

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ERNESTO ABEL FERNANDO FRIEDMANN PALLAROLAS

**REVISÃO TÉCNICA DE PROCESSOS MANUFATURA ADITIVA E  
ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES PARA ESTRUTURAS DE IMPRESSORAS  
TRIDIMENSIONAIS**

São Carlos

2013



ERNESTO ABEL FERNANDO FRIEDMANN PALLAROLAS

**REVISÃO TÉCNICA DE PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA E  
ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES PARA ESTRUTURAS DE IMPRESSORAS  
TRIDIMENSIONAIS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Orientadora: Profa.Dra.Zilda de Castro Silveira

São Carlos

2013

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

P454r

Pallarolas, Ernesto Abel Fernando Friedmann  
Revisão técnica de processos de manufatura aditiva  
e estudo de configurações geométricas, para estruturas  
de impressoras tridimensionais / Ernesto Abel Fernando  
Friedmann Pallarolas; orientadora Profa. Dra. Zilda de  
Castro Silveira. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2013.

1. Metodologia de Projeto. 2. Impressão  
Tridimensional. 3. Design. 4. Método de ponderação. 5.  
Configurações de Estruturas de Máquinas. I. Título.

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato (a): Ernesto Abel F. Friedmann Pallarolos

Título:

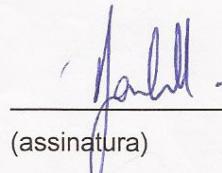
Revisão técnica de processos de manufatura additiva e  
estudo de configurações para soluções de impressoras tridimensionais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecânica.

### BANCA EXAMINADORA

Profa. Assessoria profs de Carvalho

Nota atribuída: 8,5 (oito e meio)



(assinatura)

Prof. Dr. Alessandro Rogr Rodrigues

Nota atribuída: 8,5 (oito e meio)



(assinatura)

Profa. Dra. Zilda de C. Silveira

(orientador(a))

Nota atribuída: 8,5 (oito e meio)



(assinatura)

Média: 8,5 (oito e meio)

Resultado: Aprovado

Data: 09/12/2013

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM  NÃO  Visto do orientador



## RESUMO

Pallarolas, E. A. F. F. **Revisão técnica de processos de manufatura aditiva e estudo de configurações geométricas, para estruturas de impressoras tridimensionais.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

Neste trabalho é apresentada uma revisão sobre as tecnologias utilizadas em prototipagem rápida e tendências de máquinas de manufatura aditiva. A manufatura aditiva tem apresentado uma importante evolução como filosofia e método de geração de peças em suas mais diversas formas de apresentação. Inicialmente, a Prototipagem Rápida -PR (termo utilizado na indústria e na área técnica) gerava predominantemente objetos tridimensionais para avaliação visual já nos dias de hoje o termo “Manufatura Aditiva – MA” define de forma mais ampla as tecnologias de PR e a filosofia desse processo por adição. Paralelamente ao desenvolvimento das máquinas industriais de manufatura aditiva surgiram máquinas de impressão tridimensionais de pequeno porte (*desktop*) de estrutura aberta, voltadas para usuários hobbistas e recentemente para laboratórios de pesquisa.

Neste contexto, é apresentado um estudo conceitual sobre metodologias de escolha de soluções em um projeto de engenharia, na busca de estabelecer de maneira organizada qual é a melhor alternativa, dentre uma lista de possíveis soluções, para atender as necessidades e objetivos do projeto.

São apresentados os principais tipos de processos utilizados em prototipagem rápida, definições sobre manufatura aditiva, tipos de configurações de máquinas convencionais e de estruturas geométricas de robôs e um estudo conceitual de possíveis novas configurações geométricas do esqueleto da impressora 3D, que possam atender a essa nova demanda de máquinas de impressão tridimensional *desktop*, utilizando técnicas de metodologia de projeto.

