendimento aos objetivos propostos e frisando, com o intuito de balizar trabalhos futuros na área, recomendações para alguns aspectos em que se verificou possibilidades de melhoramento.

## 2 ESTADO DA ARTE

A prototipagem rápida é uma tecnologia cuja origem se baseia em duas técnicas: a topografia e a fotoescultura. A primeira foi um método desenvolvido por Blanther no final do século XIX para a confecção de mapas de relevo, e consiste na impressão de uma série de discos de areia contendo as curvas de nível das cartas topográficas. Já no início da década de 70, Matsubara (Mitsubishi Motors) propôs um processo fotográfico. Regiões de uma camada de fotopolímero recoberta por pó de grafite ou areia eram endurecidas após a exposição a luz, e mais tarde as outras partes eram retiradas com a utilização de um solvente. Verificou-se que essa técnica poderia ser empregada para reproduzir as superfícies de fabricação complexa, em função da operação da máquina.

A técnica da fotoescultura nasceu no século XIX com a aspiração de criar réplicas exatas de peças tridimensionais. Frenchman Francois Willème propunha o posicionamento de 24 câmeras fotográficas igualmente distribuídas em torno de um objeto, colocado no centro de uma sala circular. Elas eram então acionadas, simultaneamente, e com a silhueta de cada foto um artista esculpia uma das partes da porca cilíndrica do objeto. De modo a reduzir o trabalho de escultura, desenvolveu-se uma técnica que utilizava uma luz graduada para expor uma gelatina fotossensível, que se expande proporcionalmente ao contato com a água. Anéis são então fixados sobre um suporte para fazer a réplica do objeto.

Essas pesquisas originaram as técnicas atualmente empregadas na RP, obtendo êxito comercial a partir do lançamento da SLA-1 pela 3D Systems (1987). A empresa desenvolveu e patenteou o processo de estereolitografia, como também desenvolveu o formato STL, utilizado até os dias de hoje na indústria.

Nos anos seguintes, outras empresas de RP surgiram vagarosamente, comercializando suas próprias versões de estereolitografia. Em 1991, a Stratasys inovou ao inserir no mercado uma nova tecnologia: modelagem por fusão e deposição (FDM – Fused Deposition Modeling). Em seguida, a DTM introduziu a sinterização seletiva a laser (SLS – Selective Laser Sintering), processo em que o calor de um laser é utilizado para fundir metais pulverizados, e vários outros foram aparecendo mais tarde.

## 2.1 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

As tecnologias de RP dividem-se em duas categorias principais: os métodos com remoção de material e com adição de material (FERREIRA, 2001). A primeira, chamada de prototipagem rápida subtrativa (SRP – Subtractive Rapid Prototyping), consiste no desbaste de blocos de diversos materiais, geralmente madeira ou espumas. O presente trabalho tratará especificamente do segundo caso, também conhecido como fabricação de sólidos de forma livre (FFF – Free Form Fabrication). A figura 2.1 ilustra as suas principais ramificações.

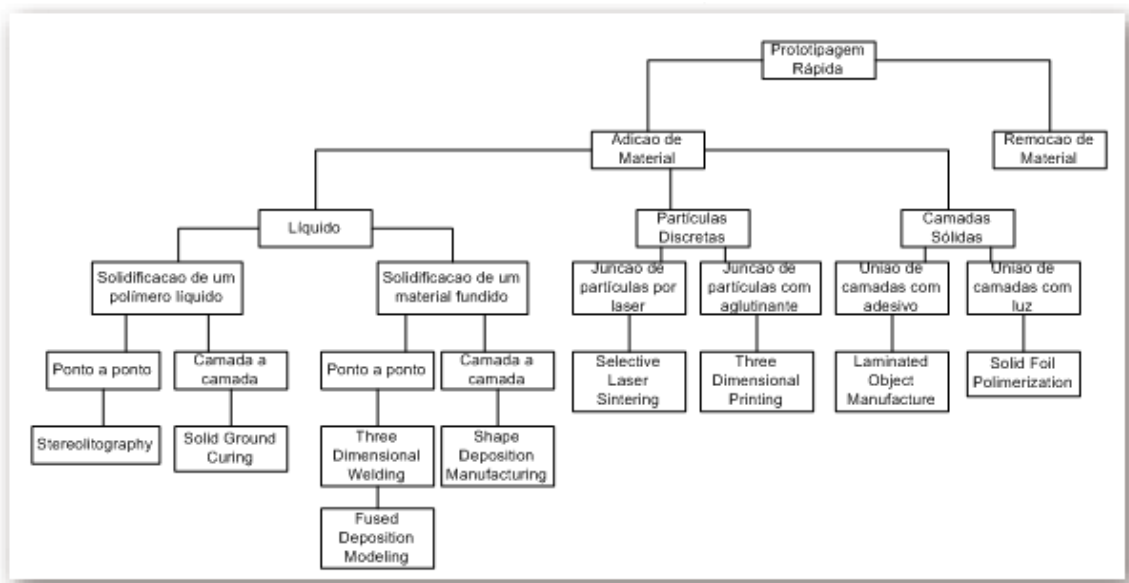


Figura 2.1: Tecnologias associadas à prototipagem rápida (PHAM, 1998).

A principal diferença entre elas está no princípio físico de construção do protótipo, porém, quanto ao aspecto computacional, as etapas do processo de planejamento possuem pontos em comum. Este processo é dividido em três fases: pré-processamento, processamento do protótipo rápido e pós-processamento (WOZNY, 1997).

No pré-processamento, cria-se um modelo da peça em software CAD 3D ou obtém-se seus dados digitalizados por varrimento. Em seguida, o arquivo gerado deve ser convertido para um padrão aceito pela máquina de RP. O formato STL é largamente utilizado, e consiste na representação geométrica da superfície do modelo em malha triangular, sem detalhes de cores ou texturas comuns em sistemas CAD mas desnecessários na prototipagem (figura 2.2). Cada triângulo define um único vetor normal, acompanhado pelas coordenadas de um sistema cartesiano tridimensional.

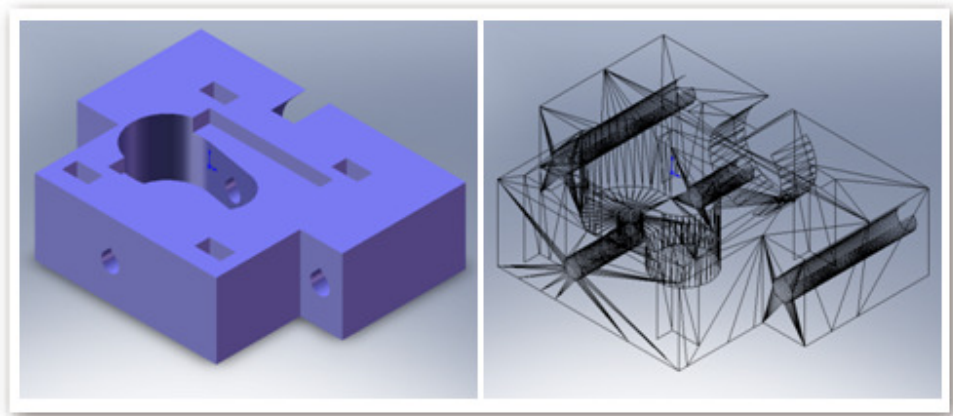


Figura 2.2: Modelo sólido em CAD 3D convertido para representação STL.

O processamento das informações contidas no arquivo STL é feito inicialmente através da preparação do modelo, necessária às fases seguintes. Ele é submetido a uma série de ajustes referentes à validação e correção do modelo. É feita a definição da orientação do objeto, o que afeta diversas características do protótipo final, como o total de fatias geradas no slicing e a quantidade de suporte necessária (quando disponível na máquina). O suporte é necessário sempre que a ação da gravidade pode afetar alguma face do sólido, provocando a queda ou desestabilização da mesma, e é normalmente feito de um material diferente do que de fato construirá o protótipo. Após o processo, é possível removê-lo facilmente de maneira mecânica ou química. No objeto da Figura 3, os furos passantes na horizontal constituem features que necessitariam de suporte para uma reprodução perfeita. Além da sustentação, em algumas tecnologias também utiliza-se uma camada de suporte na base para facilitar a remoção do objeto e evitar deformações físicas.

Na etapa seguinte, o sólido é fatiado em camadas que serão construídas de forma sequencial na máquina de RP (figura 2.3). As fatias representam um plano de seção transversal associado a uma espessura uniforme, e cada uma é varrida (scan) para que se possa determinar com exatidão o formato desejado e o planejamento da trajetória de adição. Envolve definição de rotas para preenchimento de bordas, deposição de material e deposição de suporte (quando se aplica). Esta etapa possui várias configurações que variam com cada tecnologia, e é muito importante pois determina o tempo de construção e a qualidade final.

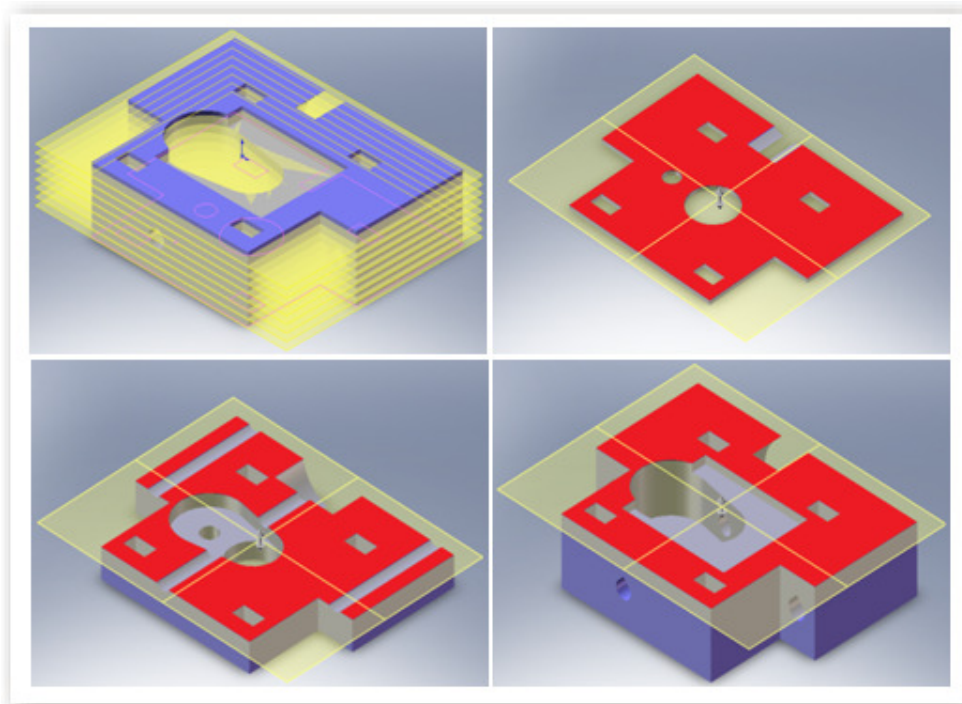


Figura 2.3: Fatiamento do sólido em camadas.

A próxima fase corresponde ao controle de geração do objeto e tem como função propiciar de fato a fabricação do modelo físico, através da emissão de sinais de controle que monitoram ou guiam o processo de adição.

Finalmente, ocorre o pós-processamento, que compreende as atividades de cura, remoção da estrutura de suporte e limpeza da peça (quando necessárias) para conferir o acabamento final (PALM, 1998).

Cada tecnologia possui suas próprias vantagens e desvantagens, cabendo a uma avaliação prévia determinar qual será a mais eficiente para o produto – a tabela 2.3 contém um resumo das características das tecnologias descritas. Alguns pontos a se considerar:

(i) Tempo. O termo prototipagem rápida é relativo, pois a sua celeridade é superior a outras técnicas convencionais de fabricação de protótipos, mas em tempo real a velocidade de produção é geralmente muito lenta. Dependendo do nível de precisão requerido e do tamanho do objeto, o processo pode levar de poucas horas a dias.

(ii) Volume. Atualmente, a maioria dos equipamentos não pode fabricar itens com volume superior a  $500\text{mm}^3$ .

(iv) Acabamento. Muitas vezes a superfície do objeto gerado necessita de um acabamento secundário para atingir a qualidade final desejada.

(iv) Material. A variedade de materiais disponíveis para a RP com adição de materiais é ainda muito limitado, como pode ser verificado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Materiais utilizados pelas tecnologias de prototipagem rápida.

<i>Tecnologia</i>	<i>Materiais disponíveis</i>
Estereolitografia (SLA)	Fotopolímero
Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Termoplásticos e metais eutéticos
Sinterização seletiva a laser (SLS)	Termoplásticos e metais pulverizados
Manufatura de objetos em lâminas (LOM)	Papel
Fusão por feixe de elétrons (EBM)	Ligas de titânio

### a) Estereolitografia (SLA)

A SLA foi a técnica pioneira e é ainda a mais utilizada no mundo. Baseia-se na polimerização de uma resina fotossensível (acrílica, epóxi ou vinil) composta de monômeros, fotoiniciadores e aditivos, através de um feixe de laser ultravioleta (BADOTTI, 2003). A máquina contém uma cuba preenchida com a resina, no interior da qual há uma plataforma que se movimenta na vertical. Um computador transmite para a plataforma a primeira camada do modelo virtual a ser polimerizada, e então o controle numérico da máquina posiciona a plataforma na superfície da resina e os espelhos galvanométricos direcionam o feixe de laser para a porção correspondente à primeira fatia. Desencadeia-se uma reação localizada que promove a formação de uma cadeia polimérica entre as moléculas do monômero dispersas na resina, ocorrendo a solidificação (ARTIS, 2011). A figura 2.4 ilustra o princípio básico.

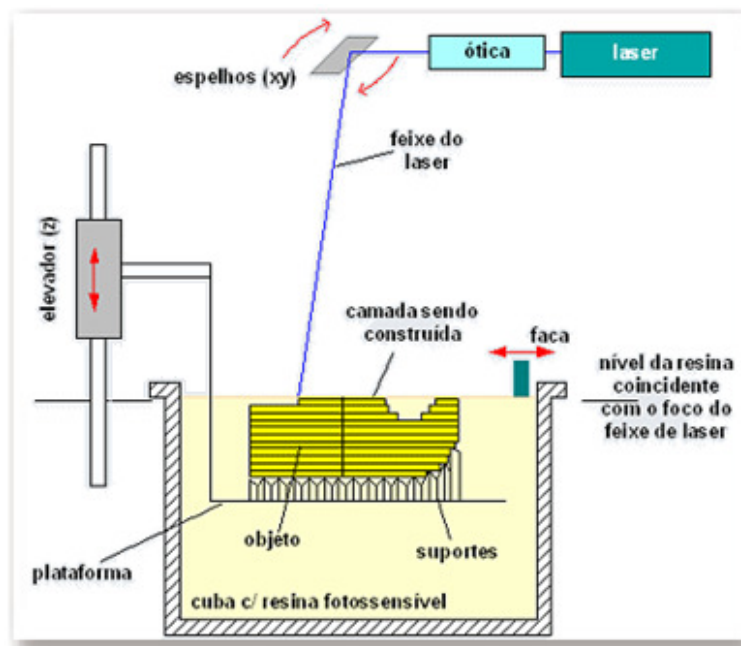


Figura 2.4: Esquema genérico de funcionamento da estereolitografia.

Após a conclusão desse primeiro passo, a plataforma desce, imergindo a primeira camada solidificada na resina, permitindo assim que uma nova camada seja polimerizada sobre a primeira, e assim sucessivamente. Uma faca regulariza a camada de resina líquida, devido à viscosidade elevada. Quando pronto, o modelo sólido é removido do banho e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para ser submetido a uma cura completa (GORNI, 2011). O protótipo, ao final, apresenta uma estrutura translúcida.

### **b) Fused Deposition Modeling (FDM)**

A técnica de FDM é a segunda mais utilizada no mundo. Baseia-se na deposição de camadas resultantes do aquecimento, por volta de 200 °C, e amolecimento de filamentos (arames) de material termoplástico. Simultaneamente, outros fios amolecidos formam o suporte para as superfícies suspensas do modelo, a fim de oferecer sustentação. Os arames destinados à confecção podem ser de poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros ou cera, enquanto o material de suporte é uma mistura de ABS e cal. Esses materiais conferem durabilidade e resistência ao protótipo.

A plataforma da máquina de FDM onde se deposita o material movimenta-se no eixo Z e o cabeçote extrusor, composto por dois bicos (um para alimentar as camadas do modelo e o outro para o suporte), movimenta-se no plano XY. Os arames são direcionados por guias rotativas e ficam estocados dentro da máquina, em ambiente a vácuo aquecido, para evitar que a umidade forme bolhas no material e impeça a continuidade da deposição. Preferencialmente, todo o ambiente de construção também deve encontrar-se fechado em um ambiente de temperatura controlada.

O software, que é composto por CAD/CAPP/CAM, não é integrado à máquina. Esta é conectada a um computador com o sistema que monitora os comandos de construção. Cada camada possui um planejamento de rota por onde o bico extrusor deposita os fios fundidos. Após finalizar uma fatia, a plataforma desce uma distância equivalente à espessura da camada e o cabeçote inicia a deposição seguinte. A figura 2.5 mostra a montagem do processo.

Com estas máquinas não há desperdício de material e pouca necessidade de limpeza, em oposição à SLA. Outra diferença notável é a ocupação de um espaço bem menor, pois os motores de acionamento necessitam de menos potência e resfriamento que os lasers. Estas características permitem sua instalação em ambientes não industriais. A tabela 2.2 ilustra um exemplo comparativo.



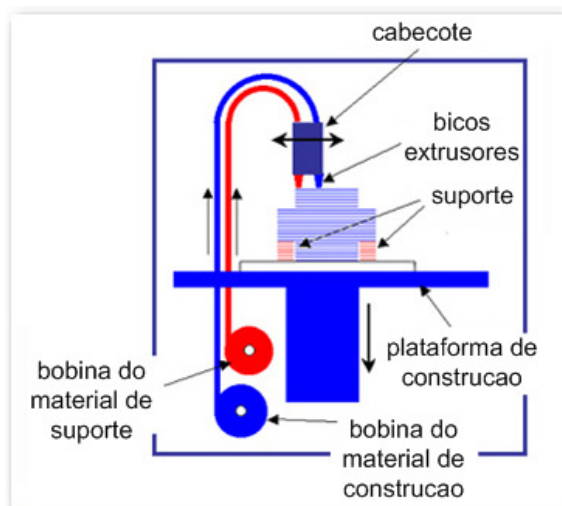


Figura 2.5: Esquema genérico da FDM.

Com estas máquinas não há desperdício de material e pouca necessidade de limpeza, em oposição à SLA. Outra diferença notável é a ocupação de um espaço bem menor, pois os motores de acionamento necessitam de menos potência e resfriamento que os lasers. Estas características permitem sua instalação em ambientes não industriais. A tabela 2.2 mostra um exemplo comparativo.

Tabela 2.2 – Comparativo dimensional entre máquinas de SLA e FDM (3Dsystems e Dimension Printing).

	<i>Viper si2 (3D Systems) - SLA</i>	<i>uPrint (Stratasys) - FDM</i>
<b>Dimensões (mm)</b>	1340 x 860 x 1780	635 x 660 x 800
<b>Volume de trabalho (mm)</b>	250 x 250 x 250	203 x 152 x 152
<b>Peso (kg)</b>	463	94

Em termos de custos (de aquisição, operação e material), também se verifica grandes diferenças entre as duas tecnologias, devido à qualidade que proporcionam. Enquanto FDM satisfaz plenamente o uso interno em empresas, atividades acadêmicas e lotes de produtos customizáveis para comercialização, a SLA é uma tecnologia voltada para a engenharia de produtos mais exigentes – produção de moldes e protótipos funcionais com dimensões críticas. Já em relação ao tempo total de produção, incluindo o pós-processamento, há empate entre as duas tecnologias. Apesar do tempo de fabricação da SLA ser menor, o objeto precisa passar por alguns tratamentos antes de ser utilizado.

Por causa dessas características, na maioria das aplicações e para o objetivo sugerido pela RepRap, a técnica de FDM apresenta a melhor relação custo-benefício (GRIMM, 2003).

### c) Selective Laser Sintering (SLS)

A máquina de SLS constrói objetos tridimensionais pela superposição de camadas homogêneas de polímeros em pó. Com o processo iniciado, uma fina camada de pó, que se solidifica com a incidência de um laser, é depositada dentro de um cilindro. Camadas adicionais são depositadas através de roletes sobre a camada já sinterizada e ligadas quimicamente entre si por ação do calor do equipamento de emissão de laser (figura 2.6).

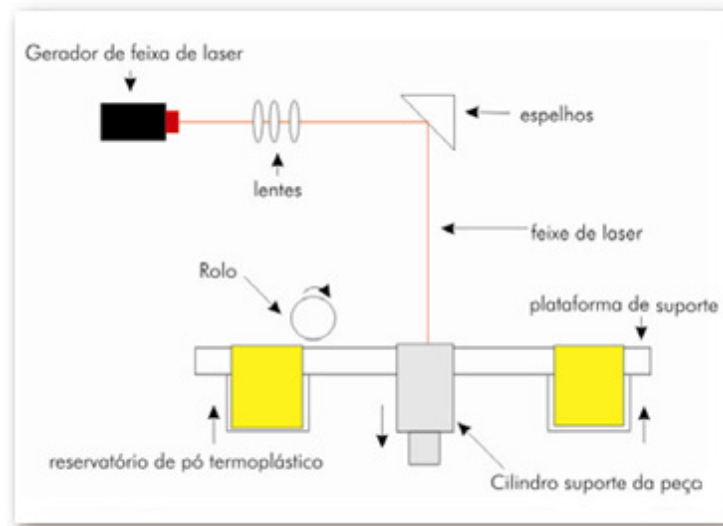


Figura 2.6: Esquema de funcionamento da SLS.

O pó não sinterizado funciona como suporte e é removido quando a peça estiver completa. Uma grande vantagem desse processo é a maior disponibilidade de materiais: poliamida, elastômeros, cerâmica e metal com polímeros aglutinantes para aplicações em ferramental leve (GRIMM, 2005). Segundo Volpato (2007), os parâmetros mais importantes para a fabricação de objetos através da sinterização a laser são: a potência do laser, a velocidade de deslocamento do feixe e o espaçamento entre as passadas do feixe do laser. Os protótipos oferecem considerável resistência mecânica e térmica. No entanto, o custo é muito elevado.

### d) Laminated Object Manufacturing (LOM)

A obtenção dos objetos no processo LOM ocorre colando-se sucessivamente folhas de papel, nas quais um feixe laser corta o perímetro exterior correspondente à camada do objeto. Assim, o processo inicia-se com o desenrolar do papel impregnado de cola termoplástica na sua superfície inferior (GRIMM, 2005). Seguidamente um rolo pré-aquecido comprime o papel sobre a camada anterior ficando a colagem consolidada (figura 2.7).

O protótipo tem aspecto de madeira e seu custo é semelhante ao da SLA e da SLS, mas a qualidade é inferior. Peças relativamente grandes podem ser produzidas, e seu principal uso é na criação de moldes.

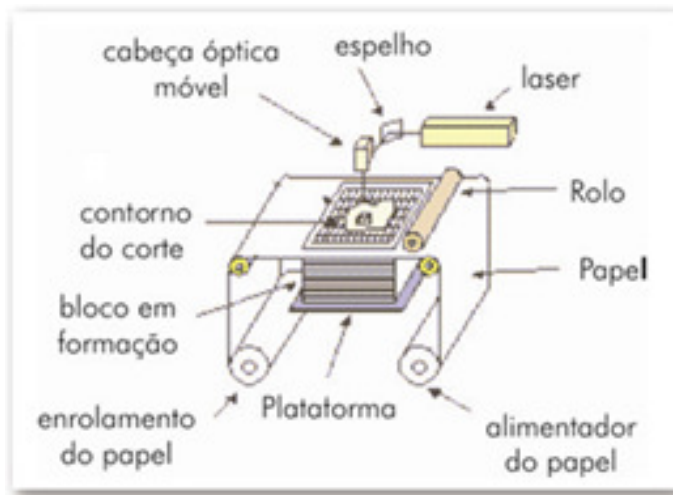


Figura 2.7: Esquema básico de LOM.

### e) 3D Printing (3DP)

Esta técnica se assemelha ao sistema de impressão a jato de tinta dos computadores, inclusive a máquina é construída com peças adaptadas de impressoras convencionais. A diferença é que, em vez de tinta, seu cabeçote expelle um agente aglutinante composto de uma solução aquosa e cola.

Em um reservatório contendo pó cerâmico ou polimérico, uma plataforma se movimenta no eixo Z, onde o pó é aglutinado formando a camada do objeto. À medida em que a plataforma desce, um rolo é acionado para a reposição e regularização das novas camadas, que são desenhadas pelo movimentação do cabeçote no plano XY (figura 2.8). Ao fim, o modelo deve ser infiltrado com elementos químicos em suas porosidades para aumento de resistência (GRIMM, 2005).

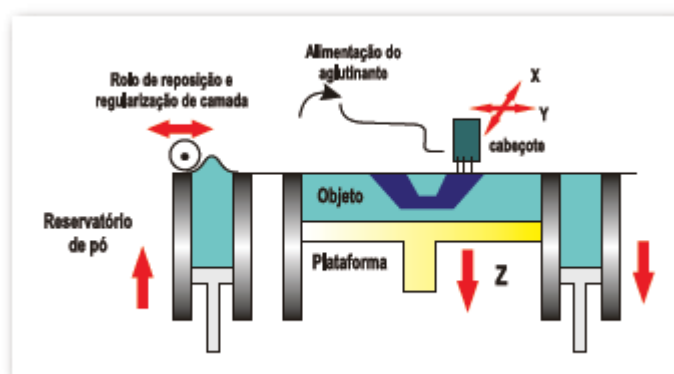


Figura 2.8: Esquema gráfico da Impressão Tridimensional.

Tabela 2.3 – Resumo das características das tecnologias de prototipagem rápida.

	<i>SLA</i>	<i>FDM</i>	<i>SLS</i>	<i>LOM</i>	<i>3DP</i>
<i>Variedade de materiais</i>	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média
<i>Qualidade superficial</i>	Regular	Regular	Boa	Regular	Boa
<i>Pós-acabamento</i>	Regular	Regular	Bom	Baixo	Bom
<i>Precisão</i>	Excelente	Regular	Boa	Baixa	Regular
<i>Resistência ao impacto</i>	Regular	Boa	Boa	Baixa	Baixa
<i>Resistência à flexão</i>	Baixa	Excelente	Excelente	Baixa	Baixa
<i>Custo do protótipo</i>	Alto	Baixo	Alto	Alto	Médio
<i>Pós-cura</i>	Sim	Não	Sim*	Não	Não

\*Não necessita de cura quando utiliza termoplástico.

## 2.2 CENÁRIO INDUSTRIAL

No início da indústria de RP, devido ao alto custo de aquisição – na ordem de centenas de milhares de dólares –, houve pouca aceitação do mercado, mesmo com estudos cuidadosos mostrando economias tangíveis com respeito a prototipagem tradicional e ciclos de projeto extensos, que excediam em várias vezes o preço de tais sistemas. Os primeiros clientes foram, portanto, empresas muito grandes que tinham condições de arcar com investimentos tão exorbitantes. Com o aumento da competição, as empresas começaram a desenvolver alternativas mais rápidas, fáceis de usar, menores e econômicas que a primeira geração de equipamentos. Em 1998, Schroff Development iniciou a venda de um sistema LOM por menos de 10 mil dólares. Estabelecendo um comparativo dos anos iniciais da RP com o bem estabelecido mercado de máquinas CNC (que também iniciaram como aplicações de prototipagem e evoluíram no sentido da manufatura especializada e em pequena escala), percebe-se um crescimento bem mais vertiginoso da primeira.

Diversas indústrias empregam sistemas RP para uma variedade de utilizações. A figura 2.9 mostra a distribuição de cada área no cenário mundial em 2007. O mercado se divide basicamente em três ramos de aplicação: prototipagem rápida para testes de forma e função, manufatura rápida e impressão 3D. Como resultado, o desenvolvimento de sistemas e materiais tem se especializado para atender um propósito específico.

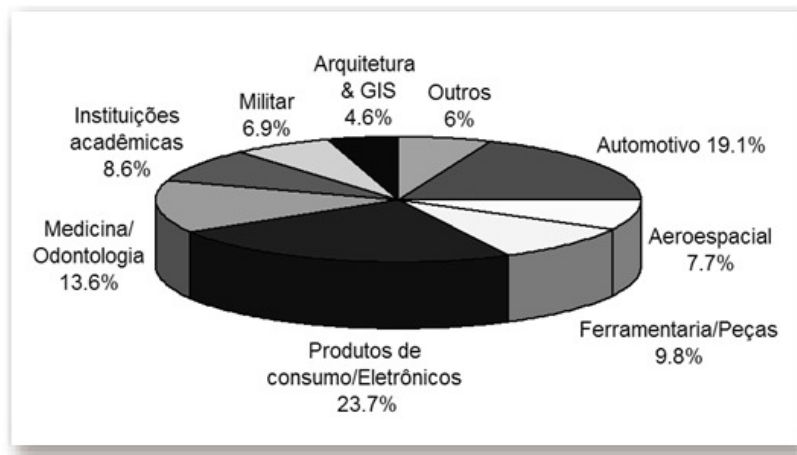


Figura 2.9: Gráfico da participação dos setores que utilizam RP (WOHLERS, 2008).

O primeiro ramo, que compreende o uso original e que deu nome à tecnologia, inclui sistemas que fabricam protótipos com funcionalidade limitada ou que são usados para processos secundários, como moldagem para confecção de protótipos funcionais. É uma área que já atingiu um nível de maturidade tal que não há mais investimentos em P&D que resultem em mudanças significantes da tecnologia. Os maiores limitantes ainda são o preço e a variedade de materiais. Além disso, a aquisição de uma máquina desse tipo requer um operador habilidoso, sua manutenção é difícil e ela não pode ser instalada em ambientes de escritório.

Mais recentemente, as empresas começaram a enxergar além, passando da prototipagem rápida para a manufatura rápida. Técnicas de manufatura aditiva oferecem muitos benefícios em relação às técnicas tradicionais, como a capacidade de criar múltiplas geometrias diferentes em um lote de produção sem a necessidade de troca de ferramentas ou máquinas. Assim, encaixa-se perfeitamente nas produções de baixo volume e de peças customizadas. Exemplos de manufatura rápida incluem desde a indústria aeroespacial até implantes médicos (figura 2.10). Esta promete ser uma grande área de aplicação nos próximos anos, que crescerá rapidamente com o advento de novos materiais.

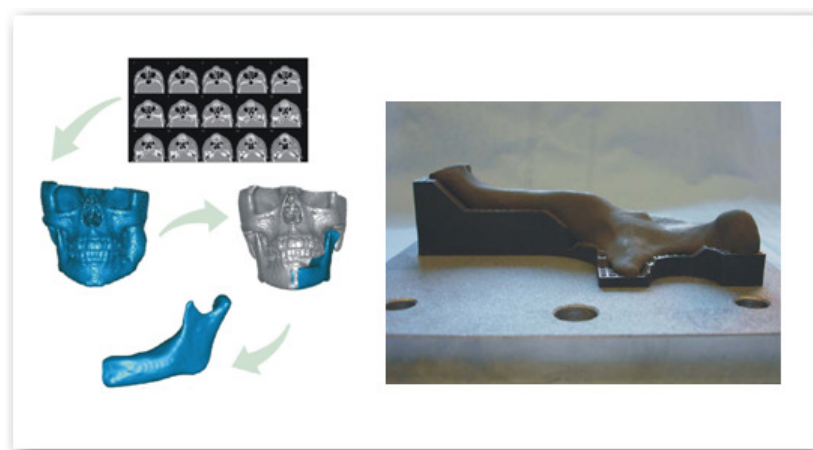


Figura 2.10: Processo de obtenção do modelo 3D e implante confeccionado.

A utilização de RP na fabricação de próteses personalizadas, estudo da anatomia e planejamento cirúrgico já compreende importantes campos de pesquisa. O apelo em relação à área médica se dá em face de obstáculos significantes, como o fato de nenhum caso ser igual ao outro – motivo pelo qual a padronização na produção de implantes não é vantajosa – e questões ligadas a pontos obscuros da região da cirurgia que dificultam o planejamento cirúrgico. A entrada de dados é feita sem intrusão no corpo do paciente, através de tomografia computadorizada ou ressonância magnética. No caso de moldes, a estereolitografia é o processo mais utilizado pela precisão geométrica, textura e transparência do protótipo. Para a produção de próteses, que são feitas principalmente com ligas de titânio, a principal técnica utilizada é a sinterização.

Diferentemente da engenharia mecânica e do desenho industrial, em que a RP já está bem estabelecida, a arquitetura e construção civil constituem outro mercado relevante e com imenso potencial, em que as aplicações são ainda incipientes, praticamente insignificantes até poucos anos atrás. A figura 2.11 mostra uma coletânea de maquetes prototipadas com impressoras 3D para uso interno, nas diversas etapas do processo de projeto.

A impressão 3D é o ramo mais promissor da indústria, representando grande parcela do total de máquinas de prototipagem instaladas no mundo todo e com crescimento cada vez mais acelerado. A tabela 2.4 e a figura 2.12 evidenciam essa evolução. Diante dessa constatação, as impressoras 3D tornaram-se essenciais no portfolio de uma empresa de RP. O sucesso desse nicho depende da habilidade dessas empresas em reduzir os preços suficientemente para tornar o produto acessível aos usuários domésticos. Essa é uma das principais dificuldades que a tecnologia encontra para entrar em mercados emergentes como o Brasil, associada à falta de mão-de-obra capacitada. À medida em que as empresas começam a buscar melhorias nos processos de desenvolvimento, mais centros universitários perceberão esta nova demanda.



Figura 2.11: Maquetes produzidas com RP.

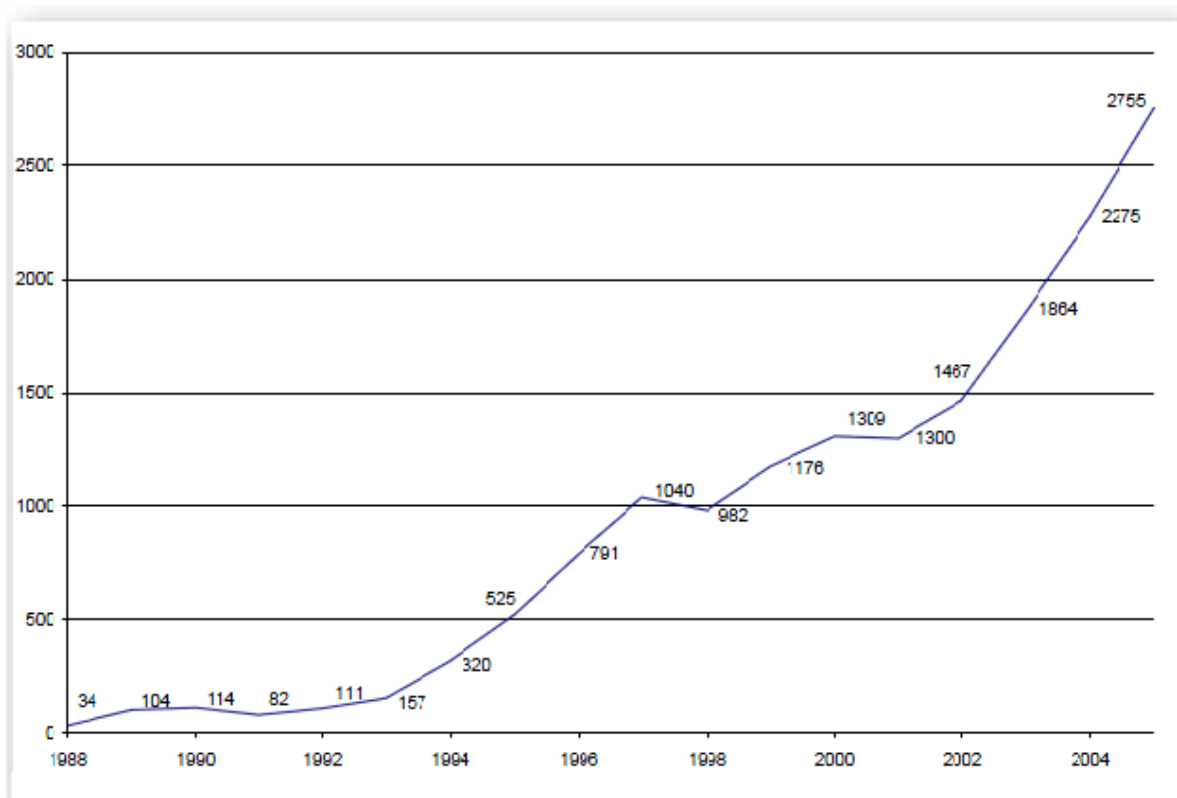


Figura 2.12: Evolução da venda de máquinas RP em geral, de 1988 a 2005.

Tabela 2.4 – Vendas de impressoras 3D de 1996 a 2003.

Empresa	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Total
<i>Stratasys</i>	90	40	60	75	115	95	305	497	1277
<i>Z Corp.</i>	1	7	48	105	170	188	210	349	1078
<i>3D Systems</i>	14	113	90	155	227	182	88	53	922
<i>Objet</i>	-	-	-	-	-	24	51	94	169
<i>Envisiontec</i>	-	-	-	-	-	-	2	39	41
<b>TOTAL</b>	105	160	198	335	512	489	656	1032	3487

A indústria de RP encontra-se na beira de uma grande mudança. Embora a prototipagem rápida tenha se impregnado no processo de desenvolvimento de produto ao redor do mundo, ainda há muito a evoluir antes de atingir maturidade completa. O surgimento de novos processos, materiais e sistemas eventualmente abrirão novos mercados caracterizados por novos clientes e aplicações originais.



## 2.3 PROJETO REPRAP

O grupo de pesquisa de Adrian Bowyer, o fundador do projeto RepRap, foca na área de biomimética, ciência que estuda os modelos e processos da natureza para tomá-los de inspiração na solução de problemas humanos (BENYUS, 1997). A partir dessa motivação, e provavelmente inspirado também pelo construtor universal de von Neumann, ele concebeu uma impressora 3D baseada na tecnologia FDM capaz de replicar-se ou até produzir uma versão melhorada de si própria, possibilitando uma difusão mais rápida da tecnologia entre os usuários comuns.

Por conta dessa capacidade evolutiva, a primeira geração de máquinas recebeu o codinome Darwin, e a segunda (que saiu de uma Darwin) o codinome Mendel (figura 2.13). Os materiais comumente utilizados por elas são os plásticos ABS e PLA.

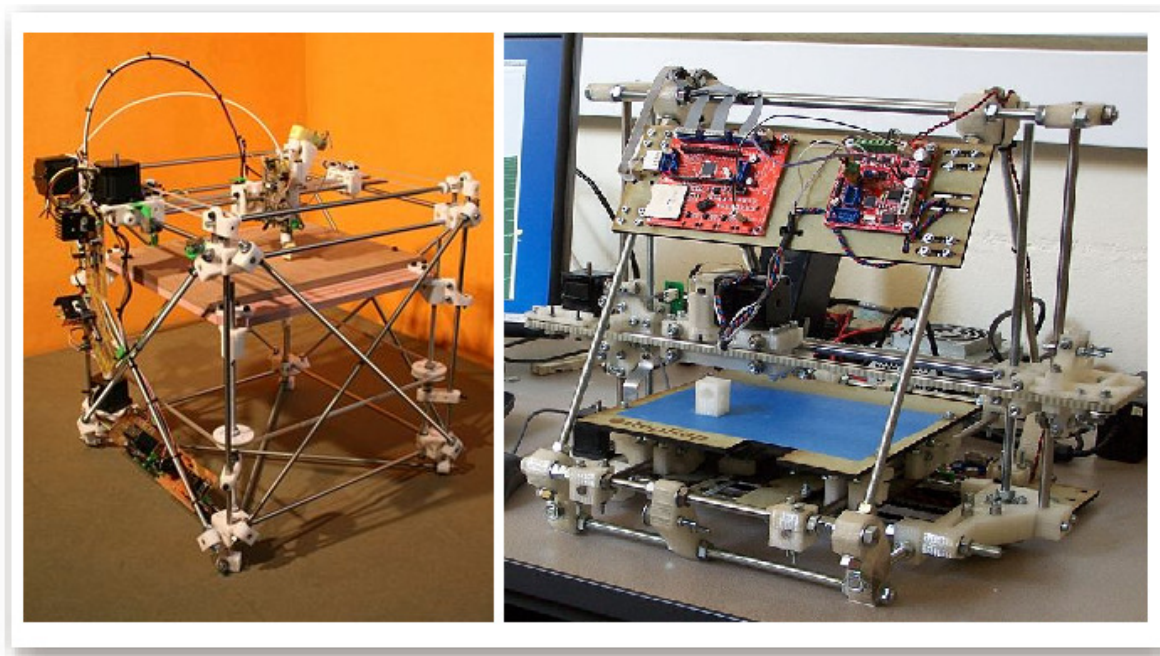


Figura 2.13: RepRap Versão I – Darwin (esquerda) e Versão II – Mendel (direita).

Por enquanto, a RepRap é uma iniciativa acadêmica, apesar de já contar com financiamentos externos. Hoje, ela é usada apenas por pesquisadores e uma esforçada base de autodidatas com conhecimentos técnicos tanto em mecânica como eletrônica. Apesar disso, Bowyer não vê barreiras para a sua popularização, e acredita no seu potencial para romper com a manufatura, assim como o compartilhamento de mp3 forçou a indústria da música a se reinventar.



Todo o esquema de hardware, circuitos, software e montagem é disponibilizado de forma aberta na wiki do projeto, que tenta reunir também de maneira organizada os trabalhos em andamento para aperfeiçoamento. O site conta com uma comunidade bastante participativa, com representantes de diversos países e apoio de outros projetos derivados, dentre os quais destaca-se a MakerBot Industries. Fundada em 2009 por desenvolvedores que estudaram a RepRap, a empresa tem o objetivo de comercializar impressoras 3D do porte e preço propostos pelo projeto, mas ao contrário dele não foca na auto-replicação das máquinas. Abre-se mão dessa propriedade para oferecer um design que torna o processo de montagem e manutenção muito mais simples que a RepRap, corrigindo o grande empecilho para sua comercialização. A empresa hospeda também uma comunidade na internet, chamada Thingiverse, na qual os usuários de impressoras 3D divulgam seus projetos pessoais de peças, hardware e software ligados à tecnologia, disponibilizando toda a documentação.

Por conta dessas características da MakerBot, adquiriu-se uma máquina (figura 15, à esquerda) para a fabricação das peças da RepRap deste trabalho. Essa decisão não só permitiu uma familiarização com a tecnologia utilizada pelo projeto a partir de um exemplar mais amigável, como de fato seguiu a sua filosofia de replicação. Para a confecção de algumas peças mais complexas nas quais não se obteve a qualidade desejada na MakerBot, utilizou-se uma máquina da Stratasys disponível no laboratório (figura 2.14, à direita), também baseada na técnica FDM.

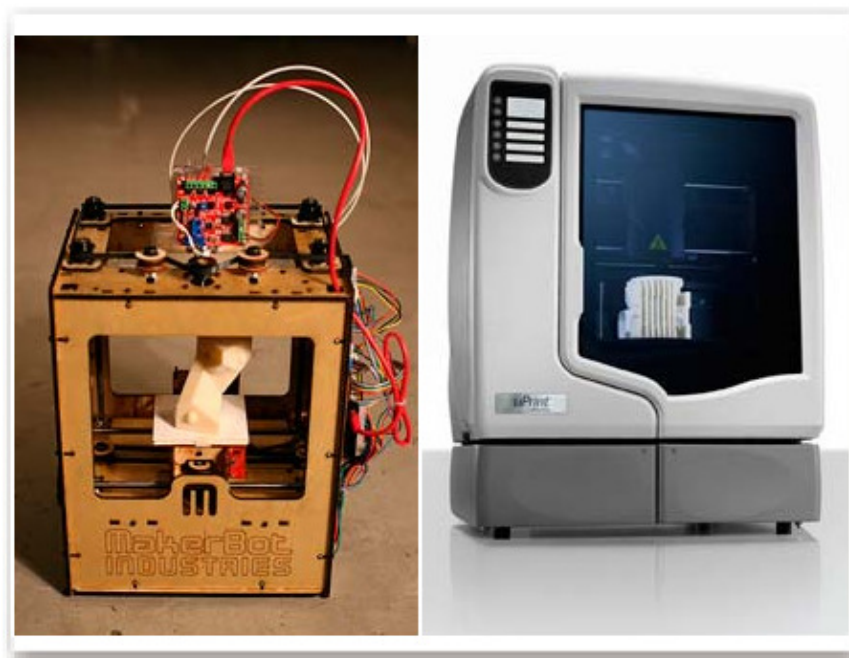


Figura 2.14: MakerBot Cupcake CNC (esquerda) e Stratasys Dimension uPrint (direita).

## 2.4 METODOLOGIA

Neste trabalho, utiliza-se a metodologia de projeto proposta por Rozenfeld (2005), que é sintetizada na figura 2.15. O processo de desenvolvimento de produtos (PDP) é o conjunto de atividades voltadas ao projeto, produção e lançamento de produtos industriais, atendendo às necessidades do mercado. O produto em si corresponde à tradução do conhecimento das oportunidades tecnológicas em informações de projeto.

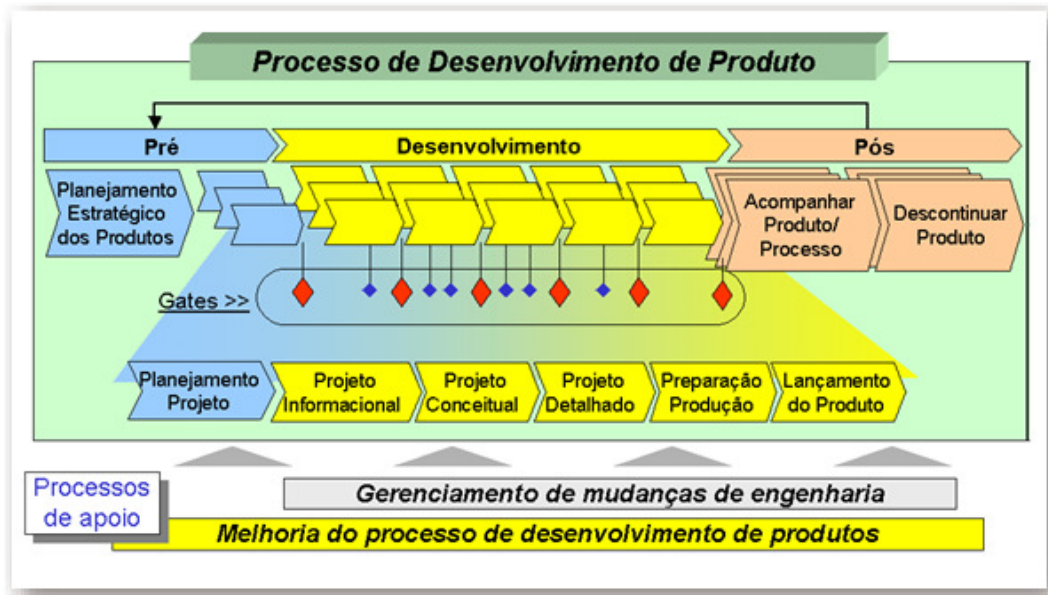


Figura 2.15: Fases do processo de desenvolvimento de produtos segundo Rozenfeld (2006).

Este trabalho dedica-se à documentação do desenvolvimento de uma RepRap Mendel, que já conta com bastante material disponível na internet, mas é consideravelmente disperso e gera muitas dúvidas para os iniciantes. Espera-se criar uma visão completa de processo de desenvolvimento de um produto mecatrônico, relacionando as necessidades dos clientes e a implementação dos requisitos de engenharia, e fornecer um ponto de partida mais seguro para pessoas que desejem criar suas próprias máquinas de prototipagem rápida.

Tratando-se da implementação de um projeto existente, muitas etapas do PDP estão disponíveis na sua documentação, e outras apenas implícitas. O projeto detalhado, que corresponde à solução final encontrada para a máquina, já encontra-se bem explicitada, apesar de contar com constantes modificações. Porém, as fases de projeto informacional e conceitual necessitam de um trabalho de abstração e engenharia reversa, de modo a contextualizar o produto no processo de desenvolvimento seguindo a metodologia. Convém frisar que a metodologia proposta é feita com o objetivo de apoiar o desenvolvimento de produtos como um todo, portanto etapas podem ser realizadas ou não para determinados casos sem beneficiar ou prejudicar o seu desenvolvimento, ficando essa decisão a cargo da equipe.

# 3 PROJETO INFORMACIONAL

## 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é feito o levantamento dos aspectos e influências dos diversos parâmetros dimensionais e operacionais relativos ao sistema de prototipagem rápida. São abordados os procedimentos para a definição das especificações de projeto, que correspondem ao produto final da fase de projeto informacional, a partir de um conjunto de necessidades identificadas pelos clientes. Elas orientam a geração de soluções, e fornecem a base sobre a qual são elaborados os critérios de avaliação e tomada de decisões nas etapas seguintes do projeto.

A principal ferramenta utilizada ao longo do projeto informacional é a matriz QFD (Quality Function Deployment, ou Desdobramento da Função Qualidade). Esta fase segue os seguintes processos: definição do problema de projeto, identificação do ciclo de vida do produto, levantamento das necessidades dos clientes, estabelecimento dos requisitos de projeto e a criação da lista de especificações-meta.

## 3.2 PROBLEMA DE PROJETO

A prototipagem rápida tem o potencial de se tornar a próxima tecnologia de ruptura na indústria da manufatura e, futuramente, afetar profundamente a vida de pessoas comuns no que diz respeito à forma como enxergam os processos de fabricação e o acesso a produtos personalizados. Contudo, as máquinas existentes atualmente no mercado enfrentam certos fatores para penetração em massa no mercado: alto custo de aquisição e necessidade de conhecimentos técnicos para manutenção e uso adequados.

Logo, o projeto RepRap propõe uma maneira de contornar essas restrições e popularizar a tecnologia, através de uma impressora 3D capaz de replicar-se e ser montada com produtos relativamente acessíveis. Dessa forma, torna-se possível sua rápida proliferação e uma base para comercialização a baixo custo, mantendo a qualidade satisfatória. Como já foi discutido, a tecnologia FDM é a que apresenta as melhores características para atender essas expectativas, tanto pelo porte como pelo custo. Portanto, o conjunto de informações coletadas nessa fase restringe-se a este processo.

### 3.3 CICLO DE VIDA

Nesta etapa do projeto, são levantados e analisados todos os processos pelos quais o produto passa durante um ciclo de vida completo, desde o seu desenvolvimento até o descarte. Aspectos como custos, alocação de recursos humanos e financeiros, logística de distribuição, uso e estratégias de desativação trazem consigo requisitos e necessidades para o novo produto, sendo necessário considerar seus inter-relacionamentos. Assim, facilita-se a definição das necessidades dos clientes distinguindo-as por etapa do ciclo.

Por este trabalho se tratar do projeto de um produto ainda muito restrito ao meio acadêmico, a abrangência das etapas do seu ciclo e as informações relacionadas a cada uma restringe-se à experiência dos usuários. Portanto, baseia-se em Fonseca (2000) e um esforço criativo para descrever a lista com as principais etapas, ilustradas na figura 3.1. A representação em espiral evidencia a necessidade de prever o ciclo de vida na fase de pré-desenvolvimento do produto (percepção de mercado e maturação da idéia) e em seguida realizar a busca por informações durante o projeto informacional, para então partir para o projeto conceitual.

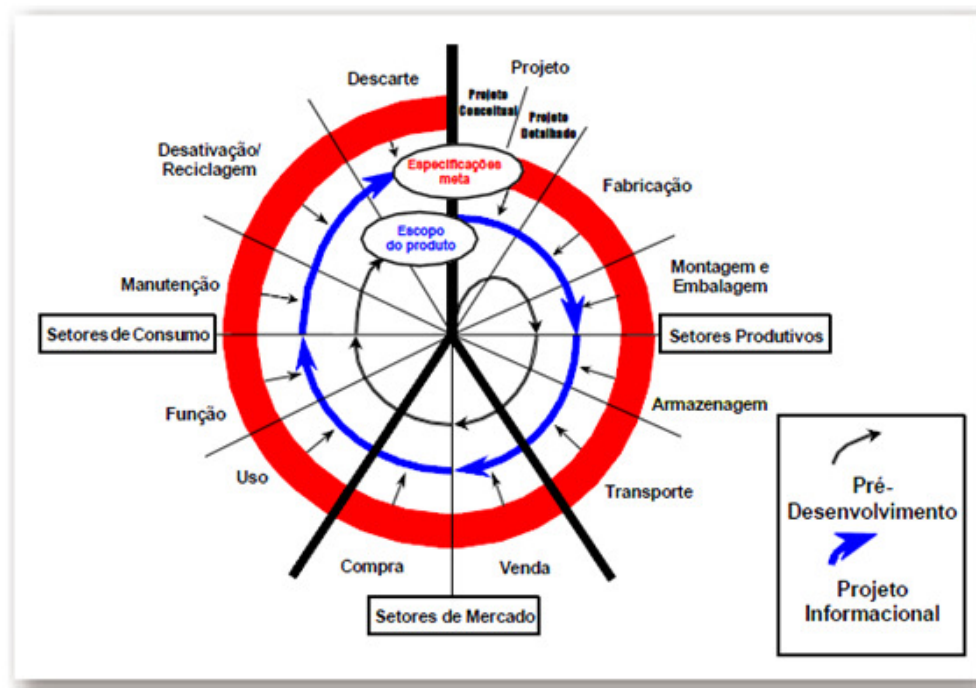


Figura 3.1: Ciclo de vida em espiral.

A partir da figura 3.1 também é possível separar os clientes do projeto por setores do ciclo em que estão envolvidos: clientes internos, intermediários e externos. A primeira categoria compreende as pessoas relacionadas ao PDP, envolvendo as áreas funcionais de projeto, manufatura e manutenção. Os clientes intermediários são os envolvidos na distribuição e comercialização do produto. E os clientes externos são os usuários da máquina.

No projeto RepRap, os clientes internos muitas vezes coincidem com os clientes externos, isto é, quem a desenvolve e monta é o próprio usuário final. Para o levantamento das necessidades dos clientes, é interessante adotar a idéia de que a máquina será usada por pessoas inexperientes com o assunto, que não estiveram em contato com o processo de desenvolvimento. Os clientes intermediários correspondem aos fornecedores dos componentes mecânicos e eletrônicos, além de outros proprietários de máquinas de RP que eventualmente possam fabricar as peças necessárias para montagem da RepRap. Por não se tratar de um produto comercial, essa é uma visão que não se aplica muito bem à maioria das metodologias.

### **3.4 NECESSIDADES DOS CLIENTES**

Os clientes normalmente manifestam suas necessidades na forma de bens que desejam comprar, como carros e casas. Contudo, suas necessidades reais são pelos serviços que tais bens proporcionam, como transporte e moradia. Já as necessidades latentes são despertadas por bens que oferecem serviços ainda inexistentes, como os primeiros celulares que apresentaram funções de câmeras digitais. As necessidades culturais, por sua vez, refletem o desejo de demonstrar a aceitação de determinados padrões.

Pelo fato das máquinas de prototipagem rápida serem completamente desconhecidas até por muitos engenheiros, este produto visa atender uma necessidade latente – fabricar os próprios produtos que desejar. A partir dessa idéia geral, inicia-se o trabalho de descobrir quais necessidades estão implícitas. O levantamento se deu com base em pesquisas bibliográficas, na experiência com o uso de outras máquinas (Stratasys e MakerBot), conhecimentos de engenharia e atributos do produto, tendo em mente a praticidade e o baixo custo, que são as características mais buscadas no projeto.

Esse é o procedimento inicial para relacionar os desejos do cliente com as soluções de engenharia, que são passíveis de medição, testes e avaliações objetivas para verificar sua conformidade. Cada necessidade é transformada em uma frase curta que sintetiza a informação e em seguida divide-se os requisitos de acordo com a fase do ciclo de vida, como listado na tabela 3.1. A ferramenta utilizada para a atribuição dos pesos foi o diagrama de Mudge, que é uma matriz quadrada composta pelos requisitos dispostos nas linhas e colunas. Eles são comparados um a um, exceto os iguais (que formam a diagonal), e decide-se qual apresenta a maior importância.

Tabela 3.1 – Requisitos dos clientes do projeto

FASE DO CICLO	Requisitos dos clientes	Peso
<i>Projeto</i>	Ter baixo consumo de energia	2
	Ter reduzido número de componentes	2
	Ter aparência atrativa	1
<i>Fabricação</i>	Ser fácil de montar	3
	Ter baixo custo de aquisição e montagem	5
	Ter componentes fáceis de adquirir	2
<i>Utilização</i>	Ser compacta	3
	Ser silenciosa	1
	Ser rápida	3
	Ter pouco peso	3
	Ser segura	2
	Ter alta resistência ao uso	3
	Ser de fácil operação	3
	Ter baixo custo de operação	3
	Ter boa qualidade de impressão	4
	Ter grande volume de trabalho	2
	Ter baixa probabilidade de falhas	4
	Ser capaz de trabalhar com diferentes tipos de materiais	1
	Ser compatível com diversos sistemas operacionais	1
	<i>Manutenção</i>	Ser de fácil manutenção
Ter baixo custo de manutenção		4

Este é o primeiro campo a ser preenchido no QFD, como ilustra a figura 3.3. A partir dele é preenchida a matriz de planejamento, que geralmente contém uma análise competitiva, isto é, avaliação de como outros produtos existentes atendem cada uma. Nesse caso, baseou-se na experiência com as máquinas MakerBot e Stratasys. A última destaca-se pelos atributos de qualidade e confiabilidade, enquanto a outra possui um custo significativamente inferior – quase vinte vezes. O projeto RepRap possui características muito mais próximas da MakerBot, é claro, mas dependendo do grau de comprometimento do seu executor pode chegar a uma performance ainda melhor (figura 3.2).

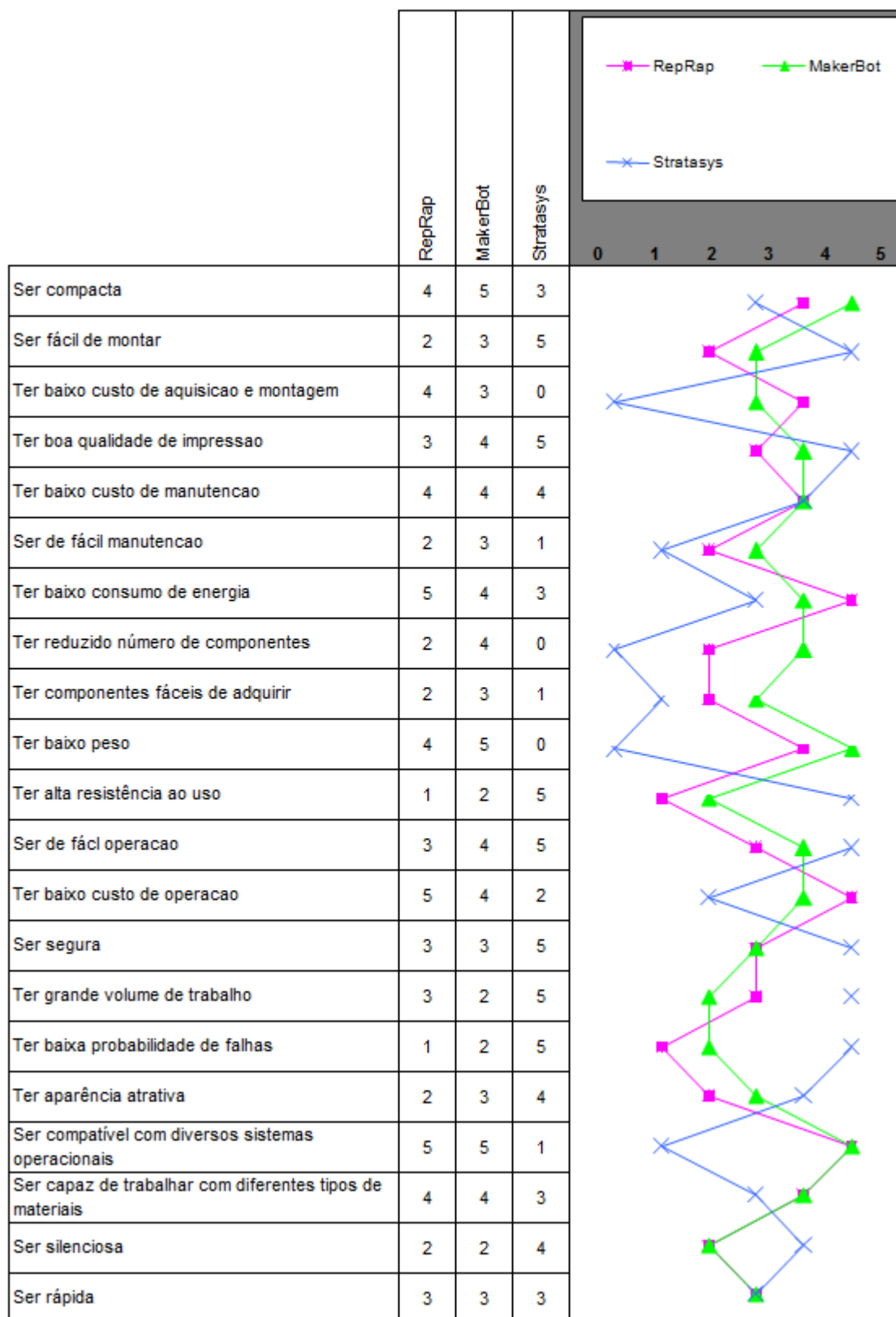


Figura 3.2: Análise competitiva.

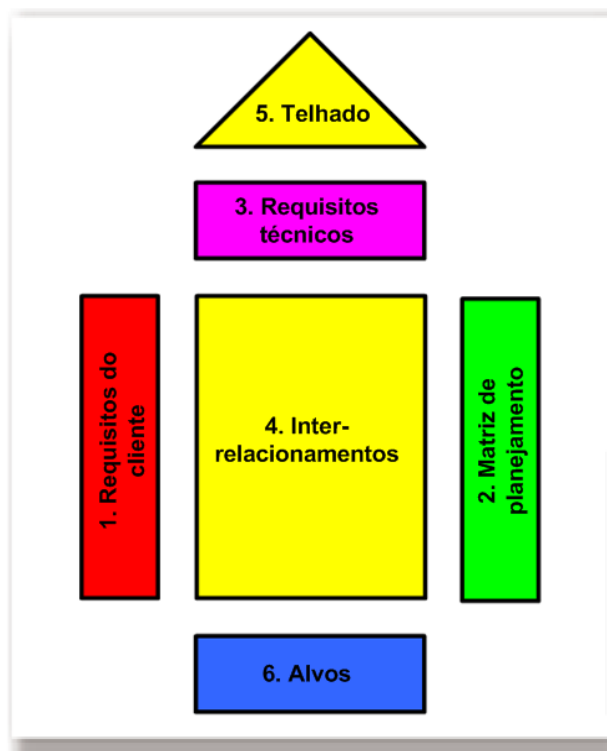


Figura 3.3: Esquema da matriz QFD.

### 3.5 REQUISITOS DE PROJETO

Nesta etapa (campo 3 do QFD), busca-se a conversão das necessidades dos clientes (“o quê”) em requisitos de projeto (“como”), que são as características mensuráveis do produto e podem ser mais facilmente entendidas pelos projetistas. Esta constitui-se a primeira decisão física sobre o produto a ser projetado, em que ocorrem a definição dos parâmetros definitivos que devem ser apresentados para atender às necessidades.

Da mesma maneira que os requisitos dos clientes são estruturados em linhas e colunas contendo a etapa do ciclo de vida, o requisito e o peso, os atributos específicos do produto são relacionados com as unidades de medida e a tendência desejada de crescimento. A tabela 3.2 apresenta essa lista, que é relativamente enxuta com o objetivo de facilitar a manipulação no processo de busca por alternativas.

O próximo campo a ser preenchido no QFD, a matriz central, avalia o relacionamento entre os requisitos de clientes e os requisitos de projeto. Novamente, o processo é realizado de maneira subjetiva, baseado em experiências e conhecimentos próprios. A pontuação resultante é utilizada para hierarquizar os requisitos de projeto conforme sua importância. As tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 ilustram o resultado. O símbolo de círculo preenchido indica relacionamento forte (valor 9), o círculo vazio indica relacionamento moderado (valor 3) e o triângulo indica relacionamento fraco (valor 1) entre os requisitos.



Tabela 3.2: Estabelecimento dos requisitos de projeto.

<i>Requisitos</i>	<i>Tendência</i>	<i>Unidade</i>
Dimensões da máquina	Decrescente	mm
Volume de trabalho (dimensões máximas da peça produzida)	Crescente	mm
Potência de funcionamento	Decrescente	W
Operações de montagem (tempo)	Decrescente	dias
Peso da máquina	Decrescente	kg
Erros de montagem	Decrescente	%
Interface simples para o usuário (operações de uso)	Decrescente	n°
Custo de aquisição da máquina	Decrescente	R\$
Custo de montagem	Decrescente	R\$
Custo do material de fabricação das peças	Decrescente	R\$
Erro de posicionamento dos eixos (precisão)	Decrescente	mm
Custo de manutenção	Decrescente	R\$
Vida útil	Crescente	anos
Frequência de manutenção e ocorrência de falhas	Decrescente	n%/h
Compatibilidade com sistemas operacionais	Crescente	n°
Número de componentes padronizados	Crescente	%
Arestas cortantes, fios e elementos quentes expostos	Decrescente	n°
Nível de ruído	Decrescente	dB
Velocidade dos eixos	Crescente	mm/min
Diâmetro do bico da extrusora	Decrescente	mm
Espessura da camada produzida	Decrescente	mm
Materiais de trabalho	Crescente	n°
Velocidade de extrusão	Crescente	cm <sup>3</sup> /h

Tabela 3.3 – Matriz de relacionamento.

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")									
Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Dimensoes da máquina	Volume de trabalho	Potência de funcionamento	Operacoes de montagem	Peso da máquina	Probabilidade de erros de montagem	Interface simples para o usuário	Número de componentes da máquina	Custo de aquisicao da máquina
Ser compacta	⊖	⊖			⊖			▲	
Ser fácil de montar	▲			⊖				⊖	
Ter baixo custo de aquisicao e montagem				▲				⊖	⊖
Ter boa qualidade de impressao						▲			⊖
Ter baixo custo de manutencao						▲			
Ser de fácil manutencao					▲				
Ter baixo consumo de energia			⊖						
Ter reduzido número de componentes				⊖				⊖	⊖
Ter componentes fáceis de adquirir								▲	
Ter baixo peso					⊖				
Ter alta resistência ao uso						▲			
Ser de fácil operacao							⊖		
Ter baixo custo de operacao							▲		
Ser segura									
Ter grande volume de trabalho		⊖							
Ter baixa probabilidade de falhas						⊖			
Ter aparência atrativa									▲
Ser compatível com diversos sistemas operacionais									
Ser capaz de trabalhar com diferentes tipos de materiais									
Ser silenciosa									
Ser rápida									⊖

Tabela 3.4 – Matriz de relacionamento (cont.)

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")									
Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Custo de montagem	Custo do material	Precisao de posicionamento	Custo de manutencao	Vida útil	Frequência de manutencao e ocorrência de falhas	Compatibilidade com sistemas operacionais	Número de componentes padronizados	Seguranca
Ser compacta									
Ser fácil de montar	○								
Ter baixo custo de aquisicao e montagem	○	○	○			▲			
Ter boa qualidade de impressao			○						
Ter baixo custo de manutencao				○				○	
Ser de fácil manutencao						○		○	
Ter baixo consumo de energia									
Ter reduzido número de componentes									
Ter componentes fáceis de adquirir								○	
Ter baixo peso									
Ter alta resistência ao uso					○	○			
Ser de fácil operacao									
Ter baixo custo de operacao						▲			
Ser segura									○
Ter grande volume de trabalho									
Ter baixa probabilidade de falhas						○			
Ter aparência atrativa									
Ser compatível com diversos sistemas operacionais							○		
Ser capaz de trabalhar com diferentes tipos de materiais									
Ser silenciosa									
Ser rápida									

Tabela 3.5 – Matriz de relacionamento (cont.)

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Seguranca	cantos vivos e arestas cortantes expostas	Nível de ruído	Velocidade dos eixos	Diâmetro do bico da extrusora	Espessura da camada produzida	Materiais de trabalho	Velocidade de extrusao
Ser compacta									
Ser fácil de montar									
Ter baixo custo de aquisicao e montagem					▲	○			
Ter boa qualidade de impressao						○	○		▲
Ter baixo custo de manutencao									
Ser de fácil manutencao									
Ter baixo consumo de energia									
Ter reduzido número de componentes									
Ter componentes fáceis de adquirir									
Ter baixo peso									
Ter alta resistência ao uso									
Ser de fácil operacao									
Ter baixo custo de operacao									
Ser segura		○	○						
Ter grande volume de trabalho									
Ter baixa probabilidade de falhas									
Ter aparência atrativa			▲						
Ser compatível com diversos sistemas operacionais									
Ser capaz de trabalhar com diferentes tipos de materiais								○	
Ser silenciosa				○					
Ser rápida					○		○		○

No telhado do QFD (campo 5), também conhecido como Matriz de Correção, confrontam-se os requisitos de projeto aos pares, verificando-se o relacionamento existente entre eles. Quando o relacionamento é positivo, significa dizer que o aumento de um resulta no aumento do outro, com intensidade variada. Essa informação ajuda a perceber áreas onde as melhorias levam a mais benefícios. Se o relacionamento for negativo e o ideal é o aumento dos dois, deve-se dar prioridade ao requisito mais relevante e buscar um equilíbrio que atenda satisfatoriamente as necessidades do projeto, ou pode servir como oportunidade de soluções inovadoras que evitem tal comprometimento. A figura 3.4, propositalmente editada para melhor visualização (o trecho cortado do telhado não continha relações), ilustra esse campo. Os sinais (+) e (++) indicam relacionamentos positivos e fortemente positivos, respectivamente, e os sinais (-) e (--) indicam relacionamentos negativos de forma análoga.

Completa-se a matriz com a seção que resume as conclusões tiradas de toda a informação contida no QFD e análise do projeto. O campo de alvos contém não somente os valores de cada requisito de projeto que se pretende atingir, mas também sua importância relativa em atender as necessidades dos clientes, calculada a partir dos campos 1 e 4.

Analisando a tabela 3.6, percebe-se que os itens aos quais se atribuiu maior importância relativa no projeto RepRap correspondem a requisitos de facilidade de uso e aquisição, em detrimento de versatilidade e qualidade. Isso não significa dizer que a máquina não seja capaz de produzir grandes peças com geometrias fiéis ao desenho e utilizando materiais diversificados, mas sim que estas são características de segundo plano da filosofia do projeto, decorrentes de maior esforço do usuário em executar e refinar a montagem e calibração dos componentes. O cálculo do peso relativo foi feito automaticamente pelo modelo utilizado com base na dificuldade (0 – fácil de cumprir, 10 – muito difícil), na matriz de relacionamento e nos pesos de cada requisito.