**Palavras-chave:** Metodologia de projeto. Impressão tridimensional. Design. Método de ponderação.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>9</b>
1.1	OBJETIVO .....	13
<b>2</b>	<b><u>REVISÃO DA LITERATURA</u></b>	<b>14</b>
2.1	CONCEITOS SOBRE PROTOTIPAGEM RÁPIDA E MANUFATURA ADITIVA .....	14
2.2	BREVE VISÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA .....	17
2.3	MÁQUINAS DE IMPRESSÃO 3D COMERCIAIS.....	19
2.3.1	MÁQUINAS E PROCESSOS MAIS USUAIS.....	19
2.3.1.1	SLS (“Selected Laser Sintering”) .....	19
2.3.1.2	SLA (“Stereolithography Apparatus”) .....	24
2.3.1.3	Impressão 3-D Aglutinante .....	28
2.3.1.4	LENS (“Laser Engineering Net-Shape”).....	29
2.3.1.5	FDM (“Fused Deposition Modeling”).....	31
2.3.2	OUTROS SISTEMAS.....	36
2.3.2.1	“Contour Crafting” – CC (Construção por Contornos) .....	36
2.3.2.2	Sistemas não planares.....	39
2.4	MATERIAIS PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL .....	41
2.4.1	DEFINIÇÃO DE POLÍMERO.....	41
2.4.2	USO DE MATERIAIS CERÂMICOS COM TECNOLOGIA FDM.....	46
2.5	DESAFIOS TÉCNICOS DA IMPRESSÃO .....	46
<b>3</b>	<b><u>CONSIDERAÇÕES SOBRE METODOLOGIA DE PROJETO</u></b>	<b>50</b>
3.1	VISÃO DO PROJETO DE ENGENHARIA .....	50
3.1.1	DIRETRIZ METODOLÓGICA RESULTANTE .....	58
3.2	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM PRODUTO .....	61
3.2.1	REQUISITOS E NECESSIDADES .....	61
3.2.2	SELEÇÃO DE IDEIAS PARA UM PROJETO .....	65
3.2.3	PROCESSO DE SELEÇÃO E AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES .....	65
3.2.3.1	Seleção de variantes de soluções apropriadas .....	65
3.2.3.2	Avaliação das variantes da solução.....	70

3.2.4	FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO .....	71
3.2.4.1	Identificação de critérios de avaliação.....	72
3.2.4.2	Composição de parâmetros .....	76
<b>3.3</b>	<b>ESTIMATIVAS DAS INCERTEZAS DA AVALIAÇÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>4</b>	<b><u>ESTUDO DE CASO .....</u></b>	<b>83</b>
<b>5</b>	<b><u>ESTUDO DE CONFIGURAÇÃO IDEAL PARA A ESTRUTURA DE UMA IMPRESSORA 3D .....</u></b>	<b>88</b>
<b>5.1</b>	<b><u>ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES DE MÁQUINAS CONVENCIONAIS E ESTRUTURAS DE ROBÔS .....</u></b>	<b>88</b>
5.1.1	ESTRUTURAS DE MÁQUINAS CONVENCIONAIS .....	88
5.1.1.1	Estrutura de Pórtico (“Gantry-Type”) .....	88
5.1.1.2	Estrutura tipo “C” ou de coluna (“Column-Type”).....	89
5.1.1.3	Estrutura tipo “U” ou Ponte rolante (“Moving Bridge”) .....	90
5.1.2	ESTRUTURAS ROBÓTICA.....	91
5.1.2.1	Robô cartesiano .....	91
5.1.2.2	Robô Cilíndrico .....	92
5.1.2.3	Robô SCARA (“Selective Compliance Assembly Robot”).....	93
5.1.2.4	Robô Articulado ou Antropomórfico .....	94
<b>5.2</b>	<b><u>APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PONDERAÇÃO .....</u></b>	<b>95</b>
5.2.1	LISTA DE REQUISITOS .....	96
5.2.2	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO .....	99
5.2.3	LISTA DE SELEÇÃO .....	100
5.2.4	IDENTIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO .....	102
5.2.4.1	Análise da relevância para o valor global.....	103
5.2.5	COMPOSIÇÃO DE PARÂMETROS.....	105
5.2.6	SOLUÇÃO PROPOSTA .....	107
<b>6</b>	<b><u>CONCLUSÕES .....</u></b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente uso da eletrônica e da tecnologia da informação em máquinas-ferramentas e dispositivos mecânicos, o avanço na área do desenvolvimento de novos materiais de engenharia é um item de constante análise e tomadas de decisões no desenvolvimento de projetos de engenharia. Portanto, a multidisciplinaridade é a forma que o projeto de engenharia se molda nos dias atuais. O conjunto de conhecimentos utilizados agrupa valor ao produto, seja ele um bem de consumo, componente mecânico, dispositivo, uma máquina, um equipamento, um processo ou até mesmo um serviço.

O ciclo de desenvolvimento do projeto, inserido no ciclo de vida do produto, deve ser desenvolvido de forma sistemática, muitas vezes incorporando informações provenientes do usuário final ou “cliente” e integrando diferentes conceitos técnicos, numa implementação multidisciplinar.

Dentre as tecnologias de suporte ao desenvolvimento do projeto do produto, destaca-se a Manufatura Aditiva (MA). Esta tecnologia tornou-se comercial na década de 1980, tendo sido inicialmente denominada Prototipagem Rápida (PR) – Segundo Liou (2007), prototipagem rápida pode ser definida como o processo de construção de um modelo físico a partir de um projeto (CAD), utilizando uma classe especial de máquinas. Já Raja e Fernandes (2008), definem RP como uma classe de tecnologias que são usadas para produzir objetos físicos, camada por camada, diretamente de sistemas CAD. Nesses sistemas os modelos (peças), são construídos por camadas até adquirir a forma final, não havendo necessidade de utilizar qualquer tipo de ferramentas. Essas camadas representam a seção transversal da peça e podem ser formadas por partes sólidas processadas, líquidos ou pós. As primeiras técnicas de prototipagem rápida surgiram com o objetivo de oferecer uma solução para materialização automática, com o uso de recursos gráficos computacionais, gerando protótipos de apoio no processo de desenvolvimento de produtos. Neste contexto, as principais características da Prototipagem Rápida eram a geração e obtenção de protótipos físicos, com maior foco na visualização do “objeto”, de forma rápida e padronizada.

Com a evolução da tecnologia e as novas demandas de produtos, a aplicação da tecnologia da prototipagem rápida também evoluiu deixando o âmbito da mera visualização para soluções funcionais. Com isso, o projeto de modelos virtuais passou a considerar a materialização, com a finalidade também de contemplar as funções previstas no Projeto do Produto. A ASTM (“American Society for Testing and Materials”) adotou o termo “Manufatura Aditiva” para processos aditivos, combinando materiais camada-por-camada e, utilizam técnicas de prototipagem rápida (GIBSON et al., 2010). Assim, na Manufatura Aditiva um modelo é gerado, a partir de um sistema tridimensional (CAD-3D) sendo fabricado diretamente sem a necessidade de planejamento de processo. As mesmas técnicas de prototipagem rápida podem ser usadas para a fabricação de ferramentais, um processo também conhecido como ferramentaria rápida, ou seja, a fabricação automática de ferramentas, para uso na produção em série.

As primeiras tecnologias de prototipagem rápida, limitadas por uma pequena faixa de materiais viáveis utilizados para se gerar objetos com maior resistência mecânica, limitavam o uso de protótipos rápidos como objetos tridimensionais para uma avaliação mais visual e de alguma funcionalidade. Com o avanço de tecnologias promovidas pela viabilidade de implementação de diferentes princípios físicos e químicos e o desenvolvimento de novos materiais, a aplicação da MA extrapolou o segmento industrial, para áreas multidisciplinares.

Alguns dos desafios técnicos da impressão tridimensional de forma geral são: obtenção de sistemas de geração com maior precisão dimensional, repetibilidade na movimentação, uso de materiais, como cerâmicas, compósitos, bio-polímeros e a obtenção de melhores propriedades mecânicas, térmicas e físicas, para polímeros industriais. O uso de materiais metálicos, também se desenvolve buscando-se tecnologias mais apropriadas, para se obter precisão e estabilidade dimensionais.

A Figura 1.1 apresenta dados relacionados com o termo “*3-D printing*” - no site da Google ® Trends. Pode-se observar que nos dois últimos anos (2012-2013), há uma tendência crescente de interesse em impressão tridimensional, concentrado principalmente na América do Norte.