Tabela 3.6 – Análise de metas.

<i>Requisitos</i>	<i>Dificuldade</i>	<i>Peso relativo</i>
Dimensões da máquina	0	3,3
Volume de trabalho (dimensões máximas da peça produzida)	0	2,9
Potência de funcionamento	0	2,0
Operações de montagem (tempo)	5	4,1
Peso da máquina	0	4,3
Erros de montagem	6	2,5
Interface simples para o usuário (operações de uso)	2	3,3
Custo de aquisição da máquina	4	7,4
Custo de montagem	2	5,9
Custo do material de fabricação das peças	1	4,9
Erro de posicionamento dos eixos (precisão)	7	5,6
Custo de manutenção	4	3,9
Vida útil	6	2,9
Frequência de manutenção e ocorrência de falhas	8	8,7
Compatibilidade com sistemas operacionais	0	1,0
Número de componentes padronizados	6	6,9
Arestas cortantes, fios e elementos quentes expostos	3	2,0
Nível de ruído	1	1,0
Velocidade dos eixos	1	3,5
Diâmetro do bico da extrusora	3	5,6
Espessura da camada produzida	3	4,9
Materiais de trabalho	0	1,0
Velocidade de extrusão	3	3,4

### **3.6 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO**

O último processo do projeto informacional é a definição das especificações de projeto, levando em conta os objetivos e restrições do projeto. Apenas a hierarquização dos requisitos não constitui ainda um conjunto de informações suficiente para representar as metas a serem atingidas. Portanto, a cada requisito de projeto associa-se um valor alvo estipulado, a maneira pela qual ele será medido, restrições e saídas indesejáveis. Essa lista baliza as fases subsequentes do projeto, embora especificações como vida útil e frequência de manutenção não possam ser rigidamente testadas com o protótipo porque dependem da observação do uso do produto ao longo de um tempo bastante prolongado.

Com base nos resultados obtidos com o QFD, preparou-se a lista apresentada na tabela 3.7. Os valores definidos para as metas foram baseados, na sua maioria, em características oficiais de uma RepRap Mendel. De posse dessa lista e das relações encontradas na matriz QFD, é possível prosseguir para a elaboração das soluções de projeto sobre as quais o produto será desenvolvido. Mesmo com as restrições financeiras e de componentes impostas pela RepRap, é possível atingir as especificações estabelecidas para a construção de uma impressora 3D.

Não se almeja, a priori, uma qualidade semelhante a de produtos profissionais encontrados no mercado, mas sim tornar a prototipagem rápida mais acessível a outros setores além das grandes empresas. Mesmo assim, analisando as metas estabelecidas, percebe-se que a RepRap pode oferecer características bastante satisfatórias e, tendo em vista o investimento proposto, uma relação custo-benefício incomparável.



Tabela 3.7 – Lista de especificações-meta do projeto.

<i>Requisitos</i>	<i>Unidade</i>	<i>Objetivos</i>	<i>Sensor</i>	<i>Saídas indesejáveis</i>
Dimensões da máquina	mm	500 x 400 x 360	Fita métrica	Dimensões maiores que o desejado
Volume de trabalho	mm	200 x 200 x 140	Fita métrica	Volume menor que o desejado
Potência de funcionamento	W	Fonte ATX 450W	Wattímetro	Fontes de alto consumo
Operações de montagem (tempo)	n°	Menos de uma semana	Lista de verificação	Muitos dias de montagem
Peso da máquina	kg	Em torno de 7kg	Balança	Mais de 10kg
Erros de montagem	%	Menos de 1%	Testes de montagem	Erros críticos
Interface simples para o usuário (operações de uso)	n°	Menos de 10 operações para fabricar uma peça	Testes com softwares	Mais de 10 operações, tornando complexo
Custo de aquisição da máquina	R\$	Menos de R\$2.500,00	Soma dos custos	Custo exceder R\$2.500,00
Custo de montagem	R\$	Menos de R\$500,00	Planilha de custos	Custo superior a 500 reais
Custo do material de fabricação das peças	R\$	Menos de R\$40,00/kg	Planilha de custos	Custo superior ao especificado
Erro de posicionamento dos eixos (precisão)	mm	Menos de 0,1mm	Paquímetro	Erro superior a 0,1mm
Custo de manutenção	R\$	Menos de 5% do custo total	Custo anual	Custo superior ao especificado
Vida útil	anos	5 anos	Testes	Menos de 5 anos
Frequência de manutenção e ocorrência de falhas	n°/h	1 falha a cada 200 horas de uso	Registro de falhas e testes	Muitas falhas durante o uso
Compatibilidade com sistemas operacionais	n°	Pelo menos 3 sistemas operacionais	Projeto do software	Incompatibilidade com os principais sistemas
Número de componentes padronizados	%	90% disponível no comércio local	Lista de fornecedor (BOM)	Menos de 50% dos componentes
Arestas cortantes, fios e elementos quentes expostos	n°	Nenhum	Projeto	Máquina possuir elementos que apresentem riscos
Nível de ruído	dB	Menos de 80dB	Dosímetro	Mais de 80dB
Velocidade dos eixos	mm/min	X,Y: 2000mm/min Z: 100mm/min	Paquímetro Cronômetro	Velocidade inferior à especificada
Diâmetro do bico da extrusora	mm	Menos de 0,6mm	Micrômetro	Diâmetro maior que o especificado
Espessura da camada produzida	mm	Em torno de 0,4mm	Paquímetro	Camada muito espessa
Materiais de trabalho	n°	PLA, HDPE, ABS	Testes	Apenas um tipo
Velocidade de extrusão	cm³/h	15cm³/h	Paquímetro Cronômetro	Velocidade inferior

## **4 PROJETO CONCEITUAL**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

As atividades do projeto conceitual relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema em questão. Até o projeto informacional, foi levantado “o quê” se espera do produto, e daqui em diante define-se “como” será implementado – transição do abstrato para o concreto. Esta é uma das fases mais importantes do processo de desenvolvimento de produto, uma vez que as decisões aqui tomadas exercem enorme impacto sobre os resultados das fases subsequentes. Há muito espaço para o surgimento de idéias inovadoras, aproveitando o fato de que o custo de mudanças ainda é baixo antes delas serem executadas fisicamente.

Apesar do projeto RepRap ter soluções bem definidas para a montagem da máquina de prototipagem rápida, serão levantados e avaliados outros conceitos do produto, utilizando os resultados obtidos no projeto informacional. Esse trabalho permite o entendimento da estrutura funcional proposta e facilita a visualização de áreas onde é possível melhorar, ao mesmo tempo que atende a lista de especificações-meta.

Os processos a serem seguidos consistem em modelar funcionalmente o produto, pesquisar princípios de soluções para as funções e combiná-las para compor concepções. A entrega final corresponde ao protótipo escolhido.

### **4.2 ESTRUTURA FUNCIONAL DO PRODUTO**

O estabelecimento das estruturas funcionais se deu através do método da função síntese, presente em diversos trabalhos da literatura de PDP, destacando-se a proposição de Pahl e Beitz (1996). Devem ser compreendidas as ações para formular a função global – isto é, a missão do sistema como um todo – e as funções parciais ou elementares que a substituem, sintetizadas em expressões compostas por um verbo e um substantivo. A estratégia é decompor o problema inicial em outros menores de complexidade reduzida, pelo mapeamento das necessidades dos clientes.

A modelagem funcional ajuda a descrever o produto em um nível abstrato, sem pensar ainda em como será realizado de fato, e a criatividade é favorecida pela manipulação de soluções parciais. Este desdobramento também facilita a visualização de quais ações o sistema realizará, suas interfaces e as variáveis de entrada e saída, que são representadas pelo fluxo de energia, material e sinal (ou informação).

A função global é o resumo do problema de projeto, e está definida na figura 4.1, bem como as grandezas de entrada e saída envolvidas no sistema. Nessa representação em alto nível, não há uma identificação quantitativa.

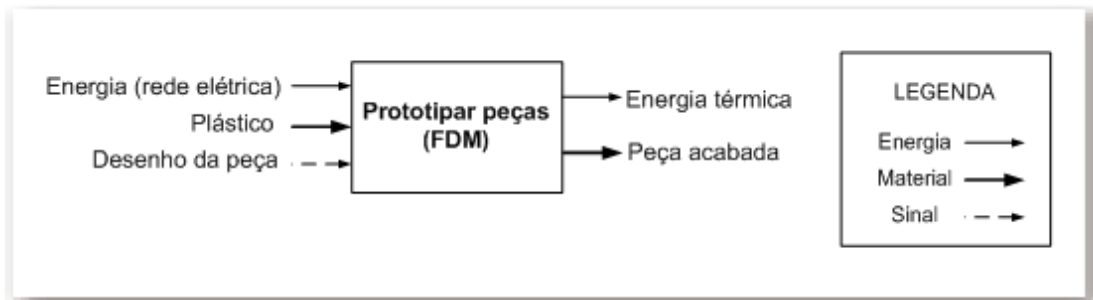


Figura 4.1: Função global do sistema.

O bloco que representa a função é uma espécie de caixa preta. O fluxo de entrada composto pela energia elétrica, o plástico que alimenta a máquina e o desenho da peça a ser prototipada é transformado na peça acabada, e há geração de energia térmica (calor) perdida para o meio ambiente. Seguindo a idéia de manter o modelo bem generalizado, não há detalhamento de outros componentes menos relevantes, como geração de ruídos ou tipo de plástico a ser utilizado.

Verifica-se que desta maneira é impossível visualizar uma solução que realize essa tarefa de maneira direta, então é preciso efetuar o desdobramento da função global nas suas funções parciais. Trata-se da explosão desse grande bloco inicial em outros menores, que interagem e atuam em conjunto para atender a função global. Tendo conhecimentos apenas do processo utilizado (tecnologia de prototipagem rápida FDM), distingue-se cinco funções principais que formam esse sistema, ilustradas na figura 4.2.

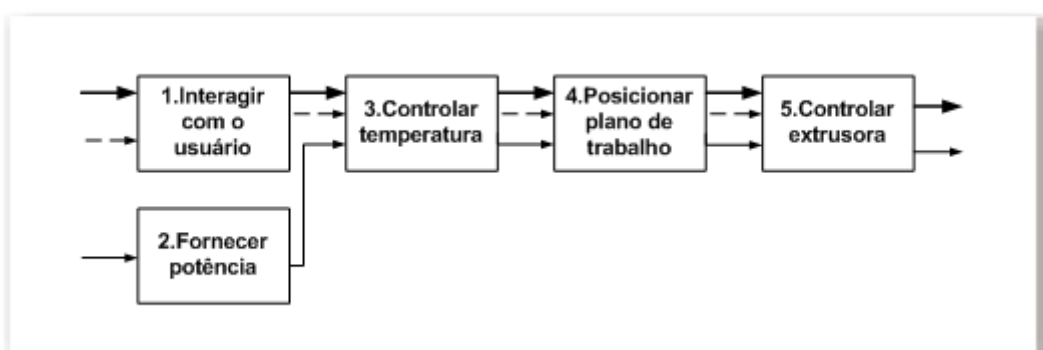


Figura 4.2: Funções parciais do sistema.

Mesmo assim, essas funções ainda são muito complexas e envolvem diversas atividades que não podem ser solucionadas diretamente. Então é preciso descer mais um nível de abstração para visualizar cada função elementar individualmente. Pelo fato da sequência de atividades do processo seguir sempre uma mesma estrutura funcional, é possível desdobrar cada função parcial separadamente, como mostram as figuras 4.3 a 4.7.

A figura 4.3 mostra os processos que dependem da atuação direta do usuário, que estão ligados ao processamento do desenho da peça através de software, e a inserção do material (termoplástico) na máquina. Por se tratarem de tarefas independentes entre si, estão representados em paralelo. Após essa função, toda a fabricação é automatizada. Esta última é representada apenas para completar o modelo funcional, não sendo relevante identificar soluções para sua realização. O material utilizado é geralmente fornecido em rolos de filamentos com cerca de 3mm, que são manualmente inseridos na máquina.

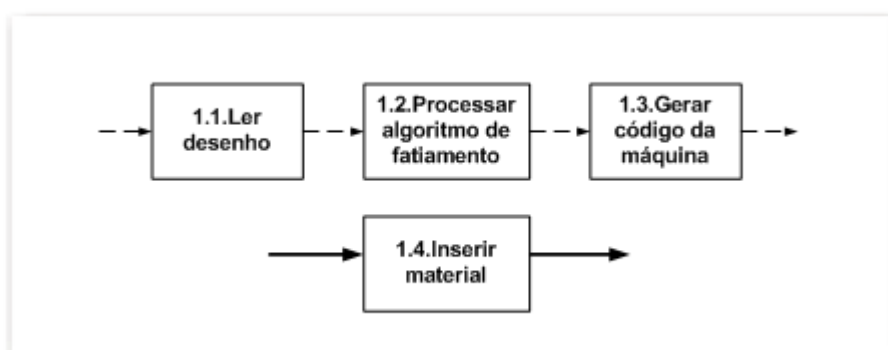


Figura 4.3: Funções elementares da função 1 - Interagir com o usuário.

Na figura 4.4 estão representadas as funções relacionadas à geração de energia para acionar os demais componentes da máquina, incluindo as placas de controle, os motores e circuitos de aquecimento. Existem diversas opções, desde que forneçam a voltagem indicada para estes componentes, porém cada uma propicia maior ou menor flexibilidade na organização do ambiente de trabalho.

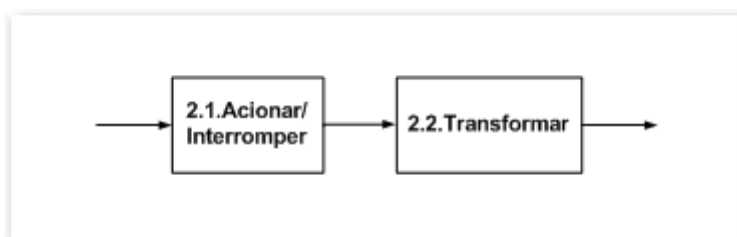


Figura 4.4: Funções elementares da função 2 - Fornecer potência.

A função de controle da temperatura, expandida na figura 4.5, não se restringe apenas ao aquecimento do filamento de plástico que será extrudado. Ela compreende também todo o ambiente de trabalho da máquina, que deve ser mantido a uma temperatura não muito inferior à de fusão do material termoplástico para facilitar a sua adesão. Ao mesmo tempo, esse calor deve ser isolado de componentes mais sensíveis e do usuário.

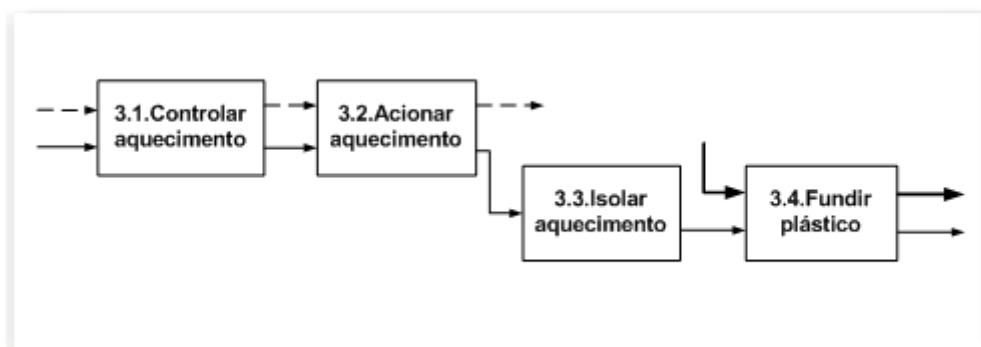


Figura 4.5: Funções elementares da função 3 - Controlar temperatura.

A função seguinte é a de posicionamento do plano de trabalho e consiste na movimentação dos três eixos (X, Y e Z) da impressora 3D. As suas funções elementares encontram-se na figura 4.6, e as diversas alternativas existentes serão discutidas posteriormente. Como em qualquer máquina de controle numérico, este movimento deve ser o mais preciso possível, na ordem do centésimo do milímetro.

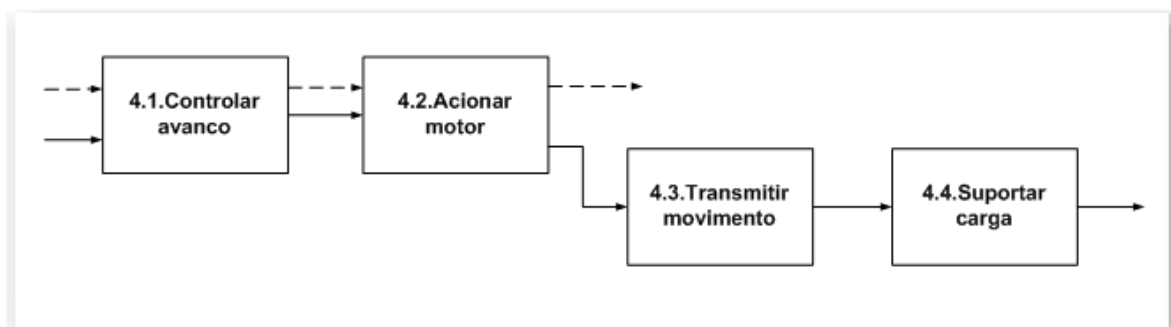


Figura 4.6: Funções elementares da função 4 - Posicionar plano de trabalho.

Por fim, após elevar a temperatura ao valor adequado e obter o correto posicionamento, a última função trata da deposição do material, através da extrusão do termoplástico pelo bico. As funções elementares estão ilustradas na figura 4.7, ficando implícita a ocorrência ou não da extrusão de material para suporte. Esse processo também exige uma precisão milimétrica para fornecer a quantidade certa de material, e na velocidade certa, para que se obtenha a sobreposição perfeita das camadas e a qualidade desejada.

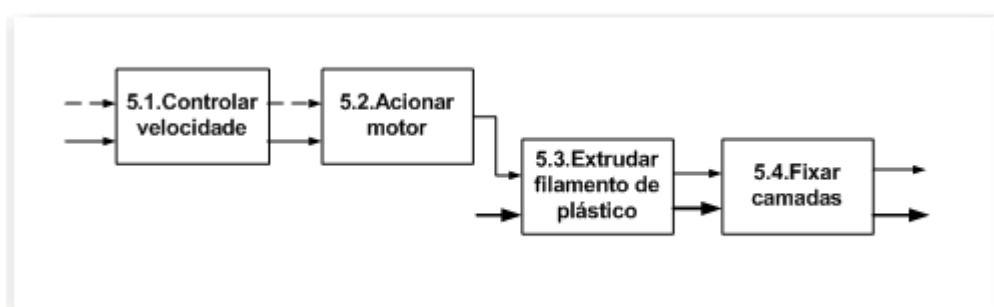


Figura 4.7: Funções elementares da função 5 - Controlar extrusora.

### 4.3 PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO

No estrutura funcional proposta se adequa às necessidades do problema de projeto, mas existem várias soluções para cada função, e elas atendem distintamente às especificações-meta. Quanto maior o número de soluções geradas, maior o número de combinações possíveis para conceber o produto. Este é o trabalho que exige mais esforço criativo, e pode ser auxiliado por alguns métodos que recomendam a criação de idéias em quantidade sem preocupar-se com questões de viabilidade (mais transpiração do que inspiração). A área da biomimética, por exemplo, busca inspiração nos sistemas naturais para fazer analogia a soluções de problemas dos seres humanos.

Um método sistemático amplamente utilizado e que alcança bons resultados é a Matriz Morfológica. A sequência de funções do processo preenche a primeira coluna da matriz, e em cada linha são registradas as respectivas soluções, na forma gráfica ou literal. Estas soluções são buscadas através de outros processos criativos, como o brainstorming, viabilizado através de pesquisas bibliográficas e estudos de materiais técnicos. Para resolver o problema global, combina-se os princípios de uma linha com as demais para gerar a alternativa de concepção do produto. É interessante notar que cada função elementar pode ser substituída por um componente ou conjunto que fará parte da máquina. Muitas figuras exibidas na tabela 4.1 são representações de equipamentos utilizados de fato em impressoras RepRap ou MakerBot, visando uma maior aproximação às soluções reais.

Para simplificar a matriz e evitar redundâncias de soluções, primeiro verificou-se se algumas funções poderiam ser suprimidas e implicitamente englobadas por outras. A função 3.4 (fundir plástico), associada ao controle de temperatura, está intimamente relacionada à 5.3 (extrudar filamento de plástico), que representa de uma maneira mais geral a solução utilizada para a extrusora. As funções 3.1 (controlar aquecimento), 4.1 (controlar avanço) e 5.1 (controlar velocidade) não estão representadas na tabela pela sua placa de controle mas pelo motor ou sensor utilizado (estas duas últimas, apesar de fazerem parte de funções parciais diferentes, apresentam as mesmas soluções – controle de motores – e por isso apenas a 4.1 foi representada). O hardware utilizado para os controles de temperatura e velocidade na RepRap e na MakerBot é baseado na arquitetura aberta Arduino, de uso amplamente difundido e bem documentado. Na primeira geração de eletrônicos da RepRap (Darwin) o controle era feito utilizando microcontrolador PIC.

Tabela 4.1 – Matriz morfológica.

Função	Princípios de solução		
1.1.Ler desenho	 <p>ReplicatorG</p>	 <p>RepRap Host</p>	 <p>RepSnapper</p>
1.2.Processar algoritmo de fatiamento	 <p>Skeinforge</p>		
1.3.Gerar código de máquina	 <p>Interruptor</p>	 <p>Botão</p>	 <p>Tomada</p>
2.2.Transformar	 <p>Fonte ATX</p>	 <p>Fonte de alimentação</p>	 <p>Transformador</p>
3.1.Controlar aquecimento	 <p>Termistor</p>	 <p>Termopar</p>	 <p>Termostato</p>
3.2.Acionar aquecimento	 <p>Resistência encapsulada em alumínio</p>	 <p>Filamento de NiCr</p>	 <p>Trilhas de cobre (PCB)</p>
3.3.Isolar aquecimento	 <p>PTFE (teflon)</p>	 <p>Madeira</p>	 <p>Poliuretano (espuma expansiva)</p>
4.1.Controlar avanço	 <p>Motor de passo</p>	 <p>Motor DC</p>	 <p>Servomotor</p>
4.3.Transmitir movimento	 <p>Correia e polia</p>	 <p>Fuso de esferas recirculantes e guias lineares</p>	 <p>Pinhão e cremalheira</p>
4.4.Suportar carga			
5.3.Extrudar filamento de plástico	 <p>Extrusora Mendel</p>	 <p>Extrusora Wade</p>	 <p>Extrusora Adrian</p>
5.4.Fixar camadas	 <p>Mesa de acrílico</p>	 <p>Mesa aquecida coberta por fita</p>	 <p>Mesa aquecida sob vidro</p>

## 4.4 ESTABELECIDAMENTO DA CONCEPÇÃO DO PRODUTO

Nesta seção, são discutidos os princípios de solução da tabela 4.1 que formam o protótipo da RepRap Mendel a ser construído. Muitos deles serão utilizados simultaneamente na máquina para executar suas diversas funções, e por isso torna-se aqui pertinente uma breve descrição destes componentes ou conjuntos que formam o protótipo escolhido pelo projeto, e em seguida um comparativo de suas combinações. Cada um comparado de maneira absoluta, utilizando conceitos de julgamento de viabilidade, disponibilidade técnica e confrontando com os requisitos.

### 4.4.1 Software

Os princípios de solução para as funções de 1.1 a 1.3 são softwares de CAD/CAPP/CAM. Todos são gratuitos, têm o código fonte livremente disponível na internet e são compatíveis com Windows, Linux e OSX, o que já atende os requisitos de projeto de possuir baixo custo e compatibilidade com os três principais sistemas operacionais. Portanto, a análise deve ser feita através de um benchmarking que compare não só a simplicidade da interface (outro requisito de projeto) mas também as capacidades do software. Antes disso, é importante compreender melhor as atividades de CAD/CAPP/CAM envolvidas no processo de FDM para entender qual o escopo do software.

As figuras 4.8 a 4.21 exibem os diagramas IDEF0 do sistema. IDEF (Integration DEFINition) é baseado na Técnica de Análise e Projetos Estruturados (Structured Analysis and Design Technique - SADT), que é uma abordagem gráfica para a descrição de um sistema, introduzida por Douglas T. Ross na década de 70. Em 1981, a Força Aérea Americana padronizou e levou ao conhecimento do público um subconjunto do SADT, chamado de IDEF0. A necessidade desta padronização deveu-se ao fato de que a Força Aérea trabalhava com diversas indústrias espaciais e cada uma trabalhava de uma forma diferente. Isto dificultava o controle e a documentação de seus processos. Ela permite a representação de uma coleção de atividades e outras ações utilizando-se de ICOMs (Input, Control, Output, Mechanism, ou entrada, controle, saída e mecanismo), setas e caixas – lembrando a abordagem de síntese funcional. Cada atividade ou função é conceitualmente representada por uma caixa retangular, sendo que esta atividade pode ser decomposta em vários níveis. Estes sub-níveis seguem as mesmas convenções. Portanto, um modelo completo de IDEF0 é uma representação hierárquica do processo, decomposta por atividades ou funções em quantos níveis forem necessários (MICHEL, 2002).



O sistema integrado é visto de maneira macro na figura 4.8, semelhante à função global. Tem como entrada as features de projeto, nome da peça, material utilizado, o próprio usuário que irá interagir com o software e a qualidade desejada. Através dos mecanismos – identificados pelos sistemas CAD, CAPP e CAM, a máquina de RP e uma rede de comunicação – e dos controles – representação gráfica 3D, regras de produção, recursos disponíveis (máquina), biblioteca de features e regras de validação de features –, são geradas as saídas: peça acabada (protótipo fabricado), o controle efetivo da máquina de RP, o código G usado para esse controle, o modelo gráfico 3D e as features STL.

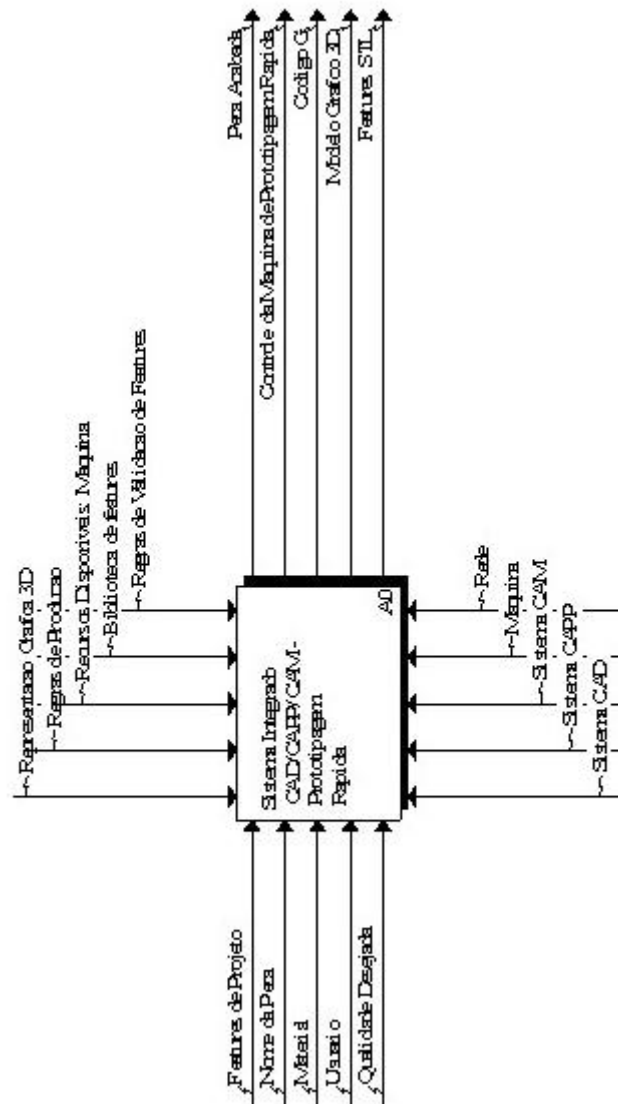


Figura 4.8: Diagrama IDEF0: Sistema integrado CAD/CAPP/CAM, nível A0

A figura 4.9 mostra o primeiro nível, em que se distinguem as entradas, mecanismos, controles e saídas de acordo com o sistema a que pertencem. A descrição se concentrará no sistema CAPP, por ter um valor mais significativo para o entendimento do planejamento de processo da prototipagem rápida. É nele em que se definem as características de maior influência no resultado final da peça produzida.

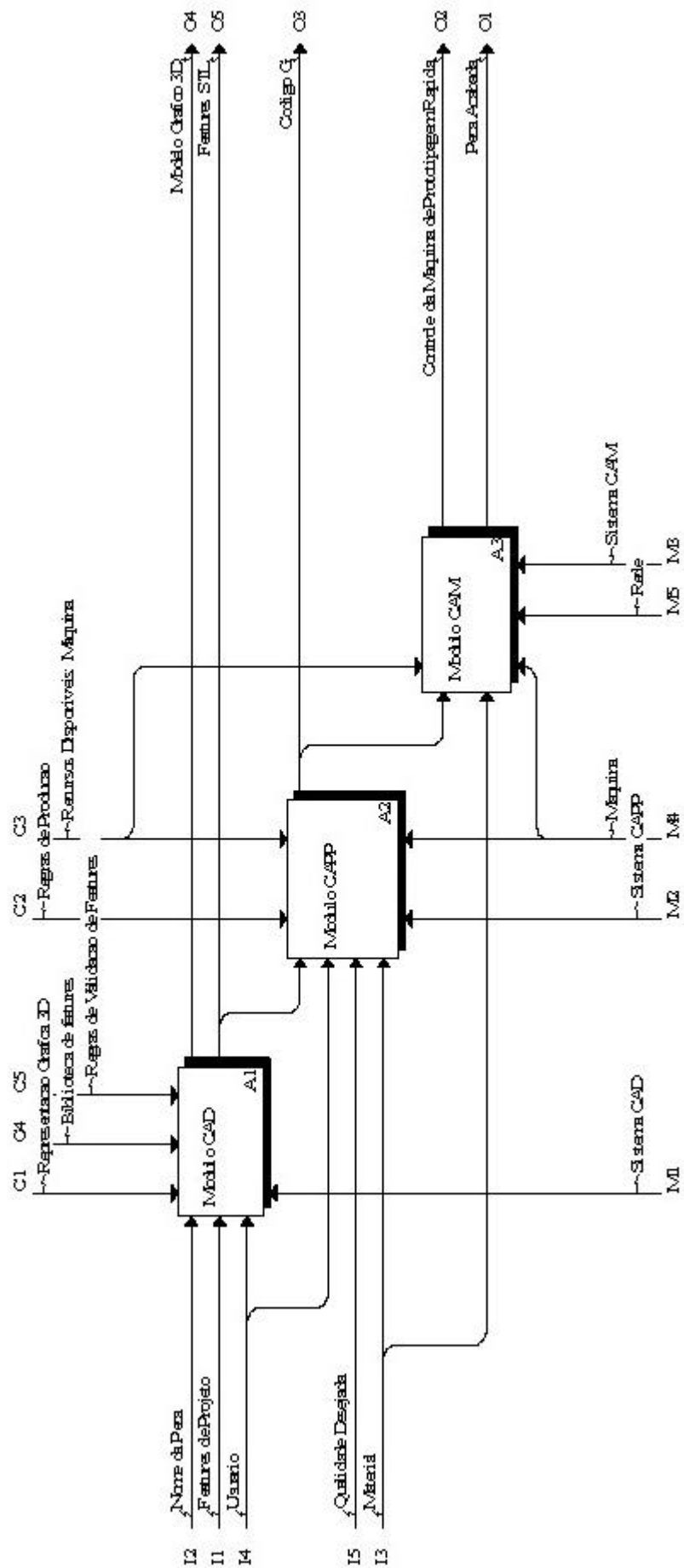


Figura 4.9: Diagrama IDEF0 sistema CAD/CAPP/CAM integrado, nível 1

O sistema CAD, na verdade, não é completamente executado por nenhuma das opções indicadas na matriz morfológica. A criação do desenho deve ser feita a parte, em um software especializado na função, e então salvo no formato aceito pela tecnologia (STL), como indicam as figuras 4.10 e 4.11.

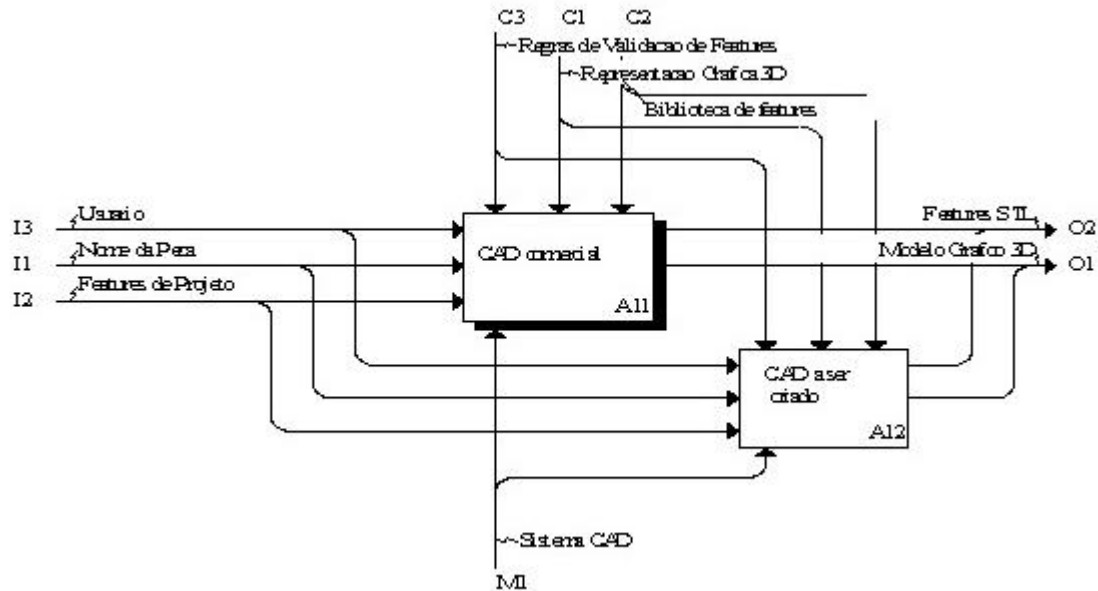


Figura 4.10: Diagrama IDEF0 da atividade CAD

O modelo IDEF0 também sugere a criação de um sistema CAD para tornar o software mais completo, uma vez que atualmente eles limitam-se a manipular a posição da peça na mesa de trabalho ou sua orientação. Dentre os programas citados, o RepSnapper e o RepRap Host destacam-se por permitir a inserção de múltiplas peças simultaneamente, mas o ReplicatorG é o que oferece a melhor interface para essas funções. No entanto, até o momento da finalização deste trabalho ainda havia compatibilidade muito limitada do firmware da RepRap com o ReplicatorG, desenvolvido inicialmente para uso com a MakerBot.