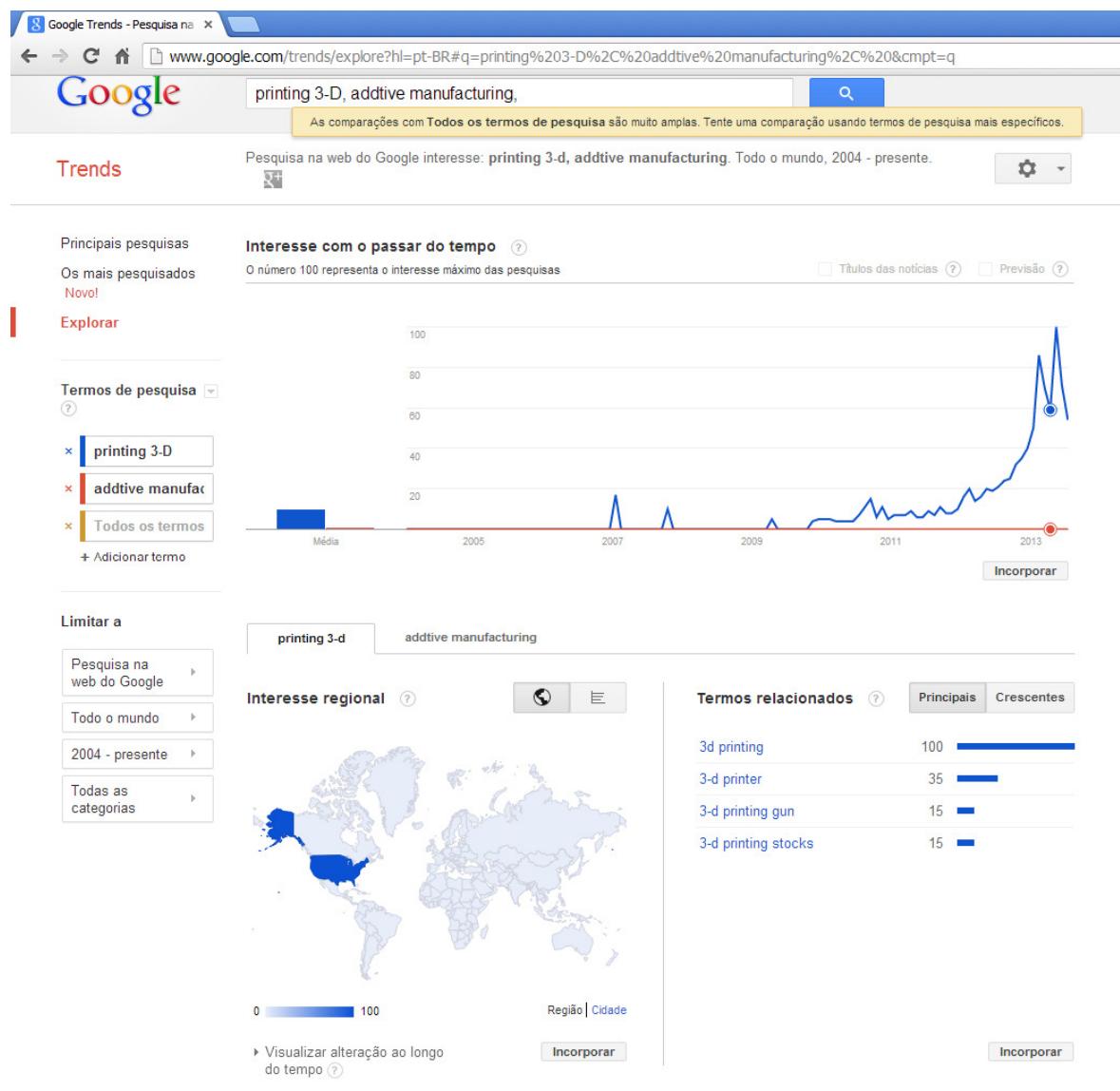


Figura 1.1 – Busca pelo conteúdo “3-D Printing” (Impressão tridimensional) mundial

Fonte: Google (2013)

Considerando o grau de desenvolvimento e potenciais aplicações da manufatura aditiva, os EUA se destacam como um dos principais desenvolvedores e usuários, representados pelas empresas desenvolvedoras de soluções de projeto e fabricação de máquinas dedicadas a MA, como a 3-D Systems e Stratasys®. Na Europa, também há desenvolvimento significativo em softwares de geração de arquivos para as máquinas de MA, como por exemplo, a *Materialize®* - Bélgica e a empresa alemã EOS desenvolvedora de várias tecnologias de MA.