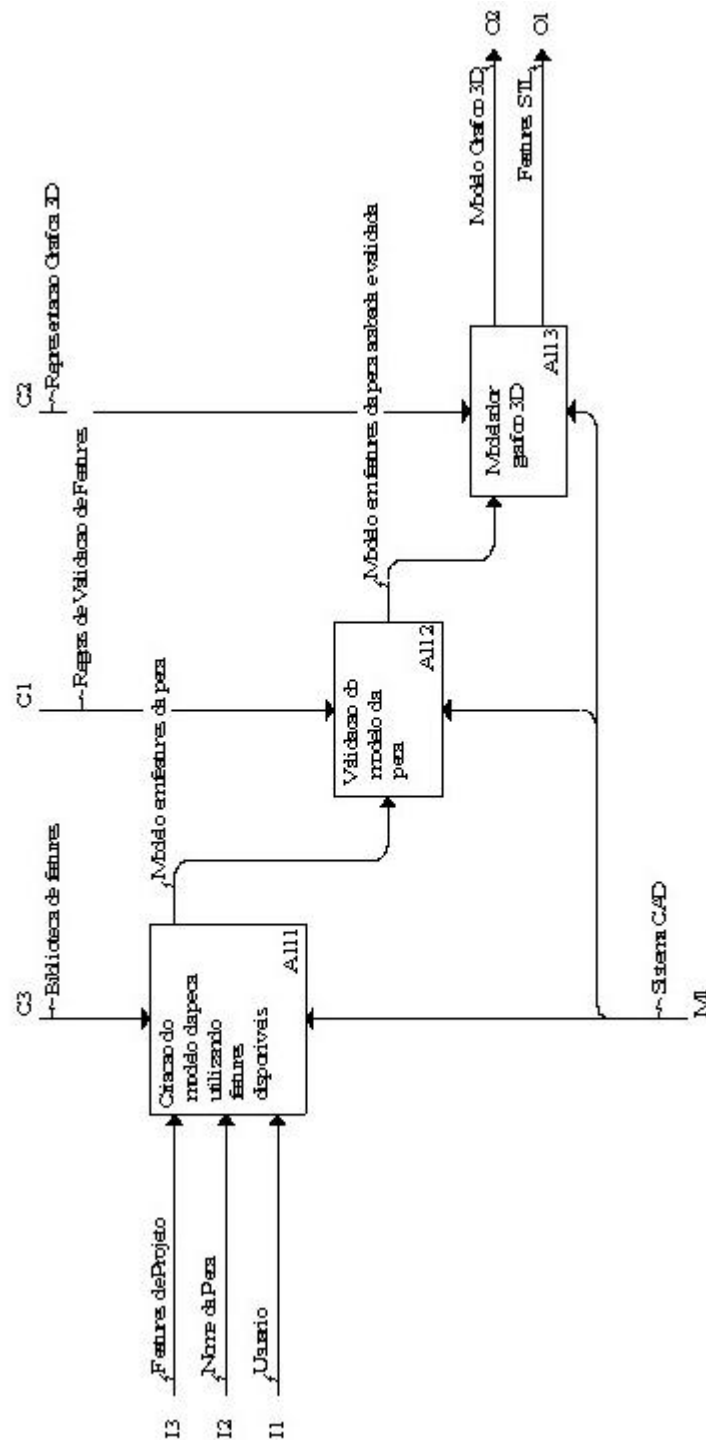


Figura 4.11: Diagram IDEF0 de CAD comercial

A figura 4.12 mostra as atividades do módulo CAPP. O mapeamento de features (figura 4.13) corresponde a uma etapa inicial do pré-processamento, cujas saídas são a espessura (altura) e a largura da extrusão. Essas escolhas determinam as fatias geradas pelo slicing. A definição da operação de adição (figura 4.14) corresponde à escolha da máquina, que está associada a uma das tecnologias de RP (no caso, FDM). As atividades de estratégia de movimentação (explicitadas na figura 4.15) são as mais importantes do sistema, e estão destrinchadas nas figuras seguintes.

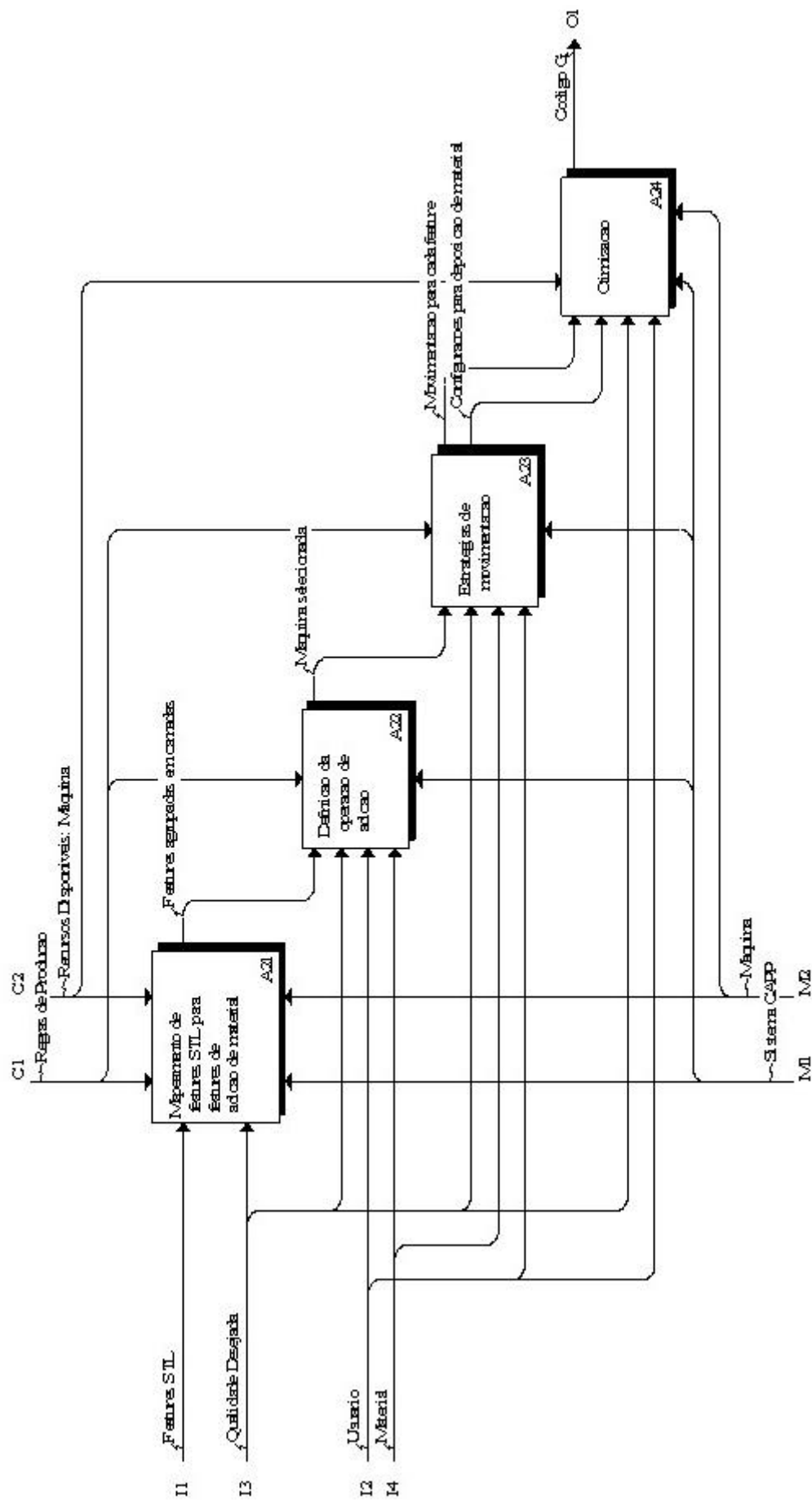


Figura 4.12: Diagrama IDEF0 das atividades do módulo CAPP

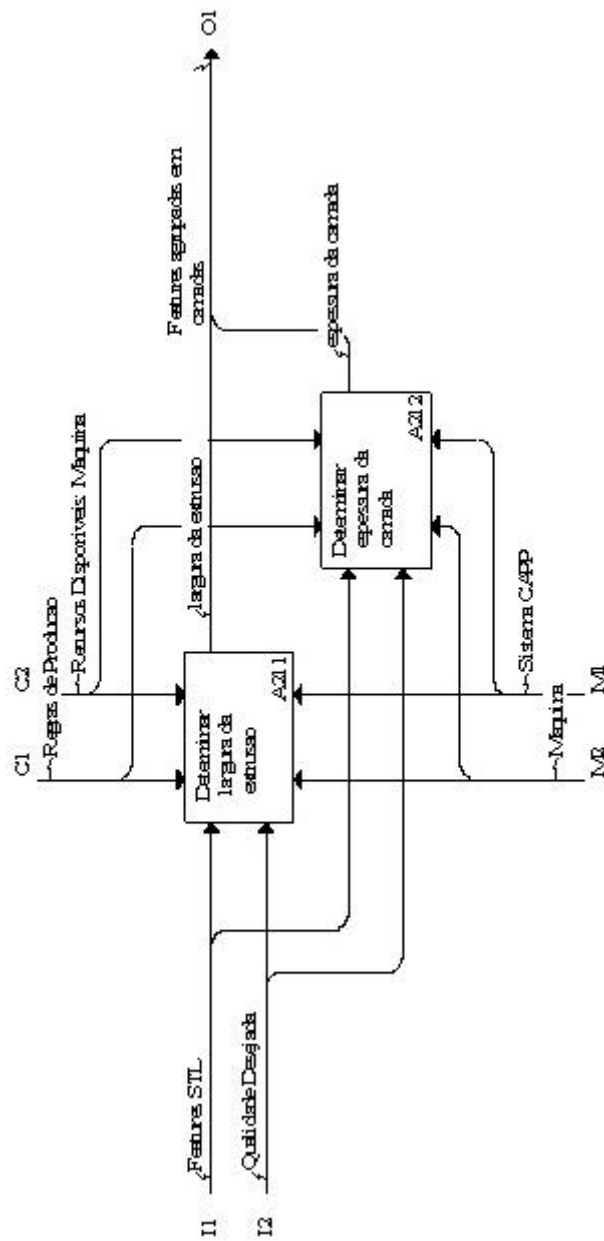


Figura 4.13: Diagrama da atividade de Mapeamento de features STL

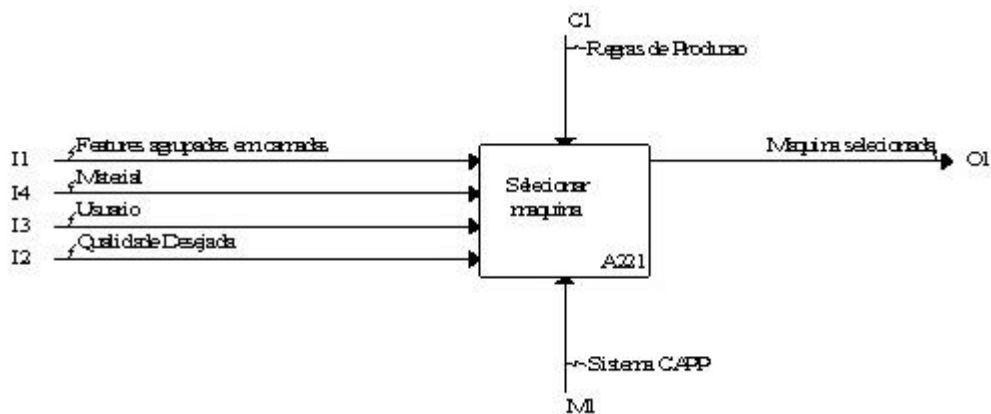


Figura 4.14: Diagrama da atividade de Definição da operação de adição

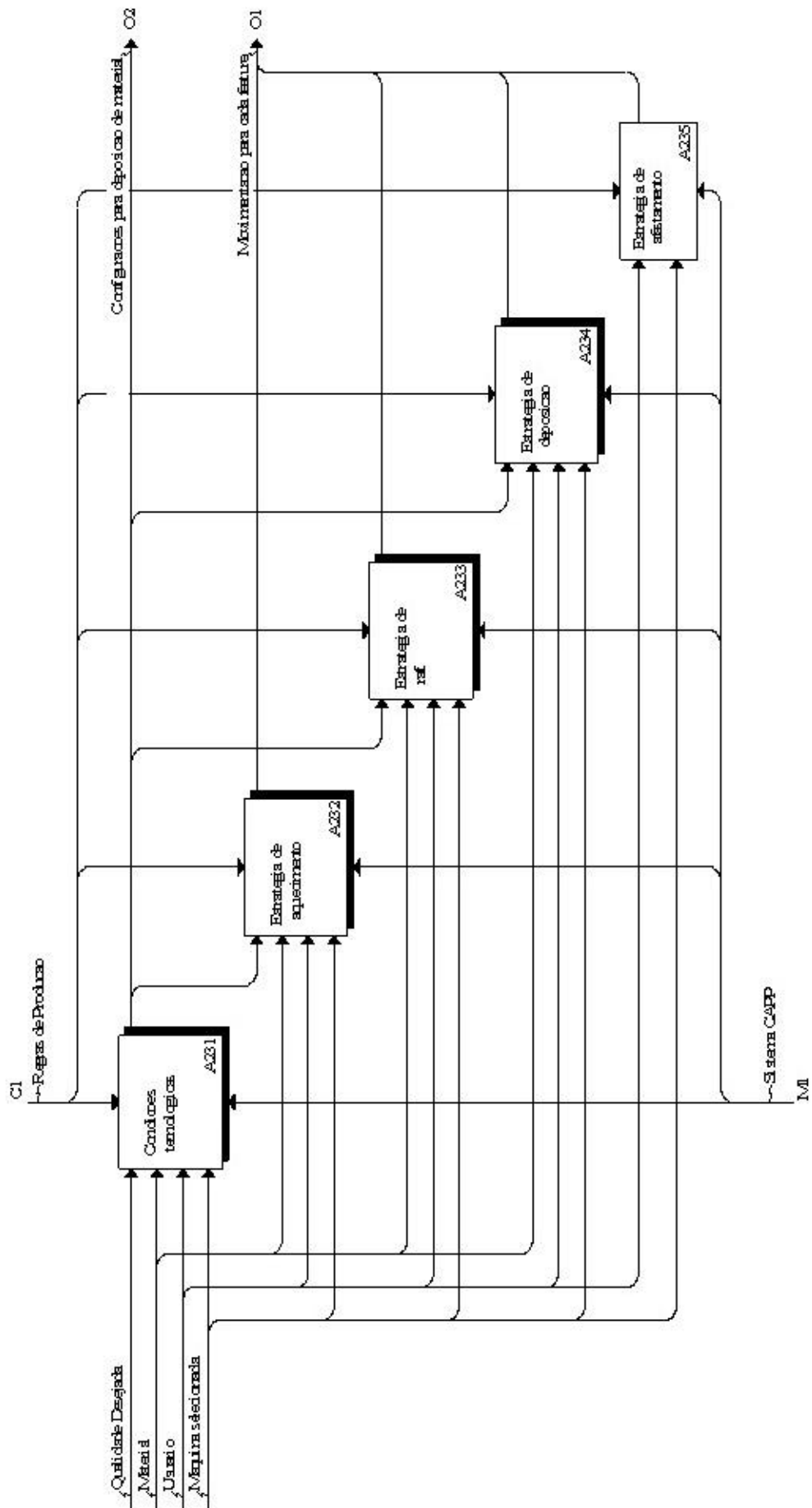


Figura 4.15: Diagrama das Estratégias de movimentação

As condições tecnológicas, figura 4.16, consistem na determinação de parâmetros críticos do processo FDM: temperatura e velocidade de extrusão do termoplástico, raft (suporte construído de apoio para a base da peça), refrigeração (acionamento de ventiladores ou outros dispositivos para redução de temperatura) e escolha da temperatura da mesa de trabalho (ou ambiente em que a máquina está inserida, se houver controle).

A figura 4.17 mostra o esquema das estratégias de aquecimento do material. Primeiramente, deve-se posicionar a extrusora em um plano de segurança, em seguida aquecer e então extrudar um comprimento do material para teste. Este é um procedimento importante antes de iniciar uma fabricação para verificar se a extrusora funciona bem, a temperatura mais adequada e para efetuar a calibração.

A figura 4.18 descreve as principais características do raft. Essa estrutura pode ser feita do mesmo material que se constrói a peça – o que torna sua remoção razoavelmente trabalhosa – e é indispensável para máquinas que não possuem um ambiente ou mesa aquecidos, pois facilita a adesão das primeiras camadas depositadas e evita o efeito de empenamento, que ocorre quando as camadas inferiores começam a descolar da mesa de trabalho – mais notavelmente com plástico ABS. Isso é alcançado por causa da velocidade reduzida com que ele é depositado, oferecendo uma maior superfície de contato. O raft também ajuda a diminuir a influência de imperfeições da mesa na peça.

No diagrama 4.19 constam atividades de estratégia de deposição. A velocidade de movimentação da mesa é um dos parâmetros mais influentes no processo, pois afeta a quantidade de plástico depositado. Quando se percebe vazios entre os fios depositados, normalmente é possível corrigir o problema diminuindo a velocidade, e vice-versa.

Para a atividade de otimização, figura 4.20, é interessante modificar a densidade do objeto. Uma densidade baixa oferece economia mas também reduz a resistência da peça, e uma densidade alta toma muito tempo e pode exigir uma máquina bem calibrada. A densidade também influencia no efeito de empenamento.

Os softwares de controle da RepRap permitem a escolha dessas características em maior ou menor nível de personalização. O skeinforge (utilizado pelo ReplicatorG) é o gerador de código mais eficiente, graças ao seu alto grau de detalhamento das estratégias de movimentação.



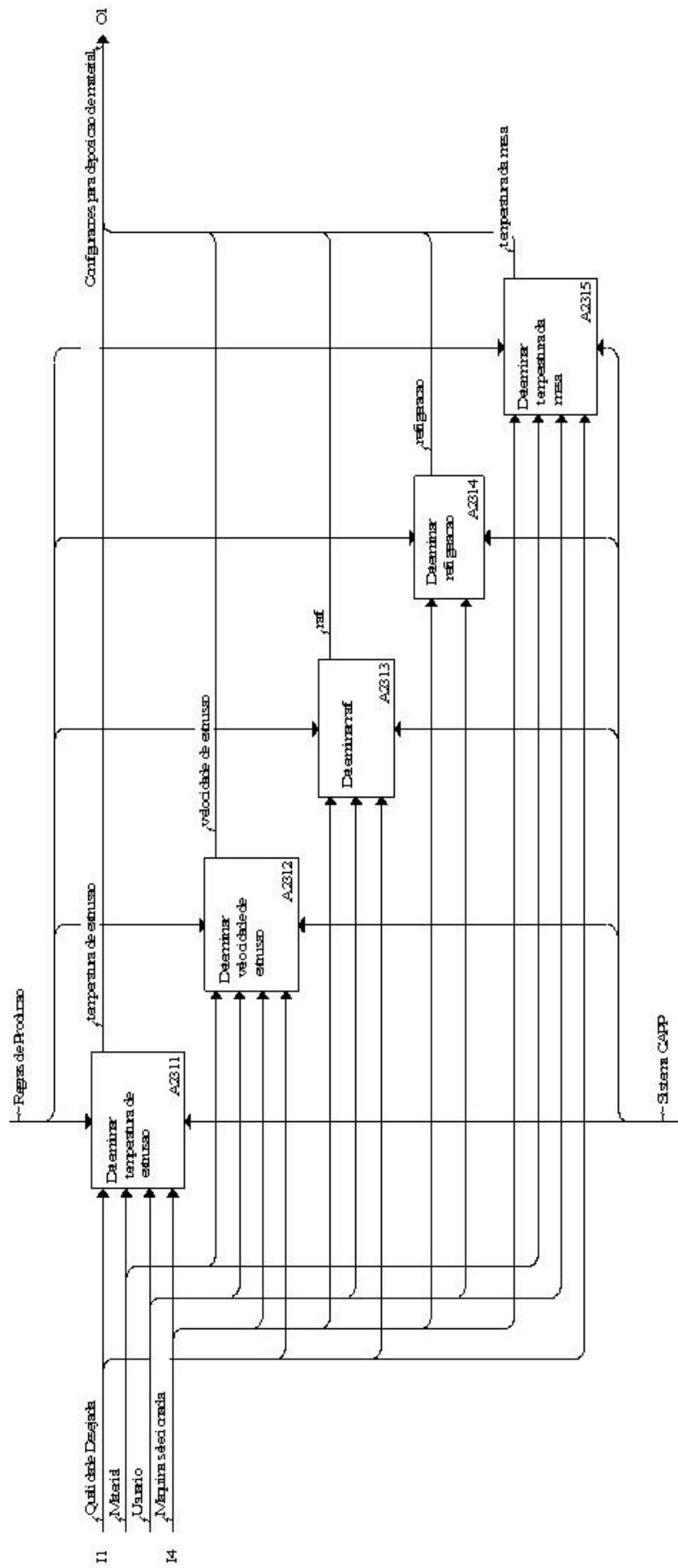


Figura 4.16: Diagrama das Condições tecnológicas

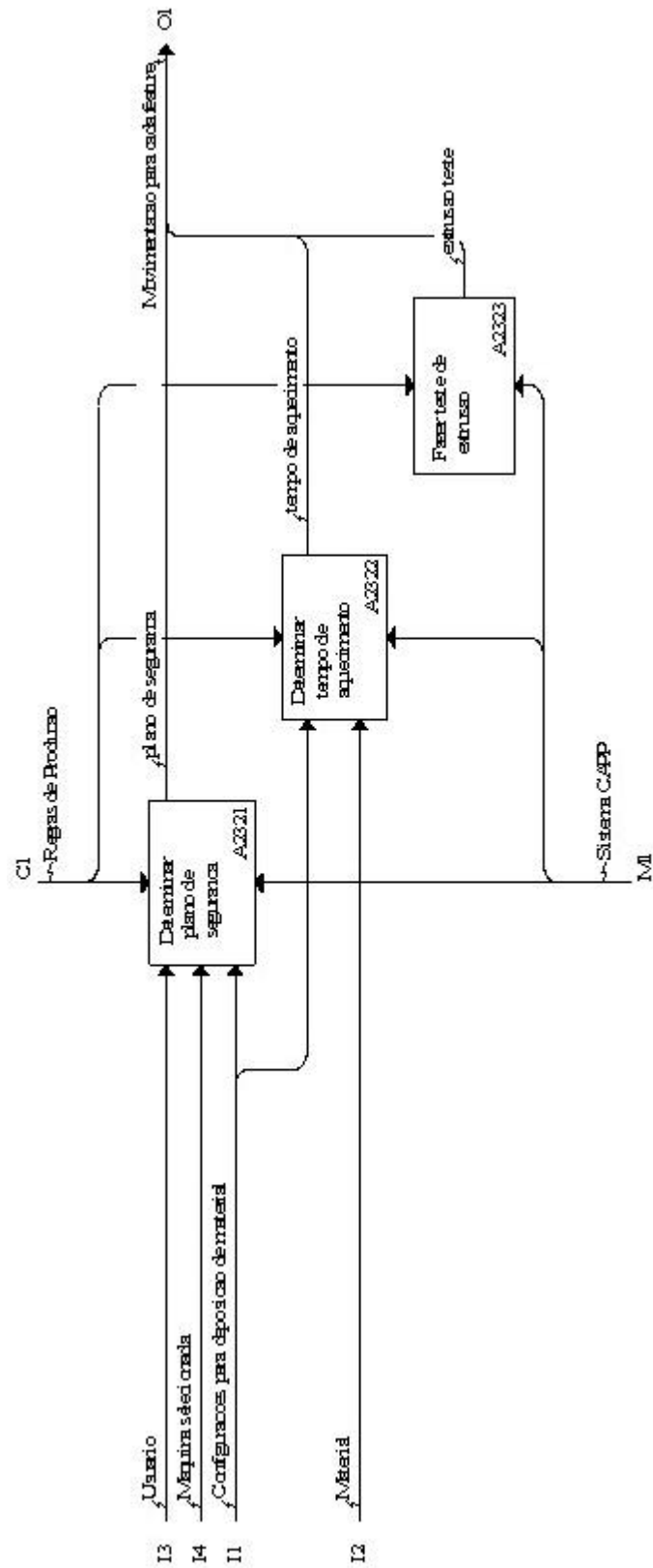


Figura 4.17: Diagrama das Estratégias de aquecimento

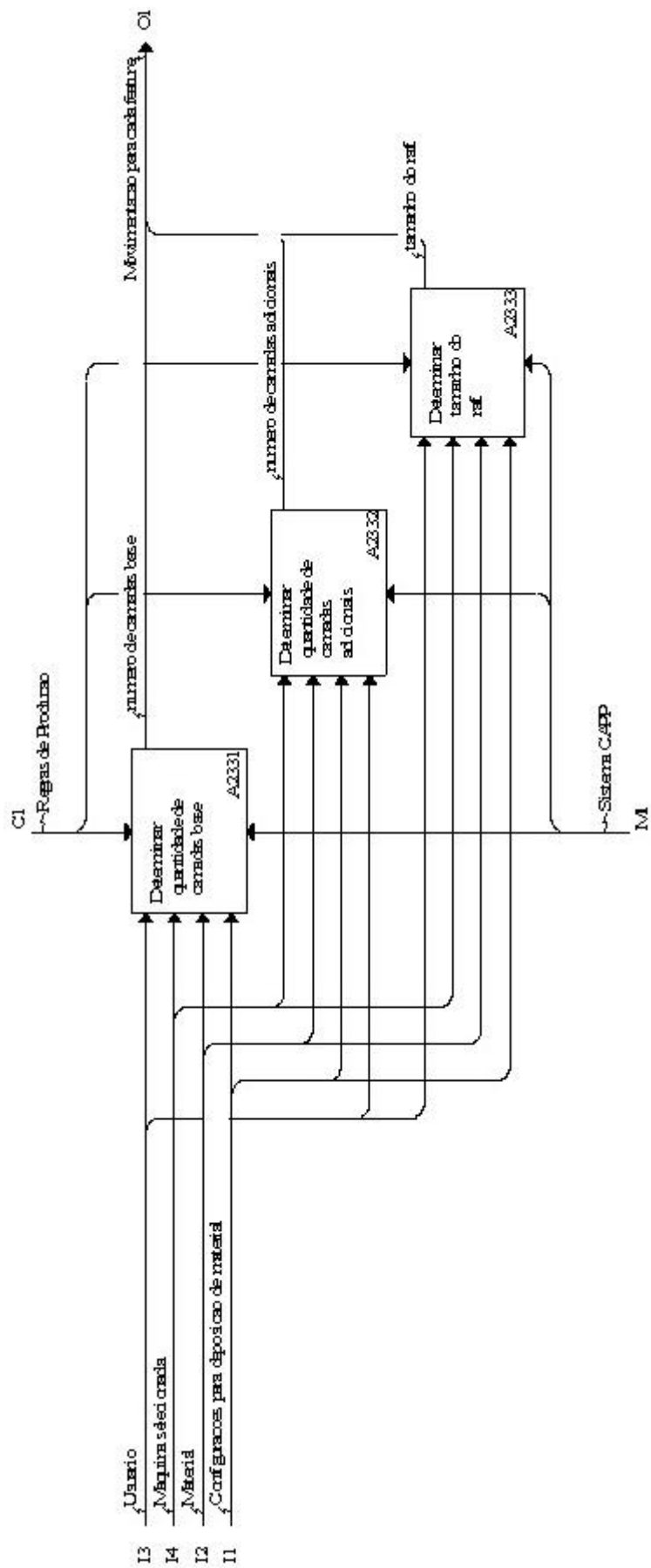


Figura 4.18: Diagrama das Estratégias de raft

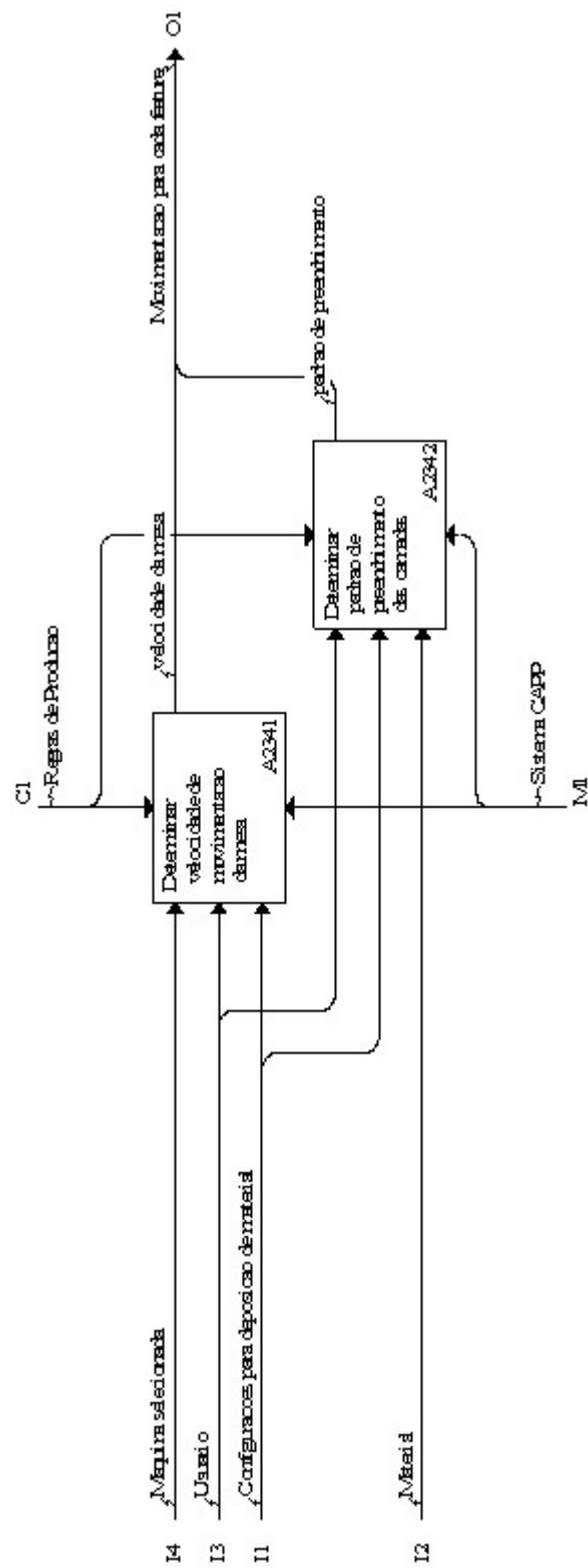


Figura 4.19: Diagrama das Estratégias de deposição

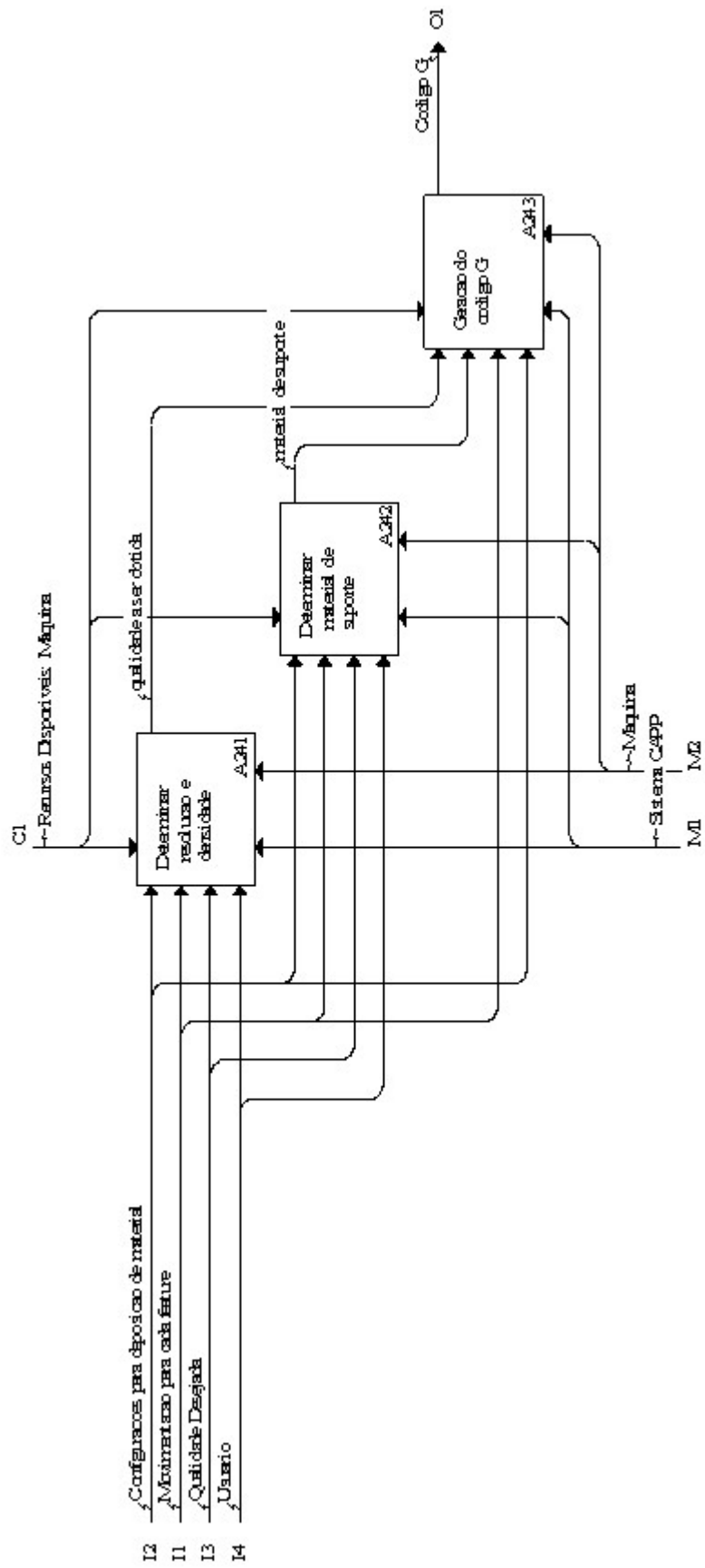


Figura 4.20: Diagrama IDEF0 das atividades de Otimização

Para encerrar o modelo, a figura 4.21 ilustra as atividades do módulo CAM, associadas ao controle da máquina de RP. Dos softwares testados, o RepSnapper foi o que apresentou o melhor controle, sem ocorrência de bugs durante o uso, mas o ReplicatorG tem muito potencial quando for corrigida sua compatibilidade com o firmware da RepRap.

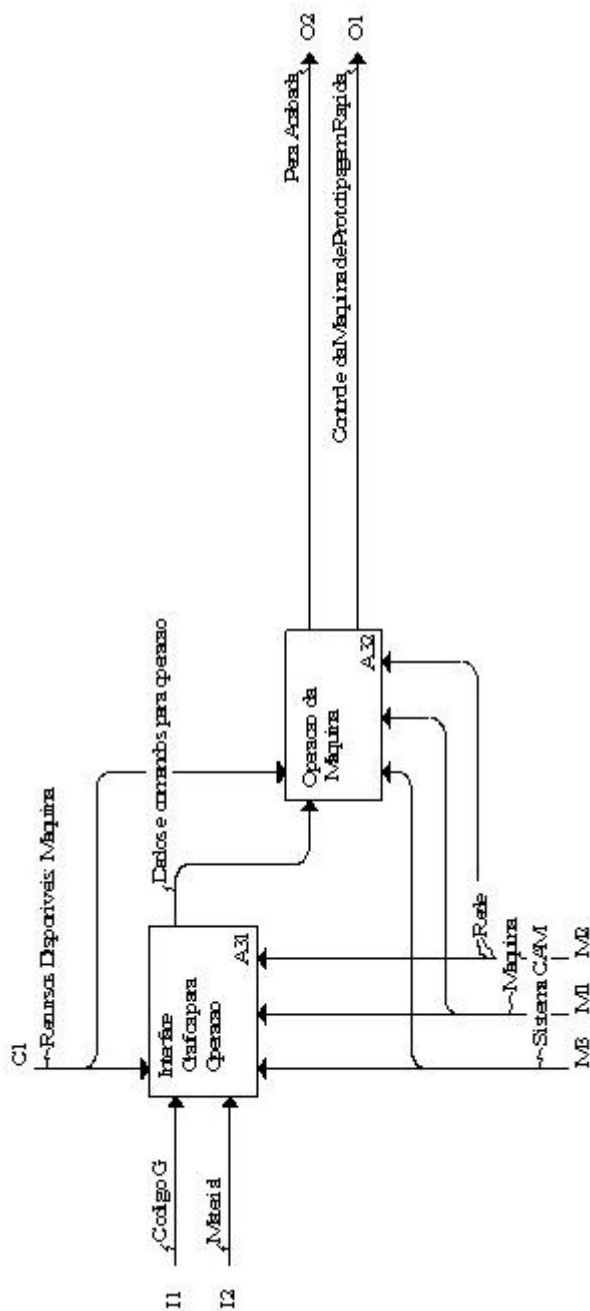


Figura 4.21: Diagrama IDEF0 das atividades do módulo CAM

Diante dessas razões, optou-se por utilizar o Skeinforge para gerar o código G e carregá-lo no RepSnapper para controle da máquina e fabricação das peças.