A figura 1.2 apresenta a distribuição do uso da manufatura aditiva na indústria. Denota-se um uso acentuado na indústria automotiva e um aumento crescente para outras diversas áreas.

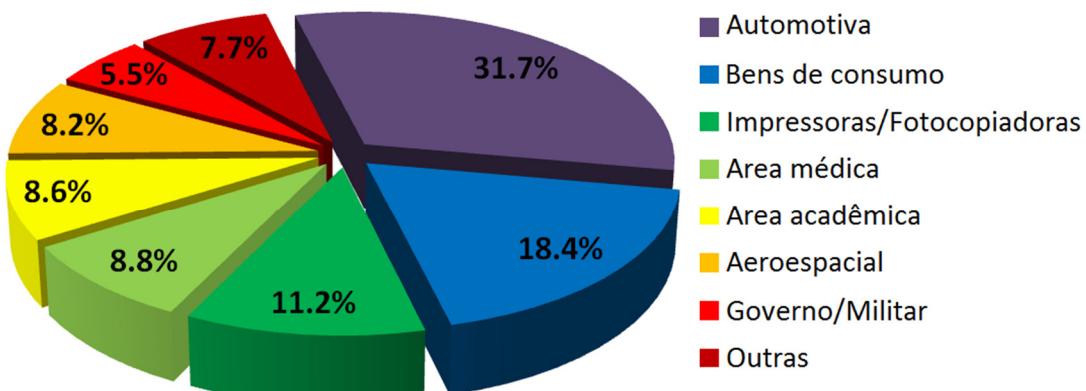


Figura 1.2 – Segmentos de aplicações de protótipos rápidos

Fonte: <http://3dprintingformanufacturing.wordpress.com> (Acesso: 12/11/2013))

A Figura 1.3 mostra uma estimativa de crescimento em bilhões de dólares para o mercado mundial de MA em até 2025.

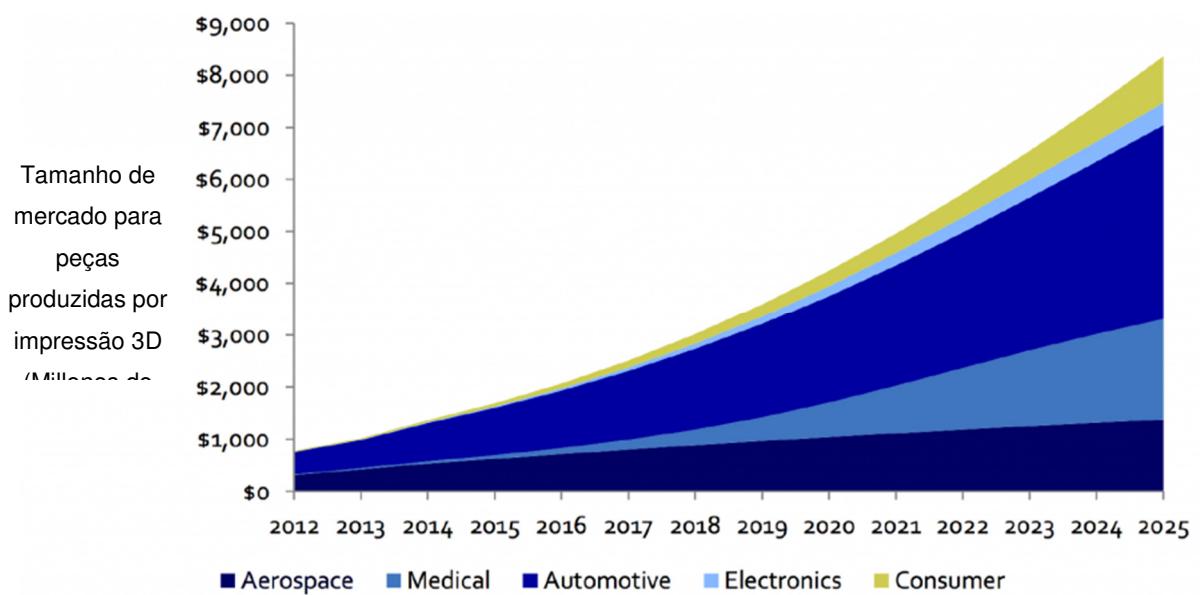


Figura 1.3 Estimativa de crescimento para o mercado de MA

Fonte: Lux Reserch Inc. (Acesso: 12/11/2013)

A Divisão de Tecnologias Tridimensionais - DT3T do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer - CTI localizado na cidade de Campinas - SP, atualmente concentra o maior número de máquinas comerciais de manufatura aditiva da América Latina. A partir de uma parceria de pesquisa iniciada em 2010, entre o Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo e o CTI foi desenvolvido o projeto e a validação experimental de um cabeçote de impressão 3-D, baseado em uma rosca de seção variável, a partir da tecnologia FDM (*"Fused Deposition Modeling"*). O cabeçote foi concebido para fins de pesquisa com polímeros industriais e bio-polímeros. Entretanto, a estrutura básica de suporte montada, a partir do projeto Fab@Home apresenta limitações de volume de material e de trabalho, gerando protótipos de escalas reduzidas.

A melhoria do projeto mecânico básico de impressoras 3-D, para conformação da matéria prima polimérica, com base na tecnologia de MA, em especial impressão 3-D por processo de extrusão pode conferir aos protótipos funcionais, por exemplo, maior precisão, resistência mecânica, repetitividade de processo e a possibilidade de aumentar as dimensões dos objetos imprimíveis.

Portanto, neste trabalho é proposto um estudo sobre possíveis configurações de estruturas para impressoras 3D *desktop*, com o objetivo de atender seu uso em ambientes de graduação e pesquisa, permitindo maior flexibilidade de movimentação e protótipos de maiores dimensões.

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é obter configurações viáveis e potencialmente viáveis de estruturas para impressoras 3-D portáteis “Open Source” utilizando ferramentas sistemáticas de metodologia de projeto.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Conceitos sobre Prototipagem Rápida e Manufatura Aditiva

O processo de desenvolvimento do projeto está inserido no ciclo de desenvolvimento de um produto. Nesta fase, há etapas específicas, porém correlacionadas que transformam uma necessidade de melhoria ou de uma nova solução em um produto definido e manufaturável.

O uso de tecnologias de apoio à engenharia, mais especificamente, os sistemas CAD (“*Computer Aided Design*”) representou inicialmente, uma sistematização do desenho técnico mecânico ou “prancheta eletrônica”, que reduziu significativamente o tempo da elaboração dos desenhos técnicos, para fabricação e montagem.

Através das últimas décadas, os sistemas CAD foram continuamente melhorados quanto aos algoritmos de construção e processamento dos modelos computacionais, e integrados a outros sistemas de engenharia, como CAE (“*Computer Aided Engineering*”) e CAM (“*Computer Aided Manufacturing*”). Na década de 70, a tecnologia CNC (“*Control Numeric Command*”) causou uma mudança gradativa nos processos de usinagem com remoção (subtração) de material, O uso do CNC e sua melhoria recente representada pela tecnologia HSC (“*High Speed Cutting*”), tornaram os processos de fabricação mais flexíveis, minimizando os erros humanos, aumentando a produtividade, reduzindo os restos e processamento posterior, assim como permite a fabricação das geometrias (partes) mais complexidade.