#### **4.4.2 Fonte de potência**

Um requisito de baixo custo foi determinante para a escolha da fonte de potência. Como todas as placas de controle operam com 12V de alimentação (padrão Arduino), uma fonte ATX de 400W supre adequadamente essa necessidade. Além disso, essas fontes são confiáveis, baratas e imediatamente disponíveis no laboratório, extraídas de computadores antigos.

A mesa aquecida também foi projetada para operar com essa tensão, porém foi constatado mais tarde que seria preciso aumentá-la, e para isso utilizou-se uma fonte controlada disponível no laboratório.

#### **4.4.3 Controle**

O controle da RepRap Mendel é feito por uma placa-mãe e outra placa ligada a ela que controla a extrusora, baseadas na arquitetura Arduino, e podem ser adquiridas prontas através de importação ou montadas do zero. Muitos componentes, no entanto, são difíceis de encontrar, e no final a economia é mínima, ainda mais levando em conta o tempo gasto.

Para a montagem de uma RepRap Mendel, são necessários: uma placa-mãe, uma controladora da extrusora, três placas adicionais para controlar os motores dos eixos e sensores de fim de curso (3 sensores para identificar a posição home e outros 3 opcionais para identificar limite). Normalmente, elas já vêm com o firmware instalado, caso contrário deve ser escolhido um dentre os disponíveis na internet e transmiti-lo usando a IDE do Arduino. O PID implementado nem sempre é o mais adequado, mas pequenos ajustes podem ser feitos para adaptar à máquina.

Para o controle de temperatura da extrusora, conecta-se um termistor ou um termopar à placa. Termistores são dispositivos que variam a resistência direta ou inversamente proporcionais à temperatura, permitindo a sua medição precisa. O tempo de resposta pode variar desde uma fração de segundos até minutos, dependendo do tamanho da massa detectora e da capacidade térmica do termistor. Termopares geram sua própria tensão, não requerem corrente de excitação (isso significa que não há erros por auto-aquecimento, que podem ocorrer com os anteriores). São simples, robustos, imunes a vibrações, fáceis de construir, operam em ampla faixa de valores. Por essas características, são amplamente usados em equipamentos industriais. Certamente as principais desvantagens são o baixo nível da saída (valores típicos estão na faixa de 50 mV), a não linearidade e a necessidade de compensação da temperatura da junção de referência. Com níveis tão baixos de tensão, cuidados devem ser tomados para evitar ação de interferências.

Na tabela 4.1, é citado também o termostato, instrumento que tem a função de impedir que a temperatura de determinado sistema varie além de certos limites preestabelecidos por um elemento sensor. O termostato é encontrado, por exemplo, em ferros de passar roupa. Por incrível que pareça, esse tipo de equipamento é utilizado por donos de máquinas de RP caseiras para aquecer a mesa de trabalho. Improvisações assim são muito comuns, e até o próprio Adrian Bowyer já utilizou um secador de cabelo para elevar a temperatura do ambiente de sua máquina.

Neste projeto, serão utilizados termistores NTC (coeficiente de temperatura negativo – resistência diminui com o aumento de temperatura), por serem uma solução simples, que não exige circuitos adicionais, e já são amplamente testados e documentados para uso com a RepRap e MakerBot.

O elemento que realiza o aquecimento propriamente dito normalmente é composto por um bloco metálico (usualmente alumínio, pela facilidade de usinagem, baixo custo e características termodinâmicas) com uma resistência no seu interior, pela qual passa uma corrente que provoca o aquecimento. Na extrusora, esse bloco deve ser posicionado o mais próximo possível do bico, para que o aquecimento ocorra no local mais adequado, e o termistor é fixado nas imediações. Para o aquecimento da mesa, utiliza-se blocos como este na sua parte inferior formando um circuito em série, e o termistor no centro. Como a máquina é feita com o mesmo termoplástico extrudado, geralmente utiliza-se um elemento de PTFE – politetrafluoretileno, mais conhecido como teflon (nome comercial) – na extrusora para isolar o calor, e uma camada de spray de espuma expansiva na parte debaixo da mesa.

Para o controle dos eixos de movimentação, vários motores elétricos podem ser aplicados em máquinas CNC e RP, que exigem alta performance e precisão. Entre eles, os motores de passo e os servomotores se destacam. A principal vantagem no uso de motores de passo reside no fato de serem mais econômicos e fáceis de controlar, bastando dimensioná-los para a carga exigida.

O motor de passo é um dispositivo síncrono muito usado em produtos mecatrônicos caracterizado pela capacidade de gerar força e velocidade através de sinais elétricos em suas bobinas. Diferente de um motor DC, que rotaciona quando uma tensão fixa é aplicada, a todo impulso na alimentação corresponde um avanço angular elementar constante, dito passo, e a sucessão de impulsos a uma determinada frequência permite impor uma velocidade de movimento constante. Os motores DC são mais fáceis de usar, porém precisam de um mecanismo externo (encoder) e uma ponte H para conseguir velocidade e direção variável.



A Mendel utiliza motores de passo bipolares com ângulo de passo de  $1,8^\circ$  (200 passos por revolução), que garantem torque e precisão, inclusive para a extrusora. A MakerBot inicialmente comercializava suas máquinas com motores DC na extrusora, mas atualmente a maioria dos usuários está migrando para os motores de passo em busca de maior qualidade de impressão.

A transmissão do movimento é feita através de polias acopladas à extremidade do motor, nas quais se encaixam correias presas à estrutura que desliza pelas barras que compõem os eixos. Na extrusora, a polia empurra diretamente o filamento de plástico em direção ao bico aquecido.

A movimentação no eixo X é feita locomovendo a extrusora nessa direção. Ela é montada em eixos que se acoplam nas extremidades em barras roscadas que vêm a compor o eixo Z, que movimenta essa estrutura no sentido vertical. A movimentação no eixo Y é realizada pela locomoção da mesa nessa direção.

#### 4.4.4 Extrusora

A extrusora é um dos componentes mais importantes de toda a máquina, a começar pela qualidade do bico, que determina qual será a precisão máxima que uma camada pode ter. A velocidade de deposição também está associada à sua construção, as engrenagens utilizadas, o trator que empurra o filamento e a própria configuração do motor. Apenas soluções mais sofisticadas da extrusora oferecem a capacidade de inserir material de suporte diferente do material de construção. Esse uso ainda não é muito frequente entre os usuários da RepRap e não foi feito um estudo nesse sentido.

O modelo original da Mendel, como visto na figura 4.22, era bem simples. Um fio de níquel-cromo era enrolado em torno do bico para gerar o aquecimento, isolado por um bloco de PTFE. A solução de níquel-cromo caiu em desuso pelas dificuldades de conexão e piores desempenhos no controle do aquecimento quando comparada com a resistência dentro do bloco de alumínio. A própria polia do motor empurrava diretamente o filamento para baixo, pressionado contra um rolamento.

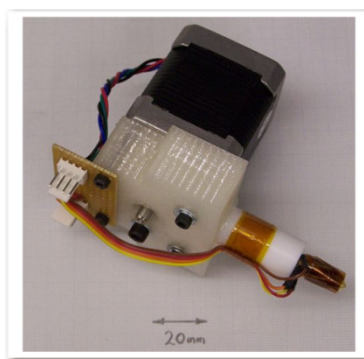


Figura 4.22: Extrusora Mendel.

Esse projeto tornou-se obsoleto e foi substituído por uma estrutura mais resistente, que utiliza o bloco de aquecimento e engrenagens no motor (figura 4.23). As engrenagens possuem uma proporção de 59:11, o que significa menos necessidade de corrente; os números primos de dentes resultam em menor desgaste. Dentre outras melhorias, esse projeto permite trabalhar com maiores velocidades de extrusão, levando a menores tempos de fabricação.

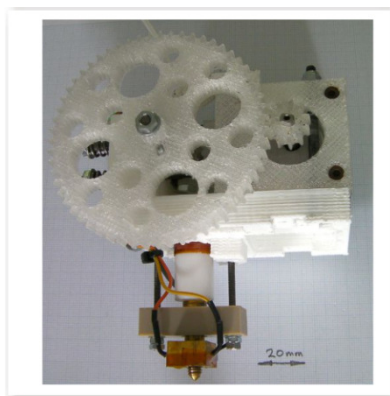


Figura 4.23: Extrusora Adrian.

Esses projetos estão em constante evolução, e um modelo ainda mais robusto, barato e fácil de fazer que surgiu depois foi a extrusora Wade (figura 4.24). Ela dispensa o uso de ferramentas caras e complexas e sua montagem é muito simples, mantendo o alto desempenho e qualidade. Por essas características que se encaixam nos requisitos do projeto foi a opção escolhida para a construção do protótipo.

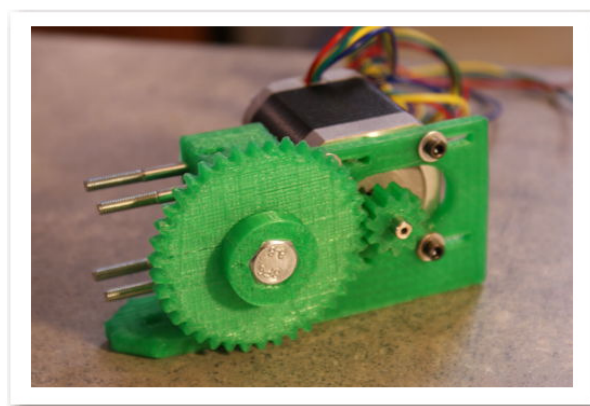


Figura 4.24: Extrusora Wade.

#### 4.5.5 Estrutura

O conjunto estrutural não faz parte da estrutura funcional do produto, mas a sua presença é indispensável na agregação dos demais conjuntos do sistema. A estrutura da máquina segue a filosofia do projeto e é feita a partir de componentes produzidos em outras máquinas de prototipagem rápida, nomeadamente MakerBot Cupcake CNC e Stratasys uPrint Plus.

O uso da MakerBot também ajudou a familiarizar-se com a tecnologia empregada na RepRap, mas peças mais complexas tiveram que ser fabricadas na Stratasys. Apenas elementos de fixação, como porcas e parafusos, e outros como eixos, barras roscadas e rolamentos, fogem à regra. Quando não há uma máquina de RP à disposição, é possível fabricar essas peças com metais ou madeira também. Para a construção da mesa de trabalho, inicialmente planejou-se uma sem estratégia de aquecimento, mas já com previsão de posterior implementação devido à experiência com a mesa aquecida da MakerBot, que mostrou significativo ganho em qualidade

#### 4.5.6 Análise das alternativas

Após a análise comparativa de todas as concepções, utiliza-se a matriz de Pugh (1991) para confrontar os critérios associados ao QFD com as combinações possíveis. Esse método fornece uma maneira de medir a capacidade das concepções de atender os critérios através de uma comparação relativa com uma referência. As combinações escolhidas encontram-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Alternativas de projeto.

<i>Função elementar</i>	<i>Alternativas</i>		
	<i>Variante 1</i>	<i>Variante 2</i>	<i>Variante 3</i>
1.1.Ler desenho	ReplicatorG	RepRap Host	RepSnapper
1.2.Processar algoritmo de fatiamento	Skeinforge		
1.3.Gerar código de máquina			
2.1.Acionar/ Interromper	Interruptor	Botão	Tomada
2.2.Transformar	Fonte ATX	Fonte de alimentação	Transformador
3.1.Controlar aquecimento	Termistor	Termopar	Termostato
3.2.Acionar aquecimento	Resistência encapsulada em alumínio	Filamento de NiCr	Trilhas de cobre (PCB)
3.3.Isolar aquecimento	PTFE (teflon)	Madeira	Poliuretano (espuma expansiva)
4.1.Controlar avanço	Motor de passo	Motor DC	Servomotor
4.3.Transmitir movimento	Correia e polia	Fuso de esferas recirculantes e guias lineares	Pinhão e cremalheira
4.4.Suportar carga			
5.3.Extrudar filamento de plástico	Extrusora Mendel	Extrusora Wade	Extrusora Adrian
5.4.Fixar camadas	Mesa de acrílico	Mesa aquecida coberta por fita	Mesa aquecida sob vidro

Os critérios de avaliação escolhidos são os requisitos de projeto e seus respectivos pesos (escores obtidos com o uso do QFD). Esses pesos trazem embutidos em seus valores as relações entre requisitos de clientes e requisitos de projeto, e assim os requisitos de projeto são valorados de modo imparcial. Uma concepção é escolhida de referência e todas as outras são comparadas a ela. Escolheu-se como referência a variante 1.

Para cada comparação com relação aos requisitos de projeto, a concepção avaliada é julgada como sendo “melhor que” (+), “mesmo que” (0) ou “pior que” (-) a referência. O total global é obtido pela diferença de escores negativos e positivos, calculando o produto de cada escore pelo peso. O resultado pode ser visualizado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Matriz de Pugh

Requisitos de projeto	Peso (QFD)	Concepções		
		1	2	3
Dimensões da máquina	3,3	0	-	0
Volume de trabalho	2,9	0	0	0
Potência de funcionamento	2,0	0	-	-
Operações de montagem	4,1	0	-	-
Peso da máquina	4,3	0	-	-
Erros de montagem	2,5	0	-	-
Interface simples para o usuário	3,3	0	-	0
Custo de aquisição da máquina	7,4	0	-	-
Custo de montagem	5,9	0	-	-
Custo do material de fabricação das peças	4,9	0	0	0
Erro de posicionamento dos eixos	5,6	0	-	+
Custo de manutenção	3,9	0	-	-
Vida útil	2,9	0	0	0
Frequência de manutenção e ocorrência de falhas	8,7	0	0	0
Compatibilidade com sistemas operacionais	1,0	0	0	0
Número de componentes padronizados	6,9	0	-	-
Arestas cortantes, fios e elementos quentes expostos	2,0	0	-	-
Nível de ruído	1,0	0	0	0
Velocidade dos eixos	3,5	0	+	+
Diâmetro do bico da extrusora	5,6	0	+	+
Espessura da camada produzida	4,9	0	+	+
Materiais de trabalho	1,0	0	0	0
Velocidade de extrusão	3,4	0	+	+
<b>Total (+)</b>		0	4	5
<b>Total (-)</b>		0	12	9
<b>Total global</b>		0	-8	-4
<b>TOTAL (com pesos)</b>		0	-33,8	-16

O escore total de cada concepção não foi considerado como sendo uma medida absoluta de superioridade ou inferioridade, e sim um indicativo de quais os pontos positivos e negativos de cada solução. A observação mais apurada de cada concepção e de seus pesos totais leva à criação de uma nova concepção, que combina todas as características positivas das concepções sob avaliação).

#### 4.4.7 Concepção escolhida

Identificados os princípios de solução para a geração do protótipo, discutidos durante a descrição das alternativas, o resultado é o desenho conceitual da figura 4.25 (retirado do site da RepRap). As peças verdes são os componentes prototipáveis, conectados por barras. Também estão representados os motores de passo, eixos, correias, e a posição das placas de controle. Este modelo é apenas um leiaute da concepção que irá prosseguir no processo de projeto, o que significa que ainda deverão ocorrer alterações na sua configuração.

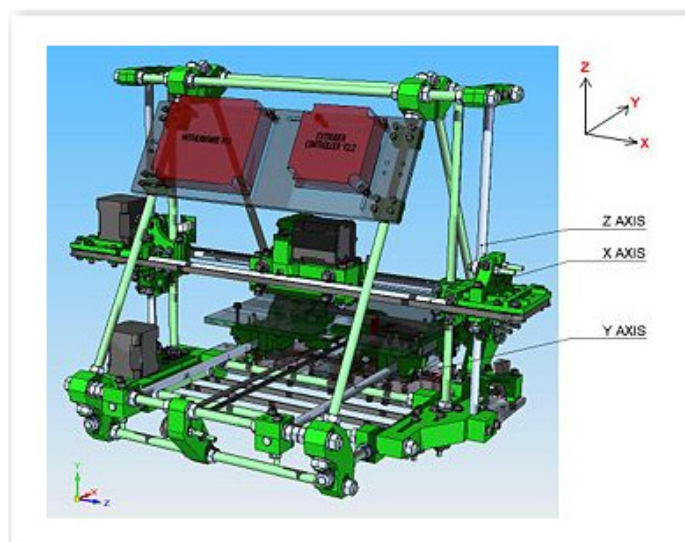


Figura 4.25: Desenho CAD 3D da RepRap Mendel.

Apesar do direcionamento para uma solução já definida, o objetivo deste capítulo foi converter o projeto informacional do produto, representado pela lista de especificações-meta, em outro nível de informações, o projeto conceitual. O produto adquiriu forma física, resultante da combinação de diferentes princípios gerados a partir da síntese funcional. Cada um apresenta as características mais interessantes de acordo com a avaliação de requisitos do projeto, e em seguida os esforços são direcionados para o seu dimensionamento físico, seleção de materiais e processos de fabricação.

Na próxima fase, há um aumento no nível de complexidade em virtude de se considerar todas as interações entre os elementos do sistema, e pequenos detalhes como restrições de espaço, materiais e processos podem acarretar em adaptações das soluções. O ideal seria o teste prático de mais soluções, porém o tempo disponível foi um limitante.

# 5 PROJETO DETALHADO

## 5.1 INTRODUÇÃO

Definida a solução conceitual para a RepRap Mendel, inicia-se o desenvolvimento do projeto detalhado. São definidas as formas e materiais adequados ao projeto, são confeccionados os desenhos e a documentação técnica do produto, sendo este o último passo de abstração antes da materialização da máquina. Este capítulo tem por objetivo finalizar todas as definições de especificações do produto e disponibilizá-la para futuras implementações. Serão utilizadas muitas terminologias em inglês criadas pelos desenvolvedores da RepRap para não destoar da bibliografia.

Procurou-se utilizar, sempre que possível, as proposições referentes ao projeto para manufatura e montagem (DFMA – Design for Manufacture and Assembly), disponíveis em Pahl e Beitz (1996). O uso das diretrizes de DFMA objetivou a redução dos custos inerentes aos processos de manufatura e montagem do produto. Como resultado, foram projetados componentes de fácil fabricação, com tolerâncias nas medidas que condizem com a qualidade oferecida por máquinas de RP caseiras, e necessitam de pouco trabalho de acabamento. Frequentemente os furos por onde passam parafusos e barras não atingem a dimensão desejada, então é recomendável abri-los o suficiente antes de iniciar a montagem, com uma furadeira por exemplo, para ter mais facilidade nos encaixes. A fixação desses elementos é feita com porcas e arruelas, então não precisam estar realmente apertados dentro da estrutura.

A utilização de componentes comumente encontrados no mercado contribui para a redução dos custos do projeto. Para os componentes não normalizados, foram selecionados os processos de fabricação e os materiais mais adequados à demanda do produto. Além do plástico (geralmente ABS e PLA), a estrutura é composta em sua maioria por aço, alumínio e borracha. Pelo fato do aço inoxidável ser muito mais caro que o comum, é importante atentar para a oxidação dos eixos e rolamentos, untando graxa em sua superfície para evitar problemas na movimentação.

No intuito de otimizar o trabalho a ser realizado, dividiu-se a máquina em conjuntos portadores de funções. Para identificá-los, recorreu-se à estrutura funcional do produto, e como resultado foram obtidos 5 conjuntos: eixos (X, Y e Z); eletrônica; estrutura; mesa; e extrusora. A introdução de cada um será feita pela ordem natural de construção.

## 5.2 EIXOS

Os eixos desenvolvem papéis bastante importantes no sistema em desenvolvimento. Além de serem responsáveis pela movimentação ao longo das suas respectivas direções, servem de suporte para outros conjuntos importantes, como a extrusora e a mesa. Cada um dos três será brevemente descrito para então visualizar os desenhos das peças e a lista de materiais.

### a) Eixo X

O eixo X (figura 5.1) é composto basicamente por 3 sub-conjuntos: motor bracket (suporte do motor) e idler bracket (suporte da polia de tensão) nas extremidades, e carriage (carruagem). Os dois primeiros são montados posteriormente nas barras do eixo Z para adquirir o suporte e movimentação da estrutura no sentido vertical. A carruagem serve de apoio para a extrusora, que no desenho da figura 5.1 é representada pelo modelo original da Mendel, apenas para facilitar a visualização.

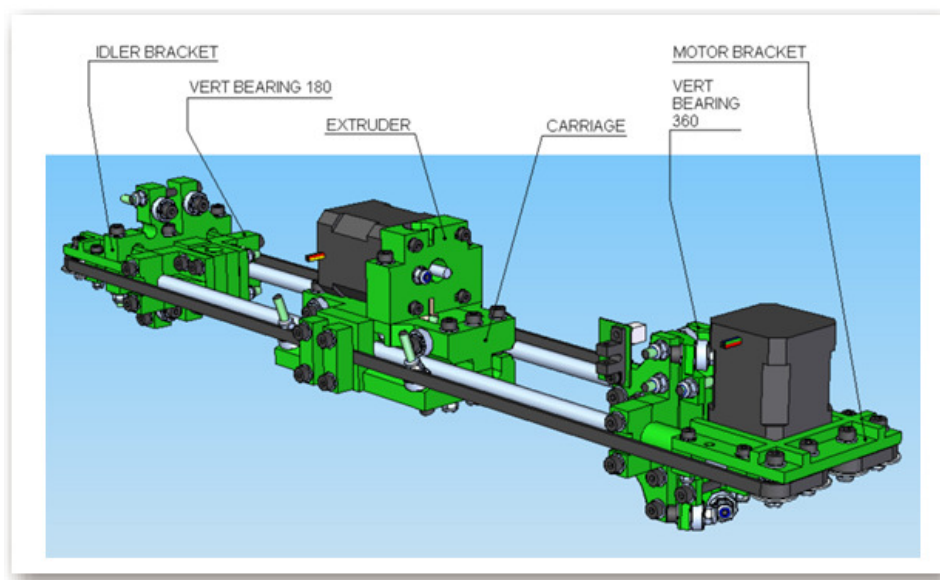


Figura 5.1: Conjunto do eixo X

A carruagem é apoiada por rolamentos nas duas barras que compõem o eixo X, e desliza por elas quando puxada pela correia a qual se prende. Esta correia é acoplada à polia do motor, montado na motor bracket, e fica tensionada em volta de toda a estrutura, apoiada em rolamentos nas extremidades. Os eixos da Mendel exigem oficialmente 13,7 N.cm de torque dos motores, e utiliza-se motores de passo NEMA 17 com 26 N.cm, então há bastante folga. Os rolamentos devem sempre conter arruelas dos dois lados para garantir uma circulação suave (figura 5.2). O uso de porcas de pressão (nylock) e arruelas reduz a probabilidade dos fixadores afrouxarem.

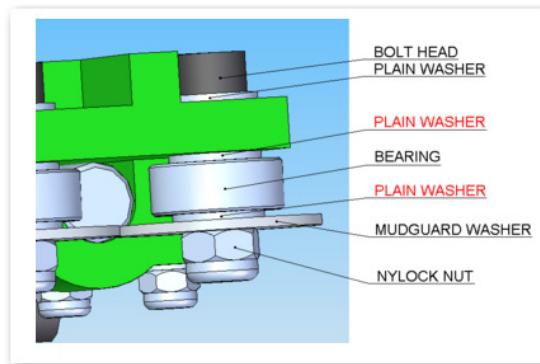


Figura 5.2: Montagem do rolamento

De uma extremidade a outra, a estrutura do eixo X tem cerca de 550mm, e as barras possuem um comprimento de 495mm. Elas devem ser perfeitamente retas e oferecer deslize suave. O material mais indicado é o aço, já que o alumínio certamente empena e se desgasta facilmente a medida que os rolamentos passam por ele.

A correia desse eixo tem um comprimento mínimo de 1300mm, mas não precisa ser exato porque ela pode ser cortada para o tamanho certo e presa pelas duas pontas à carruagem. A sua largura recomendada é de 5mm, mas dificilmente são encontradas com esse tamanho. Isso também não é problema, porque foi criado um dispositivo especialmente para a função de cortá-las na largura correta (figura 5.3). O passo e o perfil, porém, são parâmetros críticos. A correia deve ser compatível com dentes grossos e com o mesmo afastamento da polia, que é de 5mm (0,2"), melhor valor alcançável para impressão.

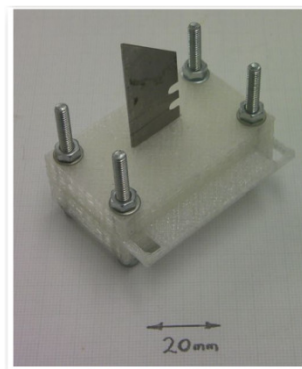


Figura 5.3: Dispositivo de corte da correia

Na figura 5.1 também é possível visualizar o posicionamento do sensor de fim de curso, na extremidade do suporte do motor. Esse sensor ótico é montado em um circuito bem simples (figura 5.4), contando com um LED que indica a interrupção do feixe de luz infra-vermelha. Uma chapa bem fina é fixada na extrusora que, ao atingir o limite mínimo de curso (definido como a extremidade do motor) interrompe o feixe. A espessura dela deve ser inferior a 2mm para passar com folga pelo sensor, o material deve ser opaco a luz infra-vermelha, não reflexível e fácil de curvar para obter a forma requerida. Alumínio é uma boa escolha.





Figura 5.4: Opto Endstop v2.1

## b) Eixo Z

O eixo Z está representado na figura 5.5, onde as barras vermelhas são eixos e as barras amarelas são barras roscadas. O esqueleto da RepRap é composto por várias barras roscadas, que conectam as peças de plástico em que se encaixam os componentes, e também mantêm a rigidez da máquina. As barras amarelas na vertical (330mm de comprimento) da figura 5.5, paralelas aos eixos, têm ainda a função de locomoção do eixo X, no qual estão enroscadas. As barras vermelhas apenas apóiam o deslizamento da estrutura do eixo X para cima ou para baixo, ajudando a manter o equilíbrio da altura dos dois lados, e ficam presas no topo da máquina juntando-se à estrutura. Também possuem 330mm de comprimento, e só parecem maiores na figura porque estão montadas um pouco mais acima na base. As barras horizontais estão mais ligadas à função do conjunto estrutural, e serão detalhadas nessa seção.

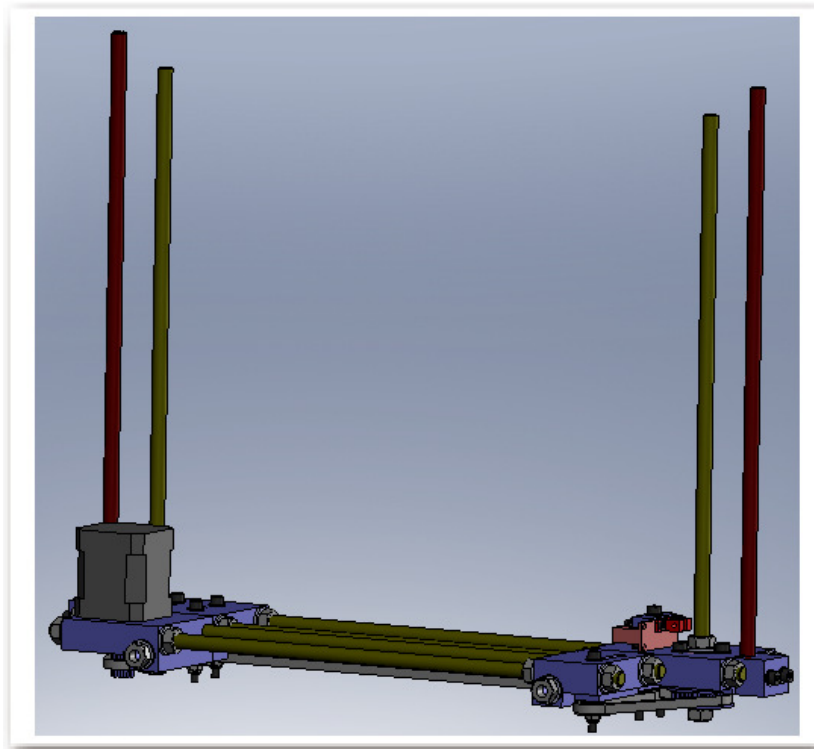


Figura 5.5: Conjunto do eixo Z

A correia, que se estende por baixo da máquina de um lado ao outro, está acoplada na polia do motor e nas duas polias que giram as barras. Essa rotação é permitida por rolamentos no interior de cada uma das duas bases por onde atravessam as barras. Diferente das outras correias, esta não pode ser cortada. Seu tamanho pode variar entre 960mm e 1008mm, e conta com um elemento de ajuste de tensão (a direita na figura 5.5).

Além desses componentes, também há o sensor de fim de curso do eixo Z (em vermelho na figura 5.5), que é montado em uma base ajustável, para se adequar à altura da mesa e o comprimento do bico da extrusora. A chapa que identifica esse limite mínimo é fixada no suporte do eixo X.

### c) Eixo Y

O eixo Y está representado na figura 5.6. A chapa transparente que forma o corpo do conjunto poderia ser feita de plástico como as demais peças, mas as suas dimensões são muito grandes para ser impressa em uma RepRap. O material deve ter uma espessura entre 4 e 6mm para garantir rigidez, e também é importante que seja bem plano. A pequena chapa montada sobre a maior fica exposta em um nível inferior à mesa e tem a função de recolher testes de extrusão (expurgo). A mesa é montada sobre essa estrutura, separada por espaçadores e parafusada nos quatro cantos.

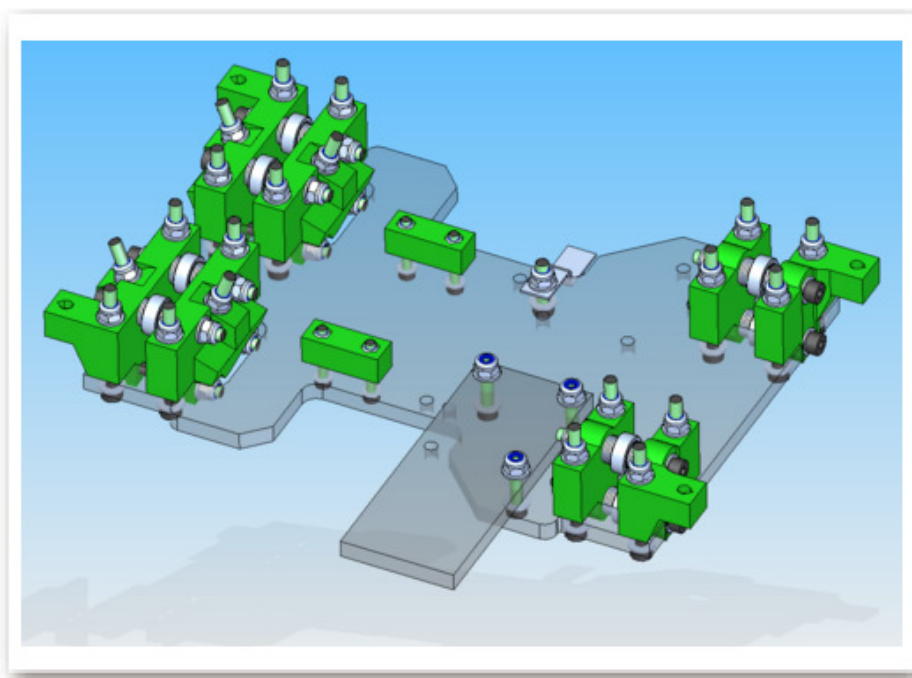


Figura 5.6: Conjunto do eixo Y

Não estão representados na figura 5.6 os dois eixos de 406mm, que se apóiam nos rolamentos. As peças em que eles se apóiam podem ser ajustadas com a adição ou remoção de arruelas de acordo com o encaixe final. A maioria desses ajustes é feito somente no final da montagem, quando todos os conjuntos estão reunidos.

As peças da máquina são projetadas para serem impressas em máquinas de RP, e por isso são disponibilizadas no site da RepRap diretamente no formato STL, além de outros formatos aceitos em softwares CAD 3D. Apenas recentemente alguns usuários tiveram a iniciativa de, a partir desses arquivos, gerar os desenhos técnicos das peças, por conta da necessidade de fabricá-las com métodos tradicionais quando uma impressora 3D não está disponível. O Anexo A contém os desenhos das peças dos eixos X, Y e Z.

### 5.3 ELETRÔNICA

Como já foi discutido anteriormente, é muito mais prático comprar as placas eletrônicas prontas do que fazê-las, poupando o tempo gasto para obter e soldar cada componente. Elas podem ser importadas de alguns fornecedores, infelizmente ainda não há fabricação delas no Brasil. Para construir uma Mendel, são necessárias as seguintes placas eletrônicas: 1 placa-mãe, 3 drivers de motores de passo, 3 placas de sensores óticos de fim de curso, 1 controladora de extrusora para cada extrusora instalada.

A figura 5.7 mostra os modelos das placas feitas para a MakerBot, que podem ser usadas na RepRap sem alterações de componentes, apenas com algumas conexões adaptadas. Algumas otimizações podem ser feitas para se adaptar aos requisitos da RepRap, como substituição dos conectores RJ45 – subutilizados pelo firmware da RepRap – por outros mais simples. Geralmente, essas placas já vêm com firmware instalado. No caso das placas compradas na loja da MakerBot, vêm com o firmware próprio para a máquina dela, que não funciona perfeitamente no hardware RepRap. O desenho das chapas em que as placas ficam montadas para serem anexadas ao conjunto estrutural está no Anexo A.