Às exigências de produção e características geométricas citadas anteriormente somam-se grupos de produtos, os quais possuem uma produção em pequeno número ou mesmo uma fabricação personalizada, geometrias ainda mais complexas, bem como aplicações específicas de pesquisa. Na metade dos anos 80, do século XX surgiu a Prototipagem Rápida (RP), um termo que definia um grupo de tecnologias que literalmente construíam protótipos na fase inicial do

desenvolvimento de um produto materializado de forma rápida e automática (CAMPBELL et al. 2012).

Prototipagem Rápida (PR) é um termo que a indústria de manufatura tem discutido por muitos anos. Definida na metade dos anos 80, a PR foi utilizada para descrever uma série de tecnologias, que constrói protótipos de produtos nos estágios iniciais do desenvolvimento do projeto de uma maneira rápida e automatizada. Uma variedade de diferentes técnicas combina essencialmente camadas planas de materiais dispostas sequencialmente para formar um objeto sólido tridimensional (INFORÇATTI NETO, 2013).

Segundo Campbell et al. (2012) não há referência do termo “Prototipagem Rápida” que faça alusão a uma abordagem genérica como manufatura “baseada em camadas”. Pode-se observar que, a aplicação atual desta tecnologia vai muito além de uma simples prototipagem. A partir da introdução das tecnologias chave, o desenvolvimento da PR tem sido fundamentalmente incremental. As primeiras máquinas incluíam cura por fotopolimerização. Luo et al. (2002) citam que a primeira máquina comercial de PR, a “*Stereolithography Apparatus*” - SLA que foi comercializada em 1988. Posteriormente, outros processos de PR foram se desenvolvendo como a sinterização seletiva a laser (SLS); modelagem por fusão e deposição (FDM) desenvolvida pela empresa Stratasys® e laminação por folhas (LOM) desenvolvida pela Helisys®. Todas essas tecnologias ainda são utilizadas, com exceção do LOM em função do excesso de material utilizado no processo. Em 1993, foi incluída a deposição baseada em partícula e a impressora 3-D licenciada pelo MIT.

O conhecimento e a experiência adquiridos ao longo dos últimos anos têm impulsionado o que se desenha como “indústria de impressão tridimensional” a desenvolver impressoras tridimensionais, para aplicações em diversas áreas com custos reduzidos. O objetivo primário das tecnologias de PR foi a produção de modelos prototipados, o seu desenvolvimento inclui novas soluções construtivas e manufatura direta de produtos de consumo (INFORÇATTI NETO, 2013)

Grande parte das tecnologias comerciais tem atuado em melhorias de desempenho operacional, como controle de velocidade dos eixos de deslocamento, precisão dimensional e propriedades dos materiais. O aumento de interesse das indústrias e centros de pesquisa promove a redução do custo de aquisição destas máquinas voltadas a PR e, ainda amplia sua faixa de aplicações. O reconhecimento da indústria destas tecnologias é evidente pelo desenvolvimento de padrões através da ASTM e ISO. Campbell et al. (2012) e Gibson et al. (2010) citam o reconhecimento das tecnologias de PR, que conduziu ao uso regular do termo Manufatura Aditiva, (MA, dentro da indústria de manufatura) e Impressão 3-D para o público geral – usuários.

Com a evolução da tecnologia e as novas demandas de aplicação dos protótipos, a aplicação da tecnologia da prototipagem rápida também evoluiu deixando o âmbito da mera visualização para soluções funcionais. Com isso, o projeto de modelos virtuais passou a considerar a materialização com a finalidade de cumprimento das funções previstas no projeto. Um reflexo desta nova faceta de aplicação da tecnologia de prototipagem rápida com finalidade funcional foi à alteração da sua denominação para Manufatura Aditiva. A ASTM (“American Society for Testing and Materials”): F2792-10 adotou o termo Manufatura Aditiva, para os processos envolvendo técnicas de prototipagem rápida (GIBSON et al., 2010). Assim, na Manufatura Aditiva um modelo é gerado, a partir de um sistema tridimensional (CAD) sendo fabricado diretamente sem a necessidade de planejamento convencional de processo. A manufatura aditiva envolve a manufatura de peças complexas, através da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo CAD (CAMPBELL, 2012).