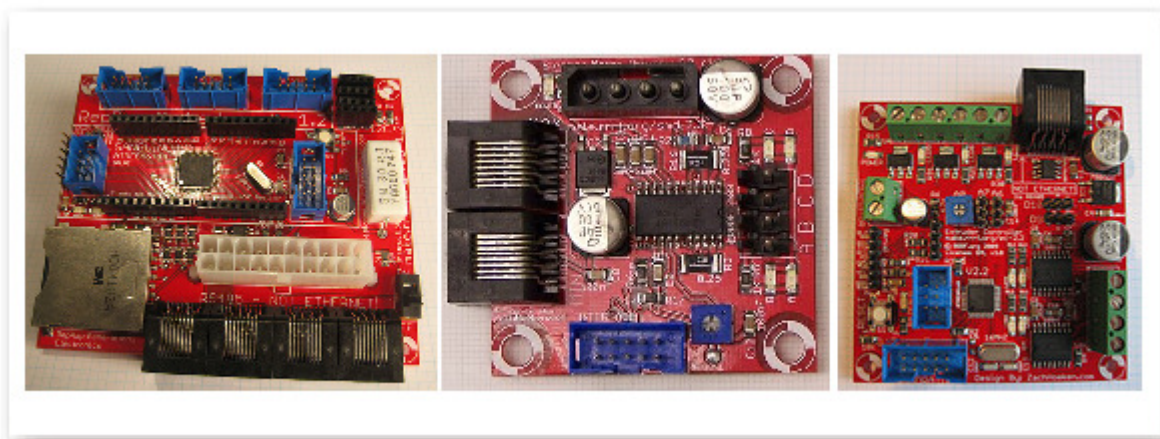


Figura 5.7: Da esquerda para a direita: Motherboard v1.2, Stepper Motor Driver v2.3 e Extruder Controller v2.2 (escalas diferentes) – Generation 3 Electronics

### 5.2.1 Firmware

Optou-se por utilizar o firmware desenvolvido pela RepRap para o protótipo, devido ao seu uso mais amplo e melhor documentação, mas existem diversos outros desenvolvidos pelos usuários, derivados dele e que prometem melhores performances e ajustes mais práticos. O firmware da RepRap é conhecido como FiveD. Esse nome foi dado porque ele trata a máquina como um sistema de cinco dimensões: os três eixos (X, Y e Z), o comprimento extrudado (E) e a taxa com que o bico se move sobre a superfície (F). Elas são controladas por um DDA (Analisador Diferencial Digital) penta-dimensional que automaticamente as sincroniza.

Isso significa que o comprimento de extrusão depositado sempre está correto, não importa quão rápido o bico se mova sobre a plataforma, e também que a máquina pode acelerar e desacelerar enquanto fabrica (já que a taxa de alimentação pode variar em um movimento). Com isso, os motores dos eixos podem funcionar com corrente muito menor sem sacrificar velocidade, porque usar alguns milímetros para acelerar até a velocidade (e reduzir dela) precisa de muito menos corrente do que alcançá-la no primeiro passo. Esse firmware também armazena os movimentos enfileirados, não havendo pausa entre um movimento e o próximo, tornando a fabricação mais suave. A sua implementação foi feita para o hardware baseada na placa Sanguino, uma versão mais poderosa do Arduino que possui mais memória.

A interface de programação é a mesma do Arduino, e uma vez baixado o código os arquivos que o usuário pode querer configurar são `ThermistorTable.h` (contém as tabelas de configuração dos termistores utilizados na extrusora e na mesa aquecida) e `configuration.h` (contém vários parâmetros configuráveis que determinam o comportamento da máquina, como a velocidade dos motores). A controladora da extrusora possui seu próprio código separado, implementado para hardware do Arduino convencional, e funciona como escravo da placa-mãe. Ele também possui um arquivo `configuration.h` com alguns parâmetros que podem ser ajustados para alguns casos específicos.

O Anexo B apresenta o arquivo de configuração utilizado na placa-mãe com os valores ajustados para o protótipo construído. A maioria dos valores definidos é mantido como está, mas alguns são de muito interesse. Estes são, pela ordem em que aparecem:

#### a) **ENDSTOPS\_MIN\_ENABLED e ENDSTOPS\_MAX\_ENABLED**

Ativam e desativam a utilização de sensores de fim de curso para os limites mínimos e máximos de curso dos eixos. Os sensores de mínimo vêm ativados por padrão, mas é preferível desativá-los nos testes iniciais para reduzir a variedade de erros.

## b) X\_STEPS\_PER\_MM, Y\_STEPS\_PER\_MM e Z\_STEPS\_PER\_MM

Número de passos necessários para o motor mover a máquina em 1mm no respectivo eixo. O valor padrão normalmente vem bem perto do ideal, se a máquina tiver sido construída com as engrenagens especificadas. Para calibrar, um método bom é enviar um comando para a RepRap mover-se 50mm (distância percorrida esperada) nas várias direções, medir a distância percorrida ( $d$  – distância percorrida real) e multiplicar o valor apropriado de STEPS\_PER\_MM por  $50/d$ . O desenvolvimento da equação 5.1 descreve a teoria desse processo.

$$\frac{STEPS_{PERMM_{esperado}}}{STEPS_{PERMM_{real}}} = \frac{DistânciaPercorrida_{esperada}}{DistânciaPercorrida_{real}}$$
$$STEPS\_PER\_MM_{esperado} = STEPS\_PER\_MM_{real} \times \frac{DistânciaPercorrida_{esperada}}{DistânciaPercorrida_{real}} \quad (5.1)$$

## c) INVERT\_X\_DIR, INVERT\_Y\_DIR e INVERT\_Z\_DIR

Invertem o sentido de crescimento do eixo. Normalmente esses valores são modificados se os sensores de fim de curso forem posicionados no outro extremo do eixo.

## d) E\_STEPS\_PER\_MM

De forma análoga aos eixos, define quantos passos o motor da extrusora deve dar para produzir 1mm de filamento. Esse é o parâmetro mais complicado de resolver, pois mesmo encontrando valores de outros usuários que possuem o mesmo modelo de extrusora e razão entre engrenagens, sempre há peculiaridades na montagem que interferem no torque do motor, alterando a velocidade necessária.

O processo empírico de calibração é similar ao dos eixos: se sair mais plástico do que o esperado, reduz-se o valor, e se sair menos, aumenta-se. A maioria dos métodos de calibração calculada não funciona perfeitamente, principalmente porque são feitas suposições para simplificar o modelo que não correspondem à realidade. Por exemplo, alguns plásticos como o ABS não apresentam uma relação 1:1 entre o volume de plástico entrando e o volume saindo da extrusora. A equação 5.2 sugere um método que produz resultados bem próximos do ideal.

$$PassosPorVolta_{trator} = PassosPorVolta_{motor} \times \frac{DentesEngMaior}{DentesEngMenor}$$
$$PassoPorMM_{ent} = \frac{PassosPorVolta_{trator}}{\pi D_{trator}}; Razaovolume/mm = \frac{(raiofilamento)^2}{(raiosaida)^2}$$
$$E_{STEPS\_PER\_MM} = \frac{PassoPorMM_{ent}}{Razaovolume/mm} \quad (5.2)$$

## e) ACCELERATION\_ON

Há uma linha definindo ACCELERATION\_ON que vem comentada por padrão. Dessa forma, desabilita a função de aceleração e a RepRap se move a taxas constantes para cada movimento, que é a maneira como o código G é normalmente usado em máquinas CNC.

### 5.2.2 Skeinforge

Como discutido no projeto conceitual, o Skeinforge é o melhor gerador de código para impressoras 3D open source, usado tanto na MakerBot como na RepRap. Ele é uma cadeia de ferramentas composta de scripts escritos em Python que convertem o modelo tridimensional do objeto em instruções de código G, compreensíveis pelo firmware das máquinas. Cada uma dessas ferramentas trata de uma característica do processo, e a combinação final resulta nas estratégias de movimentação e condições tecnológicas do processo.

A maioria das configurações pode ser mantida com os valores padrão, mas existem alguns parâmetros muito importantes através dos quais se obtém o ajuste correto para a máquina e se consegue alterar o nível de qualidade.

#### a) Altura da camada (layer thickness)

Uma impressora 3D imprime um objeto desenhando (com plástico) uma camada, subindo um pouco e desenhando outra camada. Fazendo isso várias vezes e depositando camadas suficientes se obtém um objeto físico real. A altura da camada é simplesmente esse pouco que se sobe, e não é possível imprimir um objeto com camadas de alturas diferentes – um valor é escolhido e aquela será a altura para cada camada no objeto.

De diversas maneiras, a altura da camada é igual à resolução. Por exemplo, se ao tentar imprimir um copo de vinho fosse possível fazê-lo apenas com uma altura de dois centímetros, não seria possível guardar a descrição fiel dos seus primeiro centímetros – uma fina e larga base que se reduz para uma haste – com essa resolução, e o objeto ficaria irreconhecível. Para um cubo de 6 centímetros de lado essa resolução funcionaria bem, mas para objetos com muitos detalhes não.

A medida que a altura da camada diminui, a resolução aumenta. Para os bicos tradicionais com saída de 0,5mm de diâmetro, um valor de 0,4mm para a altura da camada é perfeitamente alcançável. O recorde atual de uma MakerBot pertence a um usuário que alcançou a marca de 0,1mm com um bico de 0,3mm – melhor do que muitos produtos comerciais.

## **b) Taxa de fluxo (flow rate)**

Determina quão rápido o motor da extrusora gira e é frequentemente chamado de PWM (Pulse Width Modulation). PWM é como ligar e desligar uma luz muito rapidamente para simular um dimmer – variando-se a “largura” de tempo que está ligada, ajusta-se o seu brilho. A taxa de fluxo é a mesma coisa para um motor. Um valor de 255 significa velocidade máxima, ou seja, a taxa de entrada do filamento de plástico que alimenta a extrusora é a maior possível. Essa taxa de entrada depende também do diâmetro das engrenagens.

Esse valor não determina a taxa com que o plástico sai da extrusora. Quando se quer obter impressões com alta qualidade isso é muito importante, porque ao comprar os rolos de plástico que possuem nominalmente 3mm de diâmetro na verdade eles possuem algo entre 2,7mm e 3,1mm dependendo do lote. Se as configurações do Skeinforge estão bem ajustadas para uma taxa de fluxo de 255 para um filamento de 2,7mm, os resultados são bem diferentes com 3,1mm. Um filamento de 2,7mm tem uma seção transversal de aproximadamente 5,7mm<sup>2</sup> e o de 3,1mm tem uma área de 7,5mm<sup>2</sup>, o que representa acréscimo de 30% de plástico por comprimento a uma mesma taxa de entrada do filamento.

Um aspecto da taxa de fluxo tratar apenas da quantidade de plástico entrando na extrusora é que a altura da camada tem um impacto muito menor no tempo de construção do que se pensa. Por exemplo, supondo que se fosse preencher duas caixas idênticas a partir de um tubo de plástico líquido que flui a uma taxa constante. Em uma caixa move-se o tubo muito mais rápido, então ele faz várias pequenas camadas. Na outra caixa ele se move vagarosamente e produz um número menor de camadas mais espessas. Porém, ambos preenchem a caixa no mesmo período de tempo.

Isso também é verdade quando se imprime – a diferença em tempos de construção entre camadas altas e baixas (num mesmo objeto com mesmo filamento e PWM) é a diferença dos tempos em que não se está imprimindo. Os tempos em que não se está imprimindo correspondem a viagens e órbitas – órbita é um termo utilizado no programa para identificar uma movimentação forçada da extrusora em volta do objeto, geralmente enquanto se espera uma mudança de temperatura; já viagem corresponde à trajetória de um ponto a outro que se deseja imprimir, e não se está apenas matando tempo sem depositar material. Para algo fácil de imprimir como um cubo, existe pouco tempo de viagem então a diferença é bem pequena. Para algo mais complicado, os tempos em que não se está imprimindo podem fazer diferença.

Quando se está buscando qualidade de extrusão, é importante conhecer o valor mínimo de taxa de fluxo com que a máquina funciona.

### **c) Taxa de alimentação (feed rate)**

Este é o primeiro valor que se ajusta em um perfil de configuração. Ele determina quão rápido os eixos X e Y se movem, em milímetros por segundo. É importante conhecer o valor máximo com que os eixos podem se locomover sem perder qualidade. O valor padrão gira em torno de 30mm/s, mas alguns imprimem bem mais rápido, até 65mm/s. Contudo, isso não é algo que influencia para uma impressão ser mais rápida – taxa de fluxo, tempos de viagem e órbita que influenciam –, e um problema que isso pode causar é a perda de qualidade da impressão. As correias que movem os eixos X e Y na RepRap (e na MakerBot) sofrem uma pequena sacudida quando mudam de direção por conta de pequenas folgas, que sempre existirão não importa o quanto se aperte, e quanto mais rápido se move mais elas vibram – propagando para a impressão.

Apesar de incrementar a velocidade dos eixos não ajudar nos tempos de construção, é algo que se precisa fazer quando se quer melhorar a resolução por meio da redução da altura das camadas ou usando bicos com diâmetros menores. Manter as correias e parafusos apertados e as barras dos eixos lubrificadas ajuda a aumentar a taxa máxima de alimentação.

### **d) Razão entre largura e altura (width over thickness)**

Essa razão indica para o Skeinforge quão largo o filamento sendo depositado é em relação a quão alto ele é. Se a altura da camada é de 0,25mm e a razão entre largura e altura é 2,0 o programa gera um código G que funciona para fios que têm 0,25mm de altura e 0,5mm de largura. Mudar a largura tem grande impacto sobre duas coisas. Primeiramente, valores maiores proporcionam mais fixação – mais superfície para uma camada aderir à de baixo. O outro impacto é na taxa de alimentação.

Quando o plástico sai da extrusora e nem ela nem a mesa estão se movendo, forma-se uma grande gota. Se ela movimenta-se muito rapidamente, o plástico se estica em uma linha fina, provavelmente mais fina que o bico. Mas se ela mover-se devagar, a linha mantém-se larga e sem formação de gotas. Incrementando-se a razão largura/altura, é necessário diminuir a taxa de alimentação para fazer os fios mais largos. Isso ajuda a equilibrar os aumentos de taxa de alimentação causados por uma diminuição na altura da camada, uma vez que há um limite máximo aceitável. Essa razão só não pode aumentar tanto que torne a largura maior do que o diâmetro externo do bico extrusor, que também tem a função de achatar e tornar as camadas mais suaves.



## 5.4 MESA

A mesa é a superfície onde a primeira camada do material é depositada, e a sua qualidade influi muito em todas as outras camadas. Uma característica infeliz do processo FDM é que os erros tendem a ser acumulativos. Se uma camada não adere à inferior como deveria, a camada seguinte não vai ter em que se sustentar e vai falhar também. O defeito então se propaga até o topo do objeto.

O projeto da mesa padrão consiste em uma chapa plana simples de 230mm x 230mm, com espessura suficiente para manter a rigidez. No entanto, a sua superfície precisa passar por um acabamento que propicie adesão para o termoplástico, senão ele vai simplesmente escorregar e não será fixado. Isso acontece especialmente com o ABS. Na MakerBot, a mesa padrão é feita de acrílico e possui pequenas saliências na sua superfície para evitar que a primeira camada simplesmente deslize. Mesmo assim, nota-se que em objetos mais altos ocorre o efeito do empenamento, decorrente do descolamento de camadas inferiores. Por conta dessa experiência, previu-se o projeto de uma mesa aquecida para a RepRap. Ela evita que o material depositado endureça imediatamente, e aumenta a adesão.

O desenho da mesa pode ser conferido no Anexo A. A entrada no lado inferior funciona para o teste de extrusão, como mencionado anteriormente na discussão do eixo Y. Ela permite que sejam realizados testes automáticos na mesma altura da mesa ( $Z=0$ ) antes do início de uma impressão, e o material não fique depositado no ambiente de trabalho. Uma possível adição seria a implementação de uma escova para limpar o bico extrusor nessa posição.

Para a construção da mesa aquecida, existem algumas alternativas, mas a mais eficiente e barata que se encontrou foi o posicionamento de blocos de resistência em série na sua parte inferior, estrategicamente espaçados, conectadas a uma fonte. Para o circuito ficar análogo ao do aquecimento da extrusora, pretende-se utilizar o mesmo valor de resistência e alimentação – em torno de 6,5 ohms e 12V –, juntamente de um termistor para realizar o controle. A mesa de alumínio é coberta com fita kapton – fita adesiva resistente a altas temperaturas – e, em seguida, é importante isolar a região do circuito com um material que evite o aquecimento de outras partes da máquina, que são feitas de plástico e podem derreter.

## 5.5 CONJUNTO ESTRUTURAL

Esse conjunto corresponde à estrutura que funciona apenas como suporte para os demais conjuntos. É formada basicamente por barras roscadas que se encaixam em algumas peças de plástico que as conectam e se associam aos eixos. A figura 5.8 ilustra como fica a estrutura inicial já com parte do eixo Z. Essa montagem começa a dar a cara de como ficará o tamanho final da máquina. Os dois triângulos formados são equiláteros, com  $J1 = 290\text{mm}$ , e o espaçamento  $M3 = 90\text{mm}$ .

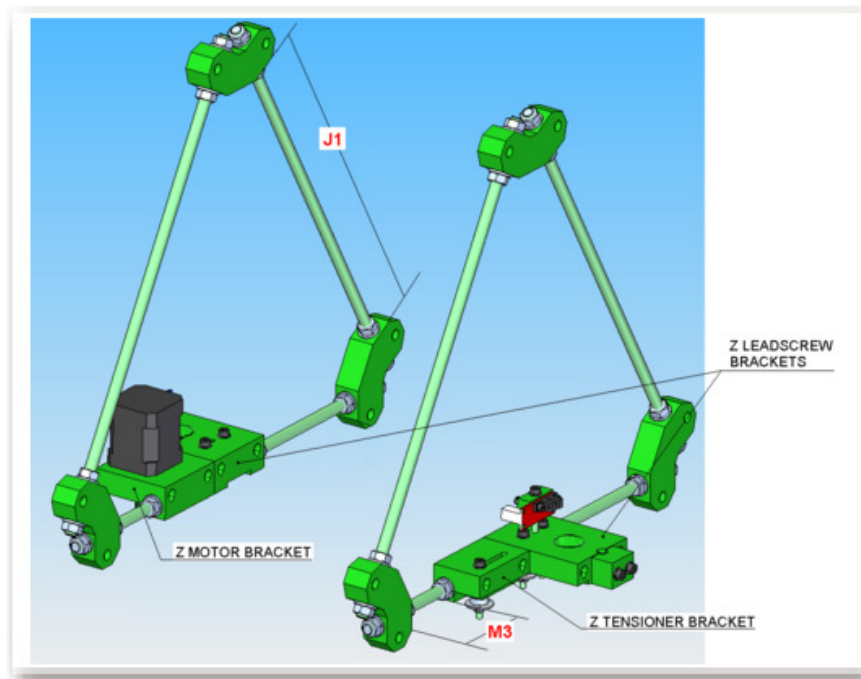


Figura 5.8: Parte do conjunto estrutural

Na figura 5.9, já é possível ver a forma definitiva do conjunto estrutural, com parte do eixo Y encaixado também. As barras superiores dão um espaçamento  $J2 = 234\text{mm}$ , o suficiente para o encaixe da mesa. Nas suas extremidades vão ser encaixadas as barras do eixo Z, com distância  $M1 = 398\text{mm}$ .  $M2$  é igual a  $52\text{mm}$  e  $M4$  a  $94\text{mm}$ .

A chapa que apóia os circuitos de controle dos motores de passo fica na parte de baixo da máquina, sob a plataforma do eixo Y, ficando próxima dos motores e ao mesmo tempo deixando a aparência mais limpa, uma vez que não há necessidade de interação dessas placas com o usuário. A placa-mãe e a controladora da extrusora fixam-se no lado da frente ou de trás, na parte de cima, para ficarem mais próximas da extrusora e permitirem mais fácil acesso aos comandos de liga/desliga e reset. O desenho das peças segue no Anexo A.

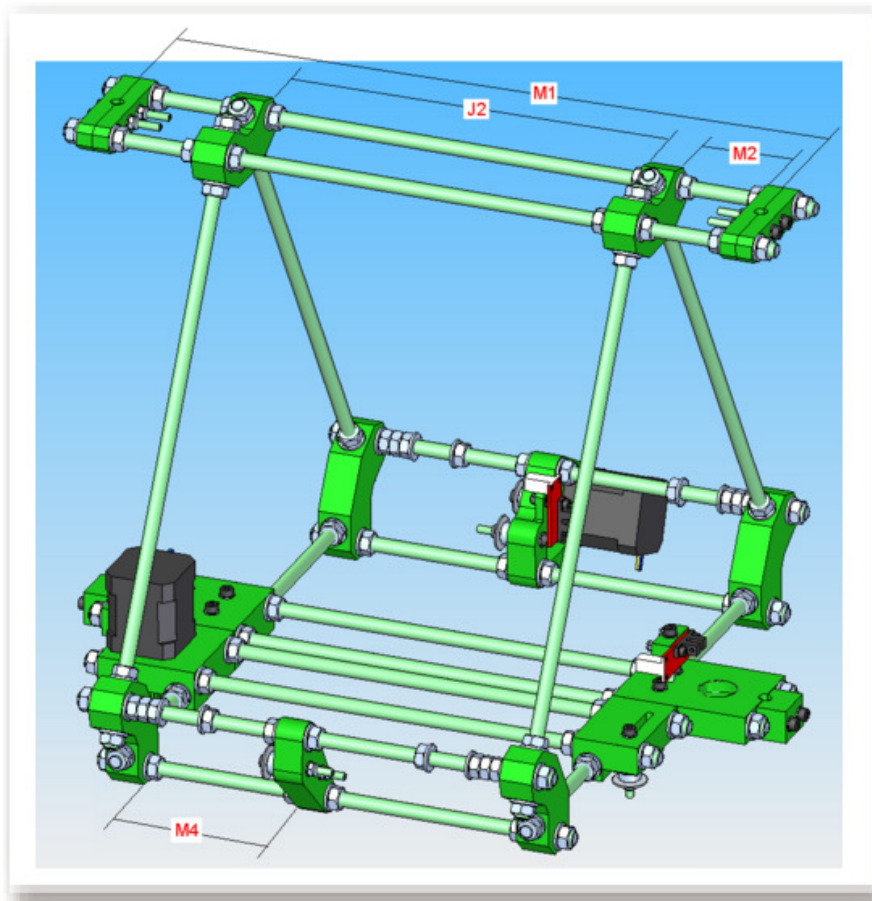


Figura 5.9: Conjunto estrutural

## 5.6 EXTRUSORA

A extrusora é provavelmente o componente mais importante de toda a máquina. Os eixos contribuem para o seu correto posicionamento, mas normalmente o limitante da qualidade final é a extrusora. Além de poder extrudar camadas finas e em velocidades variadas, é imprescindível atingir um fluxo constante e bem calibrado.

A extrusora Wade (figura 5.10) foi o modelo escolhido para o protótipo, pela robustez e facilidade de fabricação e montagem. A relação de transmissão das engrenagens é de 39:11, exigindo menos torque do motor. Encaixada na engrenagem maior fica um parafuso M8 que irá de fato realizar o trabalho de empurrar o filamento de plástico. Uma seção do parafuso é usinada para criar os dentes que encaixam no filamento e o seu diâmetro final fica com cerca de 7mm. Molas (lado esquerdo da figura 5.10) ajudam a empurrar o rolamento contra o fio de plástico.

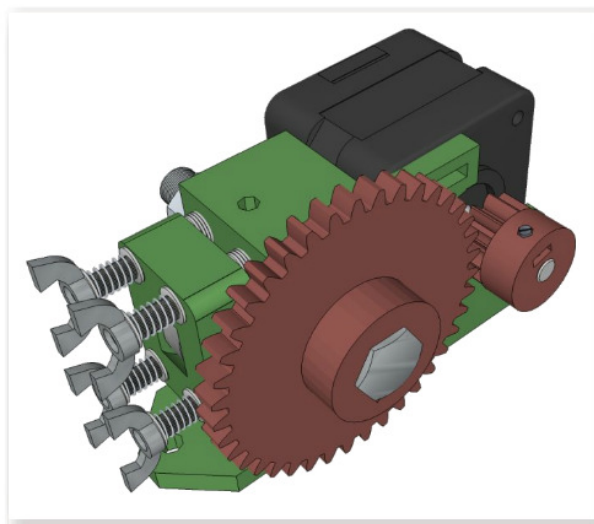


Figura 5.10: Extrusora Wade.

Este projeto define apenas o suporte e a alimentação da extrusora, restando definir o seu corpo de fato. A figura 5.11 ilustra o modelo original da barreira térmica (teflon) e o bico extrusor da Mendel. Baseou-se nesse projeto simples para projetar a extrusora do protótipo deste trabalho. Foram necessárias pequenas adaptações nas dimensões para melhorá-lo e adaptá-lo a nossa solução e aos materiais disponíveis. Não havia disponibilidade de uma broca de 0,5mm na universidade, então o furo da ponta do bico foi feito com 0,7mm.

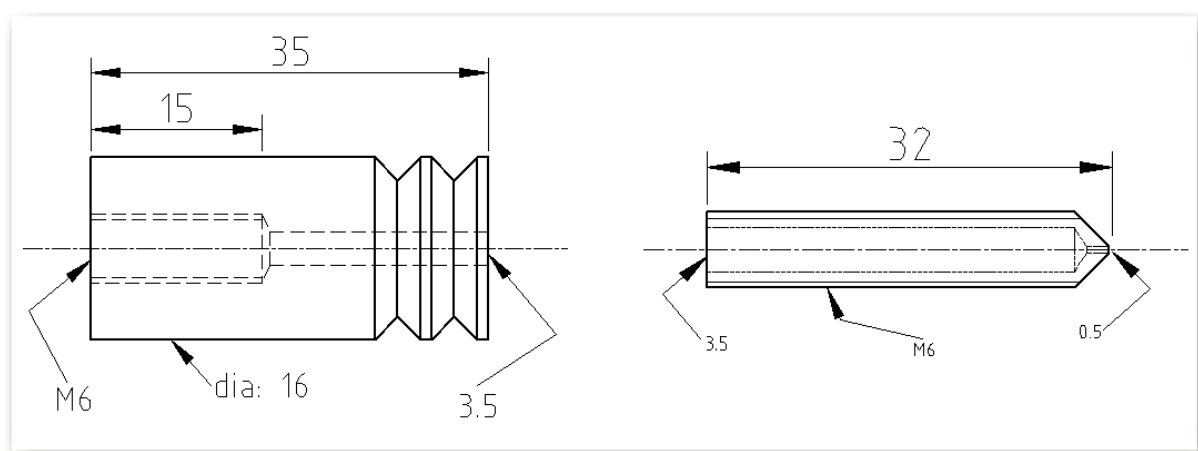


Figura 5.11: Barreira térmica (esquerda) e bico extrusor (direita).

Este projeto propunha o uso de filamento de níquel-cromo para efetuar o aquecimento, o que se comprovou menos eficiente do que o bloco com a resistência, conforme pesquisa bibliográfica. Então alongou-se um pouco o bico e projetou-se o bloco da figura 5.12. O bico é enroscado no furo central e no outro é encaixada uma resistência de 6,8 ohms 5W. Outros blocos pesquisados possuem também um espaço para encaixar o termistor, para ficar bem próximo do ponto de aquecimento. Optou-se por fixá-la com fita kapton no próprio bico da extrusora, para obter uma leitura mais fiel da temperatura no local que realmente interfere no processo.

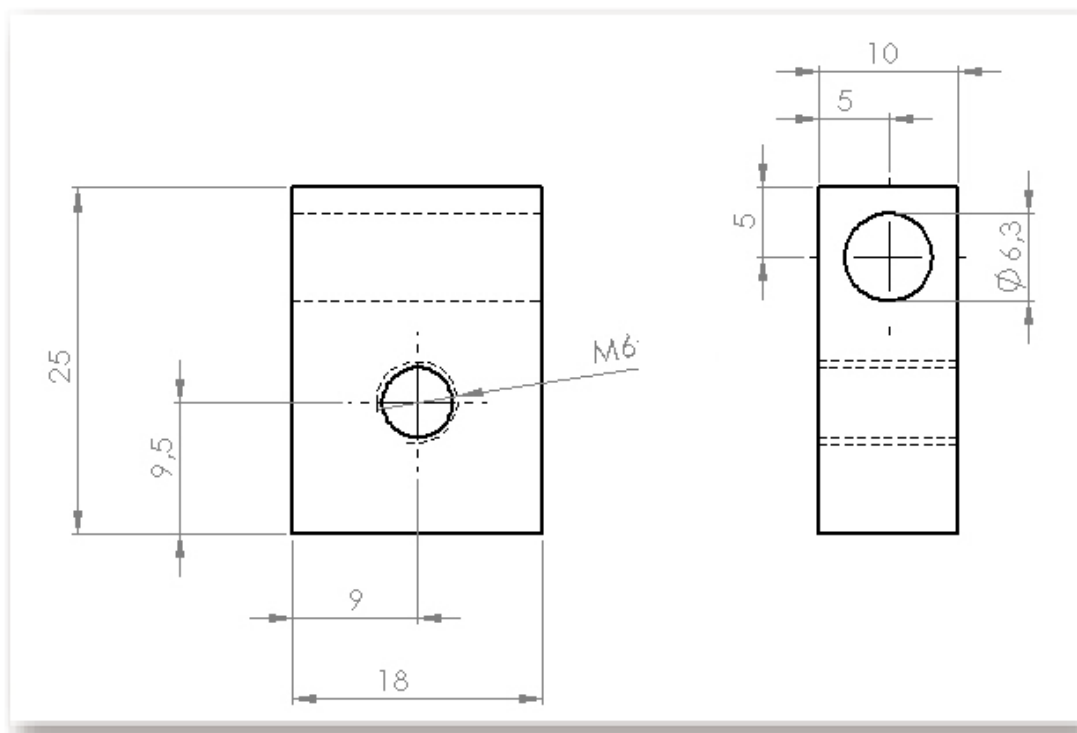


Figura 5.12: Bloco de aquecimento.

O termoplástico ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) precisa atingir uma temperatura entre 225°C e 250°C para amolecer o suficiente, e quando quente libera alguns gases tóxicos, mas em quantidade insuficiente para causar mal a saúde – também não há riscos para o meio-ambiente, pode ser descartado como lixo comum. Nesses aspectos o PLA (Polylactic Acid) apresenta certas vantagens, por ser um polímero biodegradável feito a base de milho, e derreter a temperaturas menores, entre 180°C e 220°C. Ele também dispensa o uso de mesa aquecida fixando-se bem no acrílico e não apresenta tanto o efeito de empenamento.

Entretanto, as propriedades físicas do ABS são superiores ao PLA. Este último absorve mais umidade, o que leva à formação de bolhas que prejudicam o correto funcionamento, e até a sua pigmentação (cor) pode alterar a qualidade de extrusão. Além disso, a grande vantagem do ABS é que seu coeficiente de atrito é menor, exigindo menos esforço do motor e evita ocasionais congestionamentos – requer uma força de 49N, contra 73,6N do PLA.

Na extrusora, o motor deve trabalhar a baixas velocidades para permitir a adesão apropriada do plástico. Uma velocidade razoável de 16mm/s (isto é, em 1 segundo sai um filamento com 16mm de comprimento do bico) para uma máquina pouco ajustada – a maioria opera a 30mm/s – permite um volume de extrusão igual a 10,17mm<sup>3</sup>/s (conforme equação 1), sendo que a meta estabelecida na lista de especificações é de 4,17mm<sup>3</sup>/s.

A equação 5.3 leva em consideração o bico de 0,7mm, que extruda um filamento de aproximadamente 0,9mm de diâmetro. Essa expansão acontece por causa das propriedades físicas do ABS. Como já foi discutido, um valor tão grande assim nem sempre indica mais velocidade de impressão tampouco qualidade.

$$V = l \times \frac{\pi D^2}{4} = 16mm \times \frac{\pi(0,9mm)^2}{4} = 10,17mm^3 \quad (5.3)$$

## 5.7 LISTA DE MATERIAIS

A tabela 5.1 contém a lista dos materiais (BOM – Bill of Materials) utilizados para a construção dos conjuntos citados. Foi aproveitada grande parte da lista oficial, com algumas atualizações e as adições dos componentes fabricados. O nome dos componentes prototipados guarda informação de sua localização e função, e foi mantido no idioma original para preservar a fidelidade bibliográfica.

Tabela 5.1 – Listagem dos componentes.

<i>Nome do componente</i>	<i>Tipo</i>	<i>Qty.</i>	<i>Observações</i>
Eixo X	Barra	2	495mm, ø8mm
Eixo Y	Barra	2	406mm, ø8mm
Eixo Z	Barra	2	330mm, ø8mm
Rolamento 608	Rolamento	2	
Rolamento 624	Rolamento	48	
Correia X	Correia	1	530 XL (precisa cortar na largura)
Correia Y	Correia	1	330 XL (precisa cortar na largura)
Correia Z	Correia	1	388 XL (precisa cortar na largura)
Bloco de aquecimento	Extrusora/Mesa	6	1 para extrusora, 5 para mesa
Fita kapton	Extrusora/Mesa	1	Isolamento térmico
Termistor NTC 100k	Extrusora/Mesa	2	A mesa pode usar um de 10k
Resistência 1R5 5W	Mesa	4	Circuito de aquecimento
Resistência 1R 5W	Mesa	1	Circuito de aquecimento
Espuma expansiva	Mesa	1	Spray para isolamento térmico
Resistência 6R8 5W	Extrusora	1	
Bico da extrusora	Extrusora	1	
Barreira térmica	Extrusora	1	
Parafuso M3x20	Fixador	50	
Parafuso M3x25	Fastner	4	
Porca comum M3	Fixador	18	
Porca de pressão M3	Fixador	34	
Arruela M3	Fixador	102	
Porca comum M4	Fixador	25	
Porca de pressão M4	Fixador	129	
Arruela M4	Fixador	449	
Parafuso M4x16	Fixador	38	
Parafuso M4x20	Fixador	1	
Parafuso M4x40	Fixador	115	
Arruela M5x20	Fixador	15	
Porca M8	Fixador	104	
Arruela M8	Fixador	104	
Motor de passo	Motor	4	NEMA 17
Extruder controller v2.2	Placa eletrônica	1	
Opto Endstop v2.1	Placa eletrônica	3/6	3 opcionais para limite máximo
Motherboard v1.2	Placa eletrônica	1	
Stepper motor driver v2.3	Placa eletrônica	3	
Flag X	Chapa fina	1	Detectar fim de curso
Flag Y	Chapa fina	1	Detectar fim de curso

Flag Z	Chapa fina	1	Detectar fim de curso
Bed spring	Prototipável	4	Mola para ajustar a mesa
Circuit board bracket m3	Prototipável	4	
Circuit board spacer m4	Prototipável	2	
Drive pulley	Prototipável	3	Polias dos motores dos eixos
Frame vertex	Prototipável	6	
Extruder body	Prototipável	1	Extrusora Wade
Idler block	Prototipável	1	Extrusora Wade
11 teeth gear	Prototipável	1	Extrusora Wade
39 teeth gear	Prototipável	1	Extrusora Wade
X 180 z bearing plate	Prototipável	2	
X 360 z bearing plate	Prototipável	2	
X 360 z bearing plate mirror	Prototipável	2	
X axis side plate nut jig	Prototipável	2	
X bar clamp m3	Prototipável	6	
X bar clamp m4	Prototipável	4	
X carriage belt clamp	Prototipável	2	
X carriage lower	Prototipável	1	
X carriage upper	Prototipável	1	
X end bracket	Prototipável	2	
X motor bracket spacer	Prototipável	2	
X vert drive nut trap	Prototipável	4	
X vert drive side plate 180 end	Prototipável	2	
X vert drive side plate	Prototipável	2	
Y bar clamp	Prototipável	10	
Y bearing 180 inner	Prototipável	2	
Y bearing 180 outer left	Prototipável	1	
Y bearing 180 outer right	Prototipável	1	
Y bearing 360 inner	Prototipável	2	
Y bearing 360 outer left	Prototipável	1	
Y bearing 360 outer right	Prototipável	1	
Y belt clamp	Prototipável	2	
Y idler bracket	Prototipável	1	
Y motor bracket	Prototipável	1	
Z axis opto spring	Prototipável	1	
Z bar top clamp	Prototipável	4	
Z driven pulley	Prototipável	2	
Z drive pulley rim	Prototipável	4	
Z leadscrew base	Prototipável	2	
Z leadscrew base bar clamp	Prototipável	2	
Z motor bracket	Prototipável	1	
Z opto bracket	Prototipável	1	
Z tensioner	Prototipável	1	
Belt width adjuster	Prototipável	1	Dispositivo de corte da correia
Belt split jig bracket universal	Prototipável	2	Dispositivo de corte da correia
Lâmina	Folha de metal	1	Dispositivo de corte da correia
Mesa	Chapa grossa	1	
Chapa placa-mãe	Chapa grossa	1	
Chapa expurgo	Chapa grossa	1	
Chapa drivers motores	Chapa grossa	1	
Chassis Y	Chapa grossa	1	
Barra estrutura	Barra roscada	4	M8, 294mm
Barra topo	Barra roscada	2	M8, 440mm
Barra lateral	Barra roscada	6	M8, 370mm
Barra base Z longa	Barra roscada	2	M8, 418mm
Barra base Z curta	Barra roscada	2	M8, 355mm
Barra eixo Z	Barra roscada	2	M8, 330mm

Além desses componentes, foram adquiridos também rolos de plástico ABS para fabricação das peças prototipáveis e ferramentas, como a broca de 0,5mm para fazer o furo do bico da extrusora. Alguns componentes não foram encontrados na cidade de Brasília, e tiveram que ser comprados de São Paulo, além dos componentes importados (placas eletrônicas, termistores, motores de passo). Mesmo assim, o custo total do material manteve-se bem abaixo da meta de R\$2000,00 (custo total menos custo de montagem, estimado em R\$500,00), conforme mostra a tabela 5.2. Os extras correspondem a itens adquiridos ao longo do projeto conforme a necessidade, como a espuma expansiva, as brocas para a extrusora e rolo de fita kapton.

Tabela 5.2 – Custos de aquisição

<i>Componentes</i>	<i>Custo (R\$)</i>
Rolamentos	80,00
Eixos	170,00
Parafusos, porcas, arruelas	75,00
Barras M8	80,00
Eletrônicos e motores (imp.)	700,00
ABS 5lbs	100,00
Extras	200,00
<b>TOTAL</b>	<b>1405,00</b>

A figura 5.50 mostra um levantamento dos custos de material para construção de uma Mendel, no Reino Unido, totalizando 400 libras. As 90 peças RP de uma Mendel padrão correspondem apenas a uma parcela de 5% (20 libras), que seria com certeza muito maior caso tivessem que ser fabricadas com processos tradicionais de usinagem. A estimativa é baseada no custo do material, sem levar em conta o custo homem-hora.

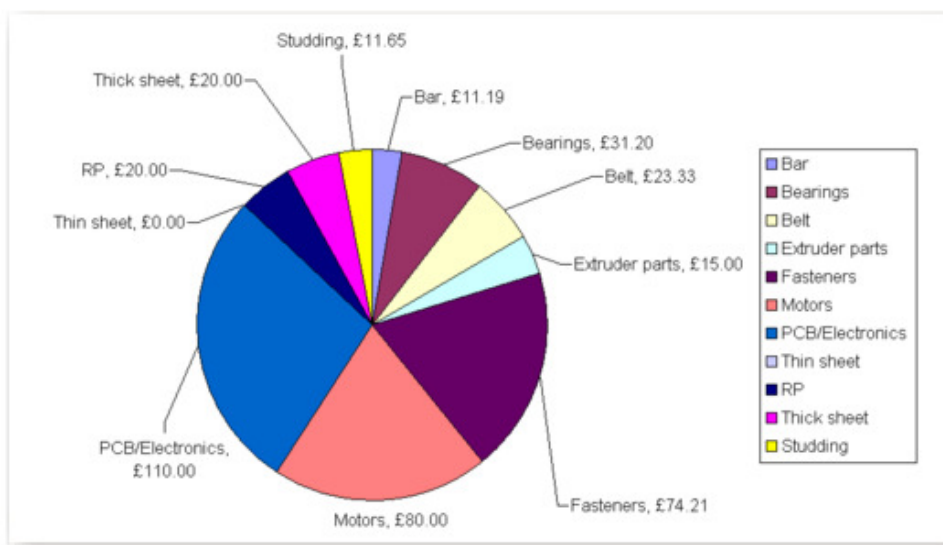


Figura 5.13: Custo estimado de uma Mendel (Reino Unido).



Após a concepção definitiva da geometria dos subsistemas construtivos que compõem o sistema escolhido, passa-se para a construção do sistema propriamente dito com foco nos seguintes objetivos: funcionalidade do sistema como um todo, análise de modo especial no desempenho da extrusora, visando a qualidade. A identificação dos materiais e o dimensionamento dos componentes tiveram como base as especificações técnicas, no qual se optou por uma aproximação aos componentes de dimensões já disponíveis de forma a otimizar custo e simplicidade.

Cabe salientar que mesmo tendo sido concluído o projeto detalhado, algumas características do produto podem ser alteradas durante sua construção e realização de testes, pois o produto foi projetado com uma flexibilidade que possibilita que mudanças possam ser feitas em sua configuração, sem que seja necessária sua reconstrução, o que tornaria o projeto mais oneroso.

# 6 CONSTRUÇÃO E TESTES DO PROTÓTIPO

## 6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata dos procedimentos e resultados das etapas de construção e testes do protótipo da RepRap Mendel. Ambas as atividades objetivam a validação do conceito do produto, verificando o atendimento das exigências estipuladas nas fases iniciais do projeto. Principalmente por se tratar de um sistema tão inovador, a realização do projeto implica em uma série de testes e correções. São abordados o planejamento prévio dos testes, o histórico do processo de manufatura do protótipo, as diferenças existentes entre a máquina construída e produtos comerciais, os resultados e análises preliminares dos testes.

O planejamento do processo de construção se iniciou com a obtenção dos materiais necessários, listados na Tabela 5.1. Os componentes mecânicos puderam ser todos comprados no Brasil, e apenas as placas eletrônicas e os motores de passo foram importados. Os eixos foram comprados no tamanho certo, e as barras roscadas foram adquiridas em unidades com comprimentos de 1m para posterior corte. As chapas finas e grossas, para confecção das flags de fim de curso, placas de suporte e mesa, foram feitas com material disponível na universidade e auxílio dos técnicos. O mesmo ocorreu com a extrusora.

Para a fabricação das quase 100 peças prototipadas, foi adquirida uma MakerBot Cupcake CNC. O seu uso intenso permitiu ganhar familiarização com a tecnologia e os eventuais problemas enfrentados na produção. Para a fabricação das peças mais complexas que a MakerBot não obtinha qualidade satisfatória, utilizou-se a Stratasys uPrint. Esse leque de máquinas, que ao final contou também com a Mendel, permitiu uma melhor análise dos resultados.

## 6.2. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

### 6.2.1 Peças prototipadas

A máquina MakerBot foi comprada desmontada, mas o processo de montagem é bem simples e pôde ser realizado em poucos dias. A lógica utilizada na fabricação dos componentes de plástico foi dar prioridade aos mais simples e rápidos de fazer, e calibrar a máquina a medida que se ganhava experiência e confiança no processo, para então partir para os mais complexos, com longos tempos de fabricação. Como descrito no projeto conceitual, a MakerBot utiliza o software ReplicatorG e o Skeinforge como gerador de código, cuja configuração utilizada nos testes será descrita.

A tabela 6.1 mostra os tempos e volumes médios de cada peça que forma a estrutura da máquina, exceto a extrusora. Esses dados variam ligeiramente conforme as configurações de processamento do desenho STL para geração de código. O volume calculado refere-se à quantidade de plástico de fato depositada, lembrando que as peças prototipadas não precisam ser completamente preenchidas para apresentar boas qualidades mecânicas.

Tabela 6.1 – Volumes e tempos de produção das peças prototipadas.

<i>Nome da peça</i>	<i>Qty</i>	<i>Tempo (seg)</i>	<i>Volume de material (cm<sup>3</sup>)</i>
Bed spring	4	668	1,22
Circuit board bracket m3	4	646	1,53
Circuit spacer m4	2	881	2,18
Drive pulley	3	614	1,56
Frame vertex	6	7203	16,7
X 180 z bearing plate	2	3233	7,42
X 360 z bearing mirror	2	860	1,95
X 360 z bearing plate	2	823	1,94
X axis side plate nut jig	2	1130	2,60
X bar clamp m4	4	837	2,11
X bar clamp m3	6	837	2,11
X carriage lower	1	9287	33,0
X carriage upper	1	7445	17,4
X end bracket	2	4578	12,0
X motor bracket spacer	2	454	1,27
X vert drive nut trap	4	878	2,00
X vert drive side plate 360 end	2	2911	7,34
X vert drive side plate 180 end	2	1855	4,62
Y bar clamp	10	1321	3,08
Y bearing 180 inner	2	1770	4,34
Y bearing 180 outer left	1	2240	5,37
Y bearing 180 outer right	1	2170	5,45
Y bearing 360 inner	2	3513	8,41
Y bearing 360 outer left	1	3954	9,45
Y bearing 360 outer right	1	3917	9,45
Y belt clamp	2	480	1,24
Y idler bracket	1	4139	10,3
Y motor bracket	1	8929	22,5
Z bar top clamp	4	1938	4,90
Z driven pulley	2	668	1,90
Z drive pulley rim	4	187	0,55
Z leadscrew base	2	12144	30,2
Z leadscrew base bar clamp	2	1532	3,86
Z motor bracket	1	8873	22,0
Z opto bracket	1	567	1,43
Z tensioner	1	7378	18,7
<b>TOTAL</b>	90	216471	535,16

O tempo total de fabricação dessas peças é bastante alto, mais de 60 horas, e gasta-se cerca de 535 cm<sup>3</sup> de plástico. O volume total estimado das peças é de 1110 cm<sup>3</sup> (utilizou-se aproximadamente 50% de preenchimento nos objetos). As maiores e mais complexas peças são: z leadscrew base, x carriage upper e x carriage lower. Suas dimensões são tão grandes que mal cabem na pequena plataforma de construção da MakerBot, e tiveram que ser feitas na Stratasys. A figura 6.1 mostra o desenho do conjunto completo de peças e a foto das peças fabricadas.

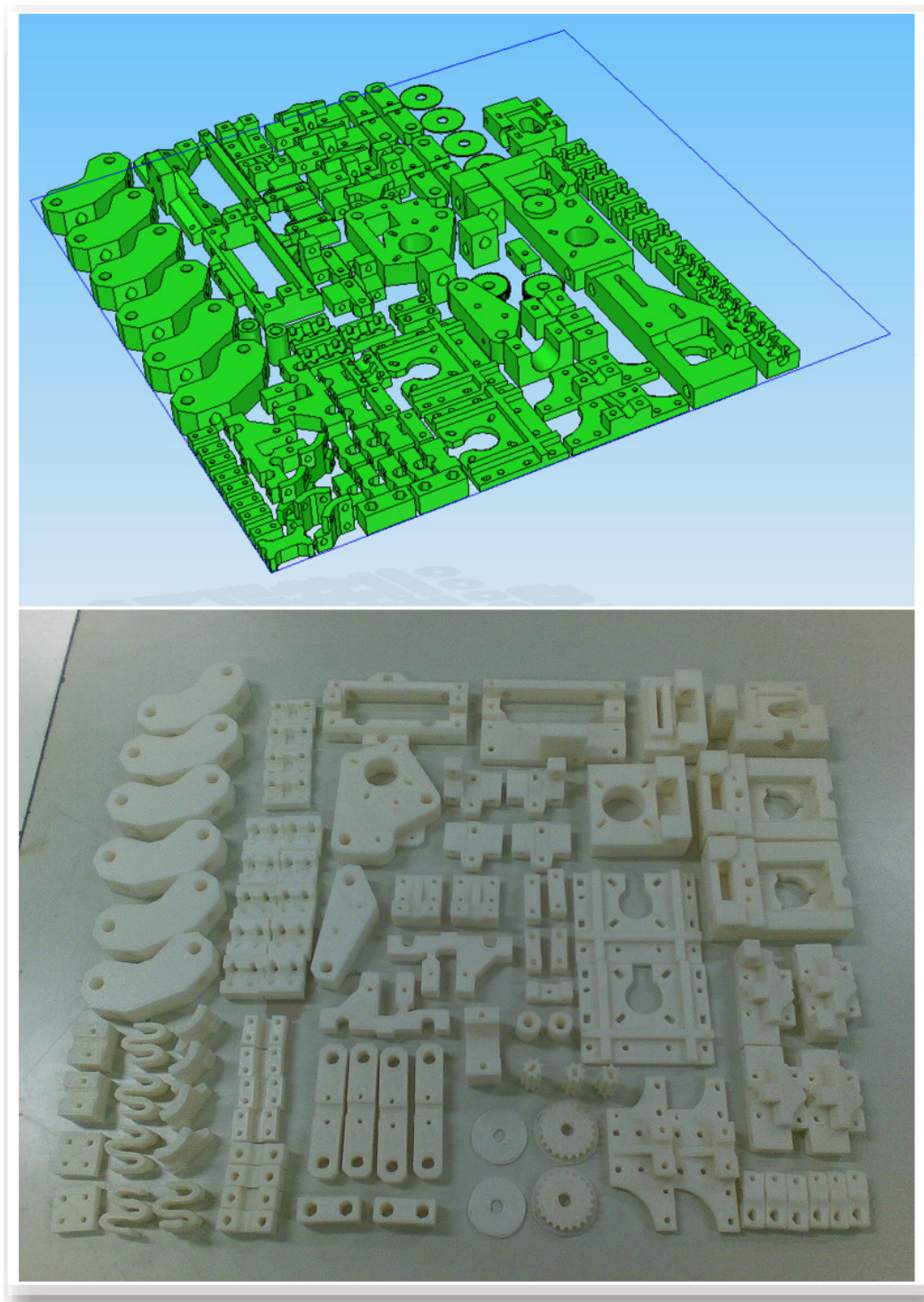


Figura 6.1: Peças prototipadas na MakerBot e na Stratasys para montagem da RepRap

## 6.2.2 Estrutura

As barras roscadas, que cumprem a função de suporte estrutural da máquina – além das barras do eixo Z que promovem a movimentação vertical da extrusora –, foram encontradas em comprimentos de 1m. Pelo fato de não necessitarem de muita precisão e nem serem tão perfeitamente retas como os eixos, foi mais econômico cortá-las no laboratório, utilizando uma serra de arco comum. As oito barras foram cortadas nos comprimentos indicados na lista de materiais e agrupadas conforme a tabela 6.2, podendo ser visualizadas na foto da figura 6.2.

Tabela 6.2 – Organização das barras.

#	Comprimentos
1	370 + 234 + 370
2	370 + 157 + 440
3	294 + 370 + 294
4	294 + 370 + 294
5	330 + 290 + 330
6	418 + 440
7	370 + 418
8	355 + 355



Figura 6.2: Barras cortadas e agrupadas.

As correias compradas também tiveram de ser ajustadas, conforme previsto no capítulo anterior. Os modelos comprados (indicados na lista de materiais) possuem passo e comprimento adequados, mas a largura é ligeiramente maior. O ajuste foi feito com o dispositivo citado anteriormente, que corta com facilidade a correia na largura correta de 5mm (figura 6.3). O uso de luvas de couro é recomendado para evitar acidentes com a lâmina.



Figura 6.3: Mecanismo de corte das correias.

De posse da maioria dos componentes, iniciou-se o processo de montagem da máquina, seguindo as instruções do site da RepRap – primeiro a montagem do eixo X, depois os eixos Z, Y, e por fim a estrutura com as placas. As instruções estão bem descritas e não há requisito de grandes habilidades técnicas, mas as ferramentas corretas fazem diferença. Dependendo da qualidade obtida nas impressões das peças, pode ser bastante útil ter uma furadeira ao alcance para realizar trabalhos de acabamento e encaixe.

Certos atrasos decorreram em função da espera de disponibilidade dos técnicos para confecção de alguns componentes, como as chapas e a extrusora (bico, bloco de aquecimento e barreira térmica), e do tempo de entrega para componentes comprados fora. Nessa etapa percebeu-se a enorme diferença de tempo de montagem entre a MakerBot e a RepRap. Enquanto a primeira levou apenas poucos dias, esta última demorou mais de 20 após a finalização das peças prototipadas, com dedicação média de 20 horas semanais – contando também a preparação de materiais. Isso evidencia a característica que trouxe mais sucesso comercial para a MakerBot.

Durante o processo de montagem da estrutura, muitos cuidados são tomados para garantir que os espaços estejam corretos, as correias fiquem bem apertadas mas não muito tensas, os eixos se encaixem corretamente e fiquem perpendiculares entre si. É muito importante ter atenção em todas as instruções, porque se algo passa despercebido requer um ajuste muito demorado. Esse é outro ponto em que a MakerBot é mais vantajosa, pois não possui um número tão grande de componentes e encaixes na estrutura, permitindo acessos mais fáceis e manutenções rápidas.

A estrutura finalizada apresenta excelente rigidez, e ainda foram adicionados apoios de borracha nos pés (frame vertex) para reduzir a transmissão de vibrações quando ela estiver trabalhando, consequentemente diminuindo ruídos, que é um requisito de projeto. Também foram incluídos fans próximos aos motores para evitar superaquecimento, conforme ilustra a figura 6.4.



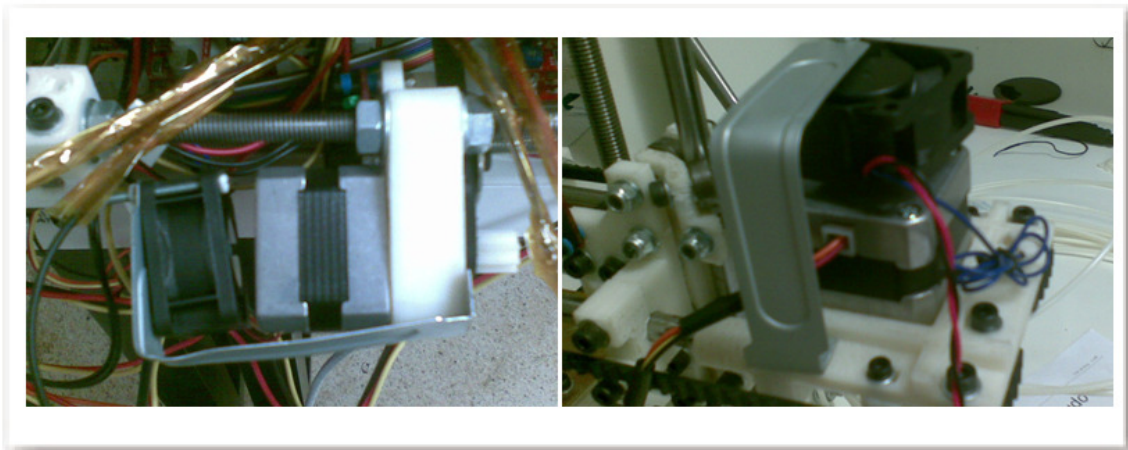


Figura 6.4: Fans nos motores dos eixos X (direita) e Y (esquerda)

### 6.2.3 Mesa

A figura 6.5 mostra a mesa construída para a RepRap ao lado da mesa de acrílico padrão da MakerBot, o que já mostra a diferença da área de trabalho das duas máquinas (400cm<sup>2</sup> contra 100cm<sup>2</sup>). Para tentar imitar a capacidade de adesão da mesa da MakerBot, que possui pequenas saliências na superfície, foram feitos sulcos na horizontal e na vertical com um riscador, na intenção de que a primeira camada depositada infiltrasse e se fixasse melhor. Esta solução provou-se ineficaz, a medida que não proporcionou nenhuma adesão do ABS.

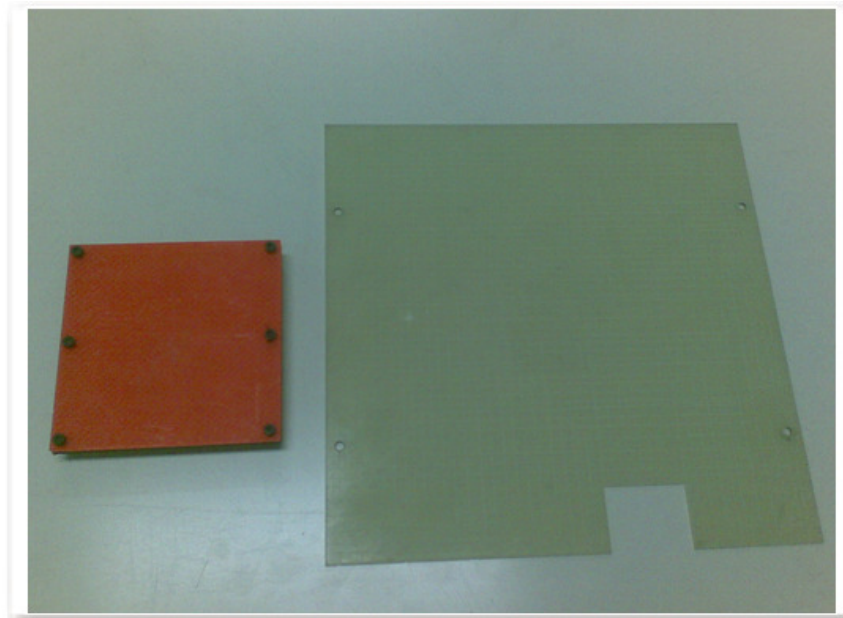


Figura 6.5: Mesa da MakerBot (esquerda) e RepRap (direita)

Em vista disso, foi dada prioridade à finalização do projeto da mesa aquecida. A figura 6.6 mostra o posicionamento dos blocos de resistência parafusados (4x1R5 e 1x1R) e do termistor, fixado no centro com fita kapton, e o posterior isolamento térmico com espuma expansiva.

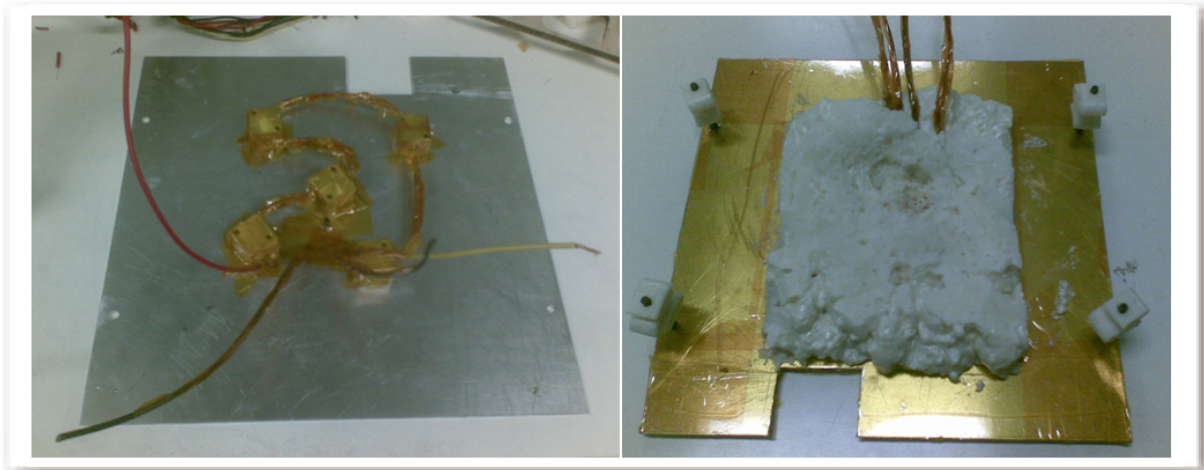


Figura 6.6: Mesa aquecida

Alimentou-se o circuito inicialmente com 12V, aproveitando a fonte ATX da máquina. Contudo, a temperatura estabilizou-se logo em 60°C, insuficiente para o plástico ABS aderir adequadamente. Utilizando uma fonte de alimentação regulada em 20V, foi possível chegar a 80°C em poucos minutos. Nos testes, essa temperatura provou-se suficiente para fixar a primeira camada de plástico. Esperava-se atingir temperaturas mais elevadas, mas pela grande área e massa da mesa seria necessária uma alimentação maior. Apesar disso, o resultado foi satisfatório, o plástico ABS teve boa adesão e sua remoção não danificou a cobertura de fita adesiva.

Entretanto, percebeu-se um gradiente de temperatura nesta mesa, com a concentração do calor razoavelmente constante no seu centro, e diminuindo em direção às extremidades, chegando a menos de 60°C. Nessa condição, não é possível utilizar toda a área de trabalho disponível. Outra observação importante é que o zeramento do eixo Z deve ocorrer com a mesa quente, para evitar erros sistemáticos provocados pela dilatação do conjunto parafusos, ABS, porcas, arruelas e mesa.

#### 6.2.4 Extrusora

Como foi discutido nos capítulos anteriores, optou-se por utilizar a extrusora Wade e o bico com bloco de aquecimento. O comprimento do bocal teve que ser alongado em relação ao desenho proposto para que o bloco não ficasse tão próximo da carruagem do eixo X. A barreira térmica também sofreu uma otimização no modo de fixação, passando a ser parafusada na estrutura de encaixe ao invés de enroscada. Os resultados podem ser conferidos nas figuras 6.7 a 6.9. A figura 6.8 mostra o termistor fixado na ponta. Com essa montagem, a temperatura ideal de extrusão obtida foi 225°C, e utilizando o bico com 0,7mm o filamento produzido possui 0,9mm de diâmetro.





Figura 6.7: Bico da extrusora e estrutura de suporte com barreira térmica



Figura 6.8: Extrusora com o bloco de aquecimento para teste e montada no eixo X

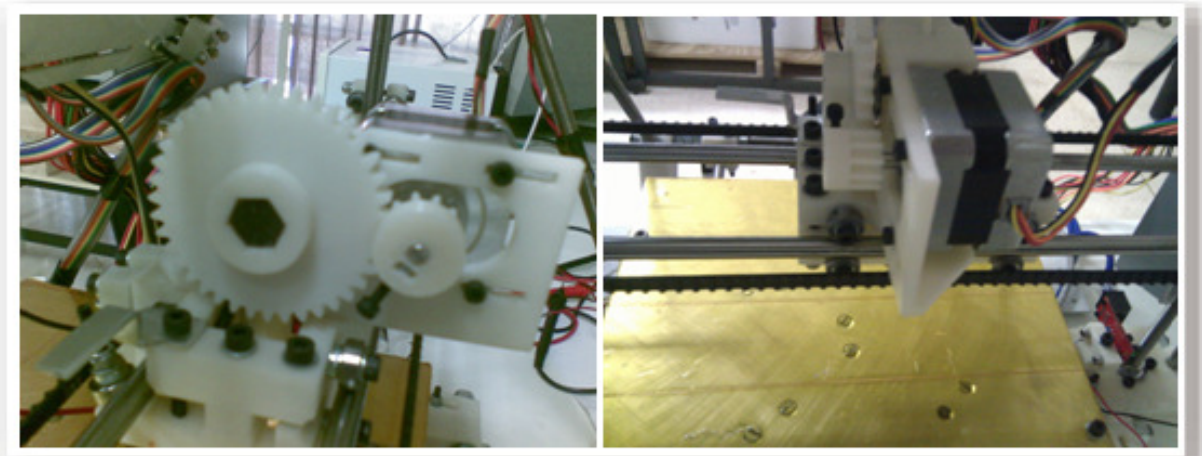


Figura 6.9: Outras vistas da extrusora montada na carruagem do eixo X

## 6.2.5 Eletrônica

O passo seguinte foi a montagem das placas eletrônicas na máquina e a ligação dos cabos. Antes de testar todo o conjunto funcionando, cada placa foi testada individualmente. Como foram adquiridas da loja da MakerBot, todas vieram com o firmware desta máquina instalado. A funcionalidade era relativamente normal, com algumas restrições visíveis na movimentação dos eixos, já que o firmware estava preparado para trabalhar com outro hardware.

Em função disso, partiu-se para o firmware próprio da RepRap e houve uma modificação importante na conexão da extrusora com a placa-mãe. A MakerBot trabalha com os conectores RJ45 para se comunicar com os drivers da extrusora, mas a RepRap não está preparada para utilizar essa comunicação no seu firmware, sendo necessário conectar os pinos SCL/SDA da placa-mãe aos pinos D9/D10 da placa da extrusora.

Realizou-se a calibração dos eixos e da extrusora como descrito no capítulo anterior, equações 5.1 e 5.2, resultando nos valores da tabela 6.3. Os movimentos ocorreram de forma suave e sem ruídos. Ajustou-se os sensores de fim curso para as posições adequadas (figura 6.10) e então partiu-se para os primeiros testes de impressão.

Tabela 6.3: Valores dos parâmetros de configuração inicial do firmware

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
X_STEPS_PER_MM	10.047
Y_STEPS_PER_MM	10.047
Z_STEPS_PER_MM	842.398
E_STEPS_PER_MM	7.89

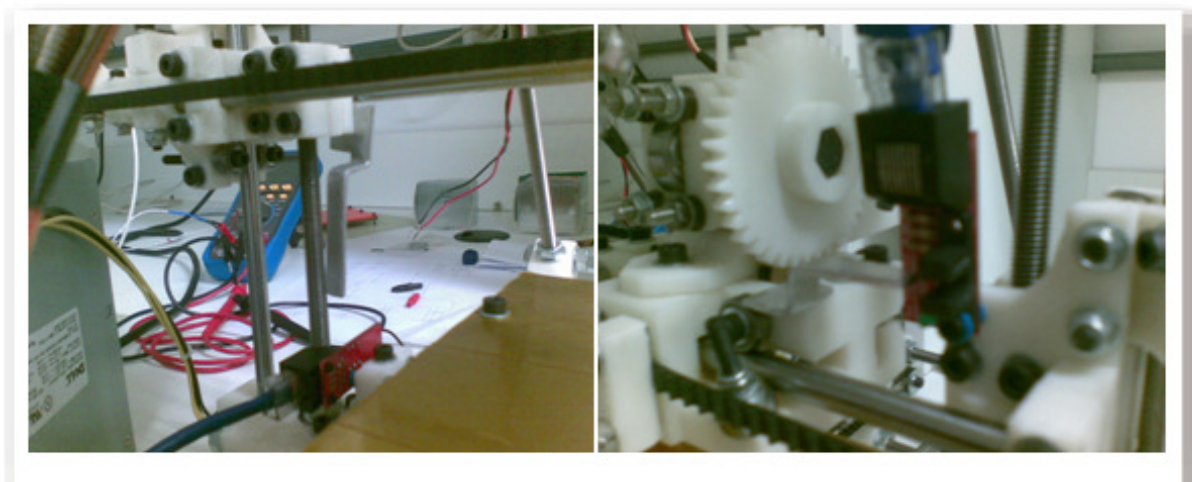


Figura 6.10: Sensores de fim de curso

A figura 6.11 mostra a aparência inicial da máquina montada, ainda sem o sistema de mesa aquecida e os ventiladores.

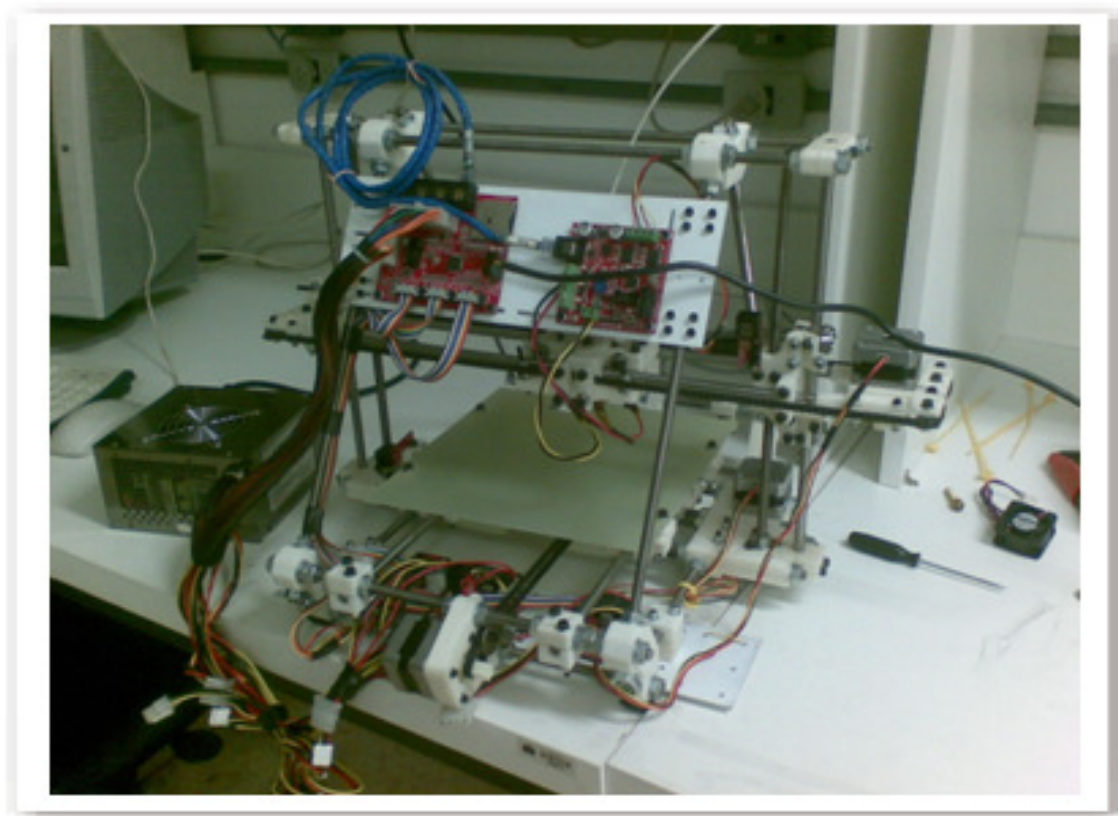


Figura 6.11: RepRap Mendel montada

### 6.3. TESTES

Concluída a construção, foram realizados alguns testes visando a validação do protótipo. Normalmente recomenda-se para as primeiras impressões construir um cubo pequeno, cuja geometria simples permite avaliar a correta calibração dos eixos e da extrusora. Ajustados esses primeiros parâmetros, a máquina está capacitada a partir para objetos mais complexos que exijam ajustes mais complicados das configurações.

A versão 41 do Skeinforge (a mais atual disponível na data dos testes), utiliza o diâmetro do filamento de plástico que alimenta a extrusora como um parâmetro para gerar o código. Com esse valor, calcula-se o volume que está entrando e considera-o igual ao volume saindo – entretanto, isso não é 100% verdadeiro para alguns plásticos, como o ABS. Logo, efetuou-se a medição do filamento em 10 pontos distintos, e em cada um tomou-se dois valores utilizando-se o paquímetro em posições ortogonais. O resultado está resumido na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Diâmetro do filamento.

#	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Média (mm)
1	2,96	2,86	2,91
2	3,01	2,85	2,93
3	3,00	2,85	2,93
4	2,90	2,86	2,88
5	2,83	2,83	2,83
6	2,86	2,85	2,86
7	2,94	2,86	2,90
8	2,86	2,86	2,86
9	2,85	2,94	2,90
10	2,85	2,87	2,86
<i>Média total (mm)</i>			2,89

### 6.3.1. Cubo de calibração

O desenho de um cubo com 20mm de lado foi feito em um software CAD comercial, salvo no formato STL e carregado no Skeinforge para geração do código, utilizando os valores padrão. Como já se antecipou, a mesa projetada não conferiu aderência e não foi possível criar as primeiras camadas do objeto nela. Ainda faltavam alguns componentes para a finalização da plataforma aquecida, então utilizou-se uma pequena “adaptação” para fixar a mesa de acrílico da MakerBot sobre a mesa da RepRap. Como esperado, o plástico aderiu perfeitamente ao material e o processo correu normalmente, conforme ilustra a figura 6.12.