Esses desenvolvimentos da tecnologia de MA foram impulsionados por necessidades principalmente do mercado industrial. No entanto, a evolução atraiu usuários de outras áreas do conhecimento, dentre as quais se destaca a área de pesquisa, principalmente aquelas que integram aplicações interdisciplinares.

Apesar dos constantes e expressivos desenvolvimentos das máquinas comerciais de MA, raros são os casos em que elas estão perfeitamente adaptadas para aplicações em pesquisa. Essa condição ocorre principalmente devido à

flexibilidade para implementação de tecnologias emergentes e, no acesso aos protocolos de controle e funcionamento da tecnologia utilizada na máquina. Essas características dificultam o uso de máquinas comerciais como base para desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações em ambiente de pesquisa. Essas restrições sinalizaram a necessidade de desenvolvimento de equipamentos com a tecnologia de *hardware* e *software* abertos facilitando o acesso às tecnologias de manufatura aditiva, para o desenvolvimento em diversas áreas de pesquisa. Dentre estes equipamentos, podem-se destacar iniciativas como: *RepRap* e a *Fab@home*.

Com relação ao tipo de material utilizado nessas máquinas, os polímeros apresentam particular interesse devido à sua ampla faixa de aplicação. Estes materiais podem apresentar propriedades físico-químicas de especial interesse, aliadas à versatilidade de processamento, que lhes conferem um conjunto de técnicas de estruturação favorável à aplicação em MA. Além disso, alguns materiais poliméricos apresentam características favoráveis para aplicação em dispositivos com interação biológica. As técnicas de Prototipagem Rápida - RA utilizadas na MA oferecem uma vasta gama de aplicações, intensivamente em produtos industriais, bens de consumo, e recentemente em aplicações de pesquisa nas áreas da saúde, como engenharia tecidual, odontologia, engenharia de biomédica em conjunto com as especialidades da engenharia mecânica e elétrica.

## **2.2 Breve visão do desenvolvimento de tecnologias de prototipagem rápida**

A impressão como um método de construção tridimensional foi demonstrada pela primeira vez na década de 1980 mediante patentes relacionadas com o desenvolvimento da indústria de Partículas Balísticas, envolvendo simples deposição de "partículas" de material sobre uma superfície.

A primeira tecnologia comercialmente bem sucedida foi o Protótipo da Model Maker Sanders ® (hoje Solidscape ®), introduzida em 1994, que imprimia um material de cera básica que era aquecido até o estado líquido. Em 1996, a 3D

Systems entrou para a competição com a introdução do Actua 2100 ®, outra máquina de impressão à base de cera. A Actua ® foi revista em 1999 e comercializada como a ThermoJet ®.

É notável que todos os membros da primeira geração de máquinas de impressão utilizavam cera aquecida como matéria de construção ao invés de polímeros, que são mais adequados para a modelagem de peças conceito e que possuem melhores padrões de fundição.

Os métodos de impressão ligante foram desenvolvidos no início de 1990, principalmente no MIT. Eles desenvolveram o processo de impressão em 3D (3DP), em que um ligante é impresso sobre uma camada de pó para formar secções transversais das peças. Contraste deste conceito com SLS, onde um laser derrete partículas de pó para definir uma secção transversal da peça. Um sistema de recobrimento deposita logo uma camada de pó, permitindo que a máquina imprima o aglutinante para definir a seguinte seção transversal. Uma vasta gama de polímeros, materiais de metal e cerâmica foram processados desta maneira. Várias empresas licenciaram a tecnologia de impressão 3D do MIT e esta se tornou uma máquina de sucesso para desenvolvedores, entre eles ZCorp ® e Ex One ®.

Mais recentemente, o foco do desenvolvimento tem sido sobre a deposição de acrilato fotopolímero, em que gotas de monómero líquido formam-se e, em seguida, expostos a uma luz ultravioleta promovem a polimerização. A fotopolimerização é semelhante à estereolitografia, mas os desafios do processo são significativamente diferentes. A vanguarda desta segunda onda de máquinas chegou ao mercado em 2000 com a “Quadra ®” de Objet Geometries ® de Israel, seguido rapidamente pela “QuadraTempo ®” revista em 2001. Ambas as máquinas jorram um fotopolímero usando cabeçotes