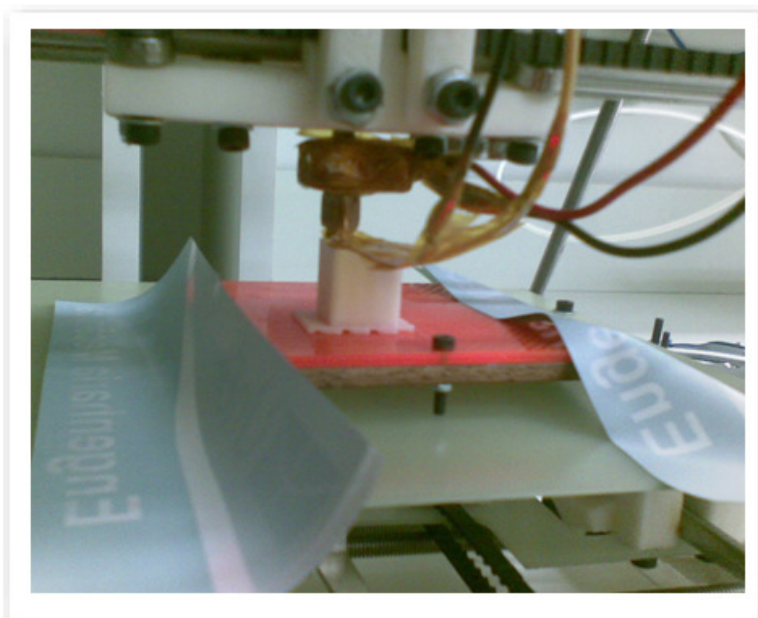


Figura 6.12: Plataforma de construção da MakerBot adaptada sobre a mesa da RepRap

Finalizada a fabricação, a peça foi retirada na plataforma e removeu-se o raft para efetuar a medição de suas dimensões com um paquímetro digital. Tomou-se três medidas de cada dimensão em posições diferentes e calculou-se a média (tabela 6.4).



Tabela 6.5 – Dimensões do cubo fabricado

<i>Eixo</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Média</i>	<i>Erro</i>
X (comprimento)	18,23 mm	18,56 mm	18,71 mm	18,50 mm	-1,50 mm
Y (largura)	19,78 mm	19,87 mm	20,05 mm	19,90 mm	-0,10 mm
Z (altura)	20,21 mm	20,40 mm	20,56 mm	20,39 mm	0,39 mm

No geral, as dimensões apresentaram erros bem pequenos, indicando que a calibração inicial foi boa. O eixo Y apresentou um erro de apenas 0,1mm, que atende a meta especificada para precisão. De posse desses valores, aplicou-se a equação 5.1 para corrigir o número de passos por milímetro dos eixos X e Z, multiplicando as constantes por 20/18,5 e 20/20,39 respectivamente.

Realizada a calibração dos eixos, passou-se a buscar a otimização das configurações do Skeinforge para atingir melhor qualidade. O planejamento adotado consistiu em criar perfis diferentes no programa para cada parâmetro alterado. A maioria das pessoas escolhe uma altura de camada e uma taxa de alimentação, e então imprime um objeto de parede fina para medir a largura da parede. Com um pouco de matemática, encontra-se a razão largura/altura (L/A) e a substitui no Skeinforge. Este é um método válido, contudo faz mais sentido escolher uma altura de camada e a razão L/A, para depois ajustar a taxa de alimentação até que a impressão saia corretamente.

O motivo dessa escolha é que a altura da camada tem tudo a ver com resolução e, similarmente, L/A diz muito sobre a resistência do objeto. Basicamente, a altura e a razão L/A são características visíveis do objeto acabado e por conta disso são valores que o usuário deseja selecionar. Taxa de alimentação e taxa de fluxo, por outro lado, não dizem nada de fato sobre uma peça produzida – elas tratam mais do processo de como o objeto foi impresso do que da sua aparência final. Portanto, não há porque se preocupar com essas taxas e sim com o resultado final.

Para manter um controle das mudanças, copiou-se o perfil padrão do Skeinforge e deu-se a ele um nome descritivo com os principais valores que o identificam. O primeiro foi chamado de “0.7mm, 0.5mm, 1.8, 2.89mm” – diâmetro do bocal, altura da camada, razão L/A, diâmetro do filamento. Então se estabelece uma meta e gradativamente modifica-se os parâmetros para atingi-la, encontrando a taxa de alimentação que resulta na qualidade desejada. A fim de atingir uma resolução melhor, buscou-se menores valores para a altura da camada e variou-se a razão L/A para observar as implicações no objeto final.

A chave para a calibração de um perfil consiste na habilidade de reconhecer quando se está produzindo pouco plástico ou plástico demais. A figura 6.13 ilustra os dois casos citados. Os objetos mostrados foram retirados da internet para efeito ilustrativo – as fotos dos cubos com ABS branco não ficaram tao nítidas.

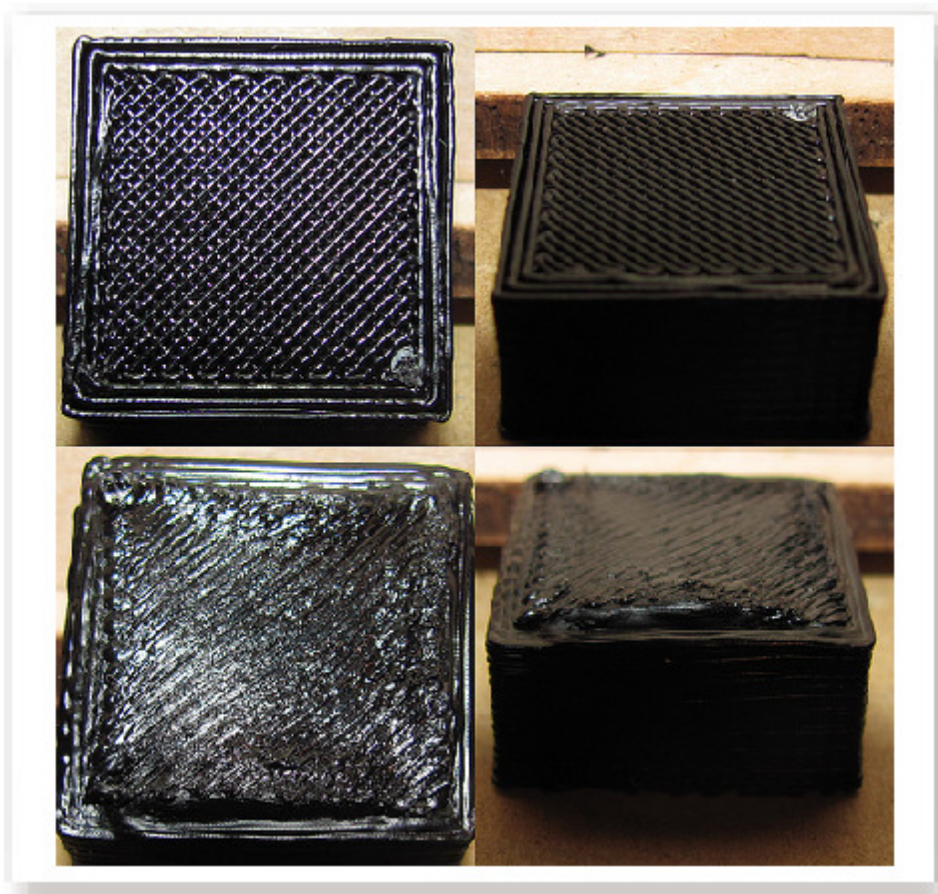


Figura 6.13: Objetos com escassez (superior) e abundância de plástico (inferior)

Na parte de cima da figura 6.13, os fios do objeto nem mesmo se tocam e é possível ver as camadas inferiores. O perfil que gerou o código dessa peça não estava depositando material suficiente para gerar uma impressão sólida e resistente. Na foto de baixo, há várias protuberâncias e os fios estão ondulados, pois a extrusora empurrou plástico demais em uma área muito pequena. Se essa peça possuísse furos para encaixe de parafusos, por exemplo, precisaria de muito retrabalho para possibilitar a montagem.

A configuração da taxa de velocidade é baseada nos resultados observáveis, então foi assumida a seguinte lógica: altura ou  $L/A$  do objeto produzido menor que o especificado implica em incremento da velocidade; altura ou  $L/A$  maior implica em decréscimo; variar a velocidade entre 3 e 4 mm/s para cada variação de 0,01mm na altura; variar a velocidade em 5 mm/s para cada variação de 0,1 na razão  $L/A$ . A medida que se aproxima de resultados satisfatórios, as variações vão se tornando menores.

A observação do processo de fabricação é essencial para descobrir quais fenômenos estão ocorrendo exatamente para atingir aquele resultado final. Geralmente, as primeiras camadas podem apresentar alguns problemas porque nem sempre a altura inicial está bem configurada, mas depois de algumas deposições a maioria dos problemas é corrigido. Além disso, é importante manter um histórico das modificações, conforme ilustra a figura 6.14, com os cubos de calibração fabricados numerados de 1 a 5.

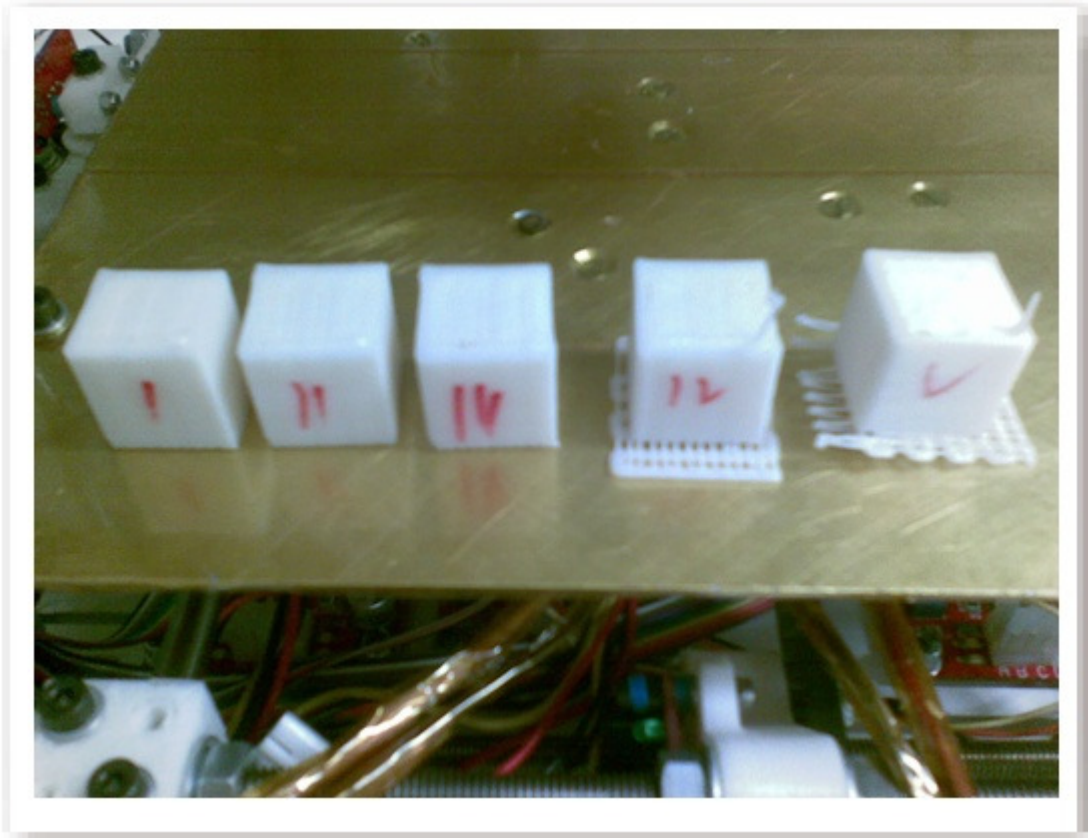


Figura 6.14. Cubos de calibração

O primeiro cubo apresentou um preenchimento muito bom, e a medida que se diminuiu a altura da camada e se aumentou a velocidade de alimentação (segundo a lógica estabelecida) o preenchimento foi se tornando mais espaçado. Concluiu-se que com o diâmetro de 0,7mm não foi possível melhorar a resolução inicial da camada de 0,5mm.

A figura 6.15 mostra os cubos de calibração que foram posteriormente fabricados com a mesa aquecida. Esperava-se atingir melhores resultados, porém o que se notou foi uma maior irregularidade na deposição das camadas. Isso pode ter sido ocasionado pelo aumento da temperatura na saída do bico extrusor, alterando a consistência dos filamentos depositados. Alguma melhoria foi obtida após ajustes sucessivos inclusive nos passos dos eixos, mas ainda necessita de maior número de testes e observações para atingir resultados satisfatórios.

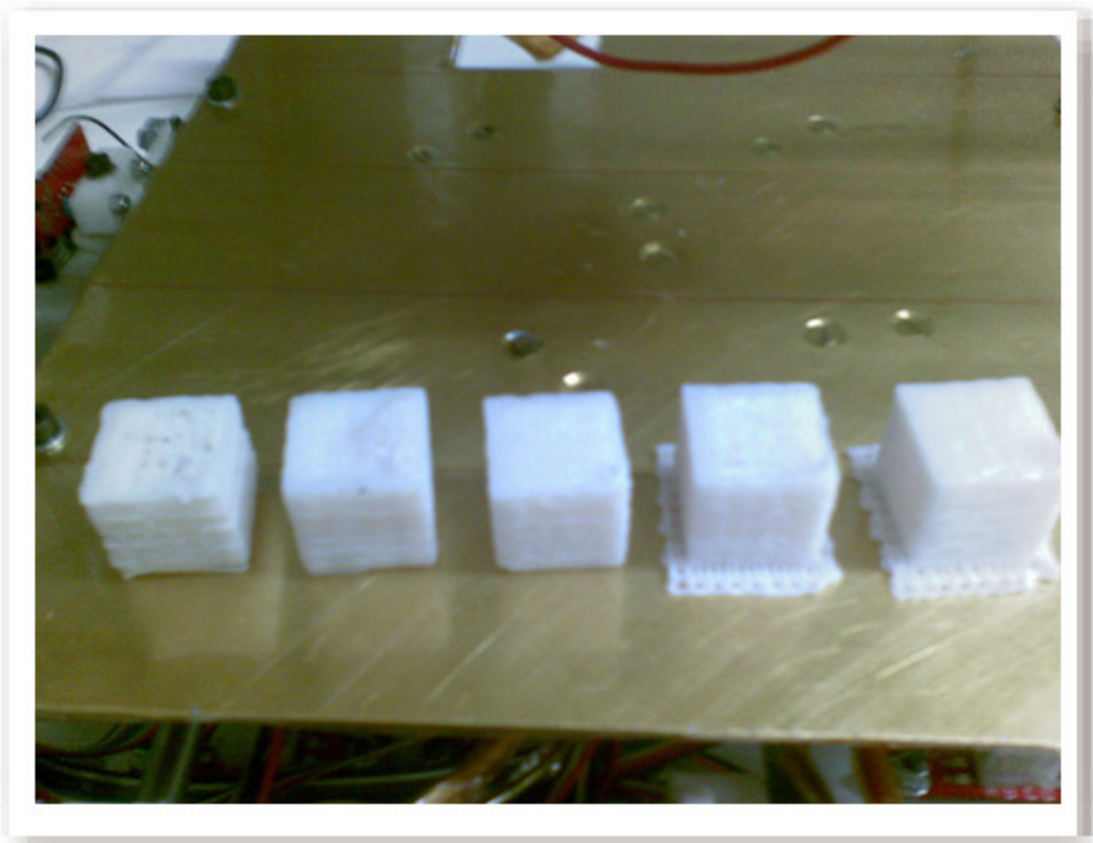


Figura 6.15: Cubos de calibração fabricados com a mesa aquecida

### 6.3.2. Tetraedro

No intuito de configurar outros parâmetros, relacionados a geometrias mais complexas, pesquisou-se no Thingiverse um objeto que desafiasse mais as capacidades da máquina, e escolheu-se o tetraedro de faces abertas da figura 6.16.

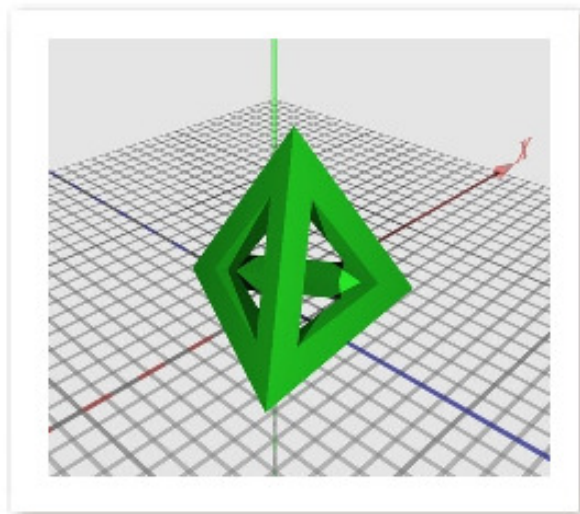


Figura 6.16. Georgehart tetrahedron-openface (Thingiverse.com)



Um dos problemas mais irritantes do processo de FDM é a formação de fios bem finos no meio da estrutura onde deveria estar vazio. Esse fenômeno não somente torna o aspecto do objeto indesejável, exigindo um trabalho de remoção desses fios, como também pode enfraquecer a sua resistência mecânica. Um dos motivos que levam a sua formação é o agarramento de parte do plástico da extrusora no último ponto em que se depositou material quando ela viaja para outro do objeto, criando um pequeno vazio onde deveria haver plástico na próxima vez que ela iniciar a deposição. Durante longas trajetórias de viagem, outro fator que influencia na formação desses fios é a gravidade, que provoca um pequeno escorrimento do plástico fundido no bocal.

Uma maneira de corrigir esse problema é através de algumas configurações do Skeinforge relacionadas à retração do plástico nesses pontos de saída e chegada em trajetórias de viagem. Basicamente, o filamento tem que ser retraído mais rápido do que sua taxa de escorrimento, mover a extrusora o mais rápido possível durante a viagem e retornar o filamento para sua posição original o quanto antes quando chegar do outro lado. Essa mudança de velocidade só é possível nas extrusoras que usam motor de passo. A figura 6.17 mostra o tetraedro fabricado sem (esquerda) e com (direita) essas configurações.

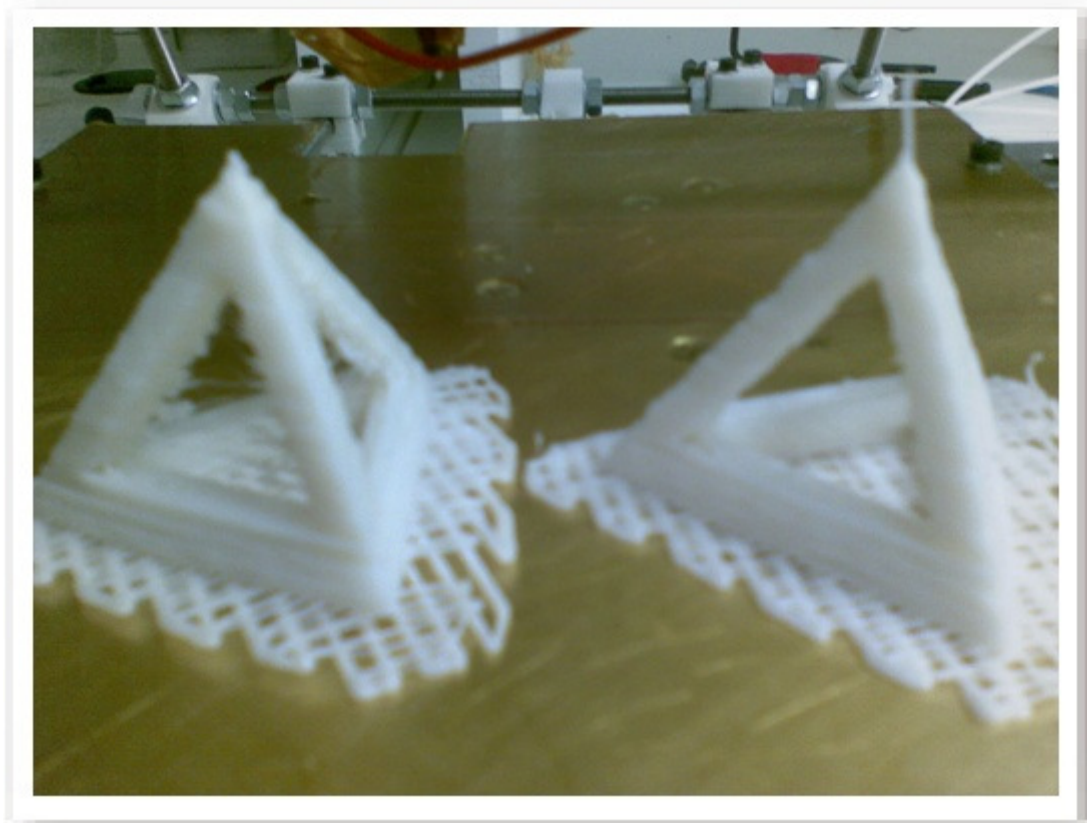


Figura 6.17: Tetraedros fabricados

Na figura 6.17 é possível observar a ocorrência de vários fios entre as arestas do tetraedro a esquerda, formando uma espécie de teia. Já no objeto da direita, impresso após a implementação das configurações de retração, essa teia não está presente. Entretanto, observa-se que há alguns pontos com falta de material nessas camadas em que se eliminou as teias. Isto mostra que a velocidade de retorno do filamento para a posição original deve ser aumentada para que não haja esse atraso.

### 6.3.3. Análise final

A construção do protótipo da RepRap Mendel e os testes realizados forneceram subsídios fundamentais para verificar se a concepção desenvolvida atende aos requisitos estabelecidos no projeto. A avaliação se baseou nos resultados dos testes, comparações com as outras máquinas de RP do laboratório e o espaço para melhorias.

A tabela 6.6 resume a análise comparativa dos requisitos. De um modo geral, os requisitos foram bem atendidos, com pequenas restrições. A última coluna da tabela apresenta os comentários pertinentes a cada um, ressaltando que há áreas onde é possível melhorar. Adicionalmente, as figuras 6.18 e 6.19 comparam a qualidade de peças fabricadas nas impressoras de baixo custo e na StratasyS.

Tabela 6.6: Avaliação dos requisitos de projeto

<i>Requisitos</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Valor obtido</i>	<i>Comentário</i>
Dimensões da máquina (mm <sup>3</sup> )	500 x 400 x 360	550 x 425 x 355	A máquina possui um tamanho pequeno para o volume de trabalho.
Volume de trabalho (mm <sup>3</sup> )	200 x 200 x 140	190x203x124	Meta praticamente atingida. O volume de trabalho da máquina é muito grande.
Potência de funcionamento	Fonte ATX de 450W	Fonte ATX e Fonte de 20V	A mesa aquecida exigiu uma alimentação maior do que o esperado, seria necessária uma revisão do seu projeto para readequação.
Operações de montagem (tempo)	Menos de uma semana	3 semanas	O grande número de componentes e a necessidade de retrabalho de muitas peças atrasou a montagem.
Peso da máquina	Em torno de 7kg	Não houve uma pesagem oficial, mas o sistema é leve o suficiente para um adulto levantar com uma mão.	
Erros de montagem	Menos de 1%	Nenhum erro significativo foi detectado.	
Interface simples para o usuário (operações de uso)	Menos de 10 operações para fabricar uma peça	Geralmente 5	1 – Carregar STL 2 – Orientar/Posicionar 3 – Configurar gerador 4 – Criar código G 5 – Executar código
Custo de aquisição da máquina	Menos de R\$2.500,00	R\$1405,00	Sem considerar custos de hora e tempo de máquina.
Custo de montagem	Menos de R\$500,00	Máquina toda montada pelo próprio aluno, ocorrendo poucos gastos imprevistos. A MakerBot completamente montada é cerca de 20% mais cara que o custo de todos os componentes parcialmente montados.	

Custo do material de fabricação das peças	Menos de R\$40,00/kg	R\$43,00/kg	Barato quando comparado a materiais de outros processos RP
Erro de posicionamento dos eixos (precisão)	Menos de 0,1mm	0,1mm	Precisão atingida.
Custo de manutenção	Menos de 5% do custo total	Difícilmente é necessário substituir componentes muito caros da máquina (5% equivale a cerca de R\$70,00)	
Vida útil	5 anos	A máquina apresenta elevada resistência, mas o período de uso foi muito curto para avaliar quantitativamente.	
Frequência de manutenção e ocorrência de falhas	1 falha a cada 200 horas de uso	Ocorreram vários travamentos da extrusora enquanto se efetuava o ajuste, mas nada provocado por falha do hardware projetado.	
Compatibilidade com sistemas operacionais	Pelo menos 3 sistemas operacionais	Windows, Linux e OSX	Os softwares são open source e ativamente desenvolvidos por uma grande comunidade.
Número de componentes padronizados	90% disponível no comércio local	88%(*)	Considerando os itens prototipados como padronizados, uma vez que há fornecedores, pode-se dizer que a meta foi atingida
Arestas cortantes, fios e elementos quentes expostos	Nenhum	1	A mesa aquecida é o único elemento de risco. Poderia-se isolar o ambiente de trabalho com um tecido resistente ao calor.
Nível de ruído	Menos de 80dB	-	Não foi obtido um sensor para o teste. A máquina apresentou nível de ruído inferior ao da MakerBot.
Velocidade dos eixos	X,Y: 2000mm/min Z: 100mm/min	X, Y: +2000mm/min Z: 50mm/min	O eixo Z é o único com velocidade restrita, mas a sua movimentação não é um limitante para a qualidade de impressão.
Diâmetro do bico da extrusora	Menos de 0,6mm	0,7mm	O bocal de 0,5mm foi fabricado mas ainda não foi testado na máquina.
Espessura da camada produzida	Em torno de 0,4mm	0,5mm	Limitada pelo bocal de 0,7mm.
Materiais de trabalho	PLA, HDPE, ABS	ABS	Apenas ABS disponível para teste.
Velocidade de extrusão	15cm³/h	19cm³/h	Meta atingida com folga.

(\*)Não se levou em conta a quantidade de itens repetidos na lista de materiais, pois somente pelo número de arruelas a meta seria atingida.

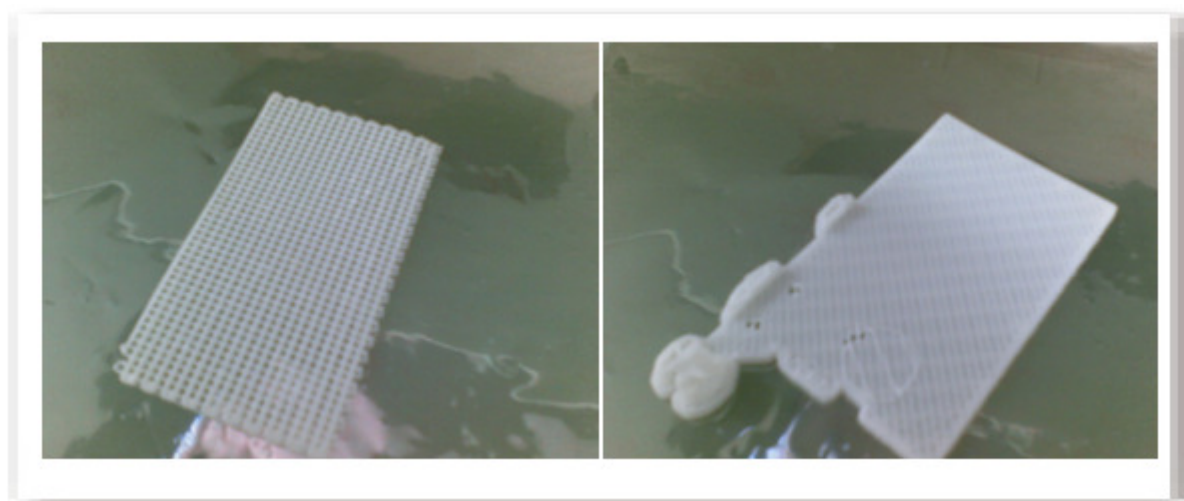


Figura 6.18: Raft produzido pela Makerbot (direita) e estrutura de suporte da Stratasys.



Figura 6.19. Mesmo objeto fabricado na Stratasys (esquerda) e na RepRap (direita)

As figuras 6.18 e 6.19 evidenciam a diferença de qualidade obtida em uma impressora de baixo custo como a RepRap e uma comercial. O uso de material de suporte diferente do material de impressão possibilita sua fácil remoção e a construção de objetos com geometrias complexas. Apesar da qualidade final em impressões mais complicadas não ser tao boa, a RepRap demonstrou ser uma máquina com muitas oportunidades de melhorias, em especial no que tange à extrusora como evidenciaram os testes. O bocal utilizado para os testes foi fabricado com uma especificação inferior ao que foi projetado, acarretando na maioria das deficiências.

Embora tenha sido experimentado por pouco tempo, foi possível avaliar as capacidades do equipamento. Quanto ao processo, os sensores de fim de curso permitiram uma automação da fabricação das peças em um nível superior do que se tinha na MakerBot, na qual era necessário efetuar o zeramento das posições iniciais a cada nova impressão. A RepRap conta com um firmware que oferece um grande leque de parâmetros que o usuário pode configurar para se adequar ao hardware implementado, ou seja, ela pode ser tão boa quanto se investe tempo para otimizá-la.

## 7 CONCLUSÃO

Este projeto ajudou a demonstrar o potencial da nova geração de máquinas de prototipagem rápida de baixo custo. No momento, elas ainda não se apresentam em um estágio comparável aos melhores produtos comerciais, mas a relação custo benefício é inegavelmente um atrativo sedutor não só para usuários domésticos ou acadêmicos como também pequenos e médios empreendedores. Vale ressaltar a contribuição das metodologias e ferramentas de apoio ao longo do processo do projeto que nortearam as decisões tomadas durante o desenvolvimento do conceito do protótipo da máquina que seria construída. Espera-se que o método utilizado contribua para uma melhor base de preparação e organização em futuras implementações, não só do projeto RepRap, mas impressoras 3D em geral.

Diante dos resultados obtidos com a máquina de prototipagem rápida, constata-se que o seu desenvolvimento atingiu um estágio satisfatório. Com base na avaliação do produto e nos testes realizados, ficou evidente o bom desempenho no cumprimento das metas especificadas. Apesar do processo trabalhoso de ajustes e configurações para geração do código G mais eficaz, foi possível verificar a grande capacidade do equipamento. Os erros dimensionais identificados são da ordem do décimo do milímetro, e geometrias simples são reproduzidas com fidelidade considerável.

A tecnologia apresentada em muito contribui para a redução de custos de projeto e no futuro substituirá processos de fabricação convencional, a medida que novas técnicas são criadas e diferentes tipos de materiais ficam a disposição. Durante o desenrolar do projeto, acompanhou-se nas comunidades de usuários um exponencial crescimento da participação dos membros no desenvolvimento de soluções inovadoras, que trazem ganhos de performance e redução de custos.

Nesse contexto, acredita-se que foi estabelecida uma boa plataforma de aprendizado e oportunidade de melhorias futuras. Ao longo do texto alguns campos para otimização foram comentados, principalmente no que diz respeito à extrusora, que é o maior limitante do sistema. Esses campos se relacionam com o aperfeiçoamento da estrutura que reduza a exigência do torque, proporcione um fluxo contínuo e preciso de material, e aumente a velocidade de fabricação. Outras pendências ficam por conta do sistema de aquecimento da mesa e inclusão de material de suporte.

Os próximos trabalhos a serem realizados sobre o tema podem se concentrar tanto no aperfeiçoamento dos sistemas mecânicos como em um estudo mais profundo dos parâmetros de configuração para geração de código G e estabelecimento de algoritmos de processamento que proporcionem uma qualidade mais elevada, permitindo a reprodução de geometrias complexas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3DSYSTEMS. *25 Years of Innovation – the journey of a lifetime*. Disponível em: <<http://www.3dsystems.com/content/news/25th-anniversary/>>. Acesso em: maio de 2011.

3DSYSTEMS. Viper si2 Product Details. Disponível em: <[http://www.3dsystems.com/products/datafiles/viper/datasheets/Viper\\_final\\_rev\\_0303.pdf](http://www.3dsystems.com/products/datafiles/viper/datasheets/Viper_final_rev_0303.pdf)>. Acesso em: maio de 2011

ARTIS. *Tecnologias de prototipagem - estereolitografia SLA*. Clínica de Odontologia Integrada Artis, Brasília/DF. Disponível em: <http://www.artis.com.br>. Acesso em: maio de 2011.

BADOTTI, Alexandre Vilas Boas. *Avaliação do processo de metalização superficial aplicado às peças obtidas por estereolitografia*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BENYUS, Janine (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York, NY, USA: William Morrow & Company, Inc.

CAPUANO, E. A. P. CARVALHO, M. M. *Prototipagem Rápida: a escolha da tecnologia PR mais adequada à estratégia para o desenvolvimento de produtos*. In: ENEGEP, 2000, Rio de Janeiro. Anais Eletrônicos. Disponível em: <[www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000\\_E0001.PDF](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000_E0001.PDF)>. Acesso em: maio de 2011.

CARVALHO, Jonas de ; VOLPATO, N. . *Prototipagem rápida como processo de fabricação*. In: Neri Volpato. (Org.). *Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações*. 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2007, v. 1, p. 1-15.

CIMJECT. *Conhecimento RP: 3DP – 3D Printing*. Disponível em: <[http://cimject.ufsc.br/knowledge/09\\_knowledge\\_3DP.htm](http://cimject.ufsc.br/knowledge/09_knowledge_3DP.htm)>. Acesso em: maio de 2011.

DIMENSION PRINTING. *uPrint Product Specifications*. Disponível em: <<http://www.dimensionprinting.com/3d-printers/printing-productspecs-uprint.aspx>>. Acesso em: maio de 2011

EFUNDA. *Rapid Prototyping: An Overview*. Efunda Engineering Fundamentals. Disponível em [http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/intro.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm). Acesso em: maio de 2011.

FERREIRA, J. M. G. C.; ALVES, N. M. F.; MATEUS, A. J. S.; CUSTÓDIO, P. M. C. *Desenvolvimento integrado de produtos e ferramentas por metodologias de engenharia inversa e prototipagem rápida*. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Florianópolis, 2001.

GORNI, Antonio Augusto. *Introdução à prototipagem rápida e seus processos*. Antonio Gorni On Line. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>. Acesso em: maio de 2011.

GRIM. *3D Printer Benchmark 2010*. Disponível em: <http://www.tagrimm.com/benchmark-2010/>. Acesso em: junho de 2011.

GRIMM, Todd. *Choosing the Right RP System*. A study of seven RP systems, 2005.

GRIMM, Todd. *Rapid prototyping benchmark: 3D printers*. T. A. Grimm Associates Inc. Outubro, 2003. Disponível em: <http://www.tagrimm.com/benchmark>. Acesso em: maio de 2011.

KUSIAK, Andrew. *Concurrent engineering: automation, tools and techniques*. New York: John Wiley & Sons, 1993.

NEVIS, J. L. *Concurrent Design of Products and Processes*. McGraw-Hill Publ. Co, NY, 1989.

PALM, William. *Rapid Prototyping Primer. The learning factory*. Disponível em: <http://www.mne.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm>, 1998. Acesso em: maio de 2011.

PHAM, D. T.; GAULT, R. S. *A comparison of rapid prototyping technologies*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, No. 38, p. 1257-1287, 1998.

ROZENFELD, H. et al. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos – uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva, 2006.

WOZNY, M. J., CAD and Interfaces, JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, Setembro/1997.

Z CORPORATION. *Low-Cost 3D Printer. Informação sobre equipamentos*. Disponível em: <http://www.zcorp.com> Acesso em: junho 2011.

PAHL, G.; BEITZ, W. (1996) - *Engineering design: a systematic approach*. 2nd ed. London: Springer-Verlag.

WOHLERS. *Wohlers Report 2008 – Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*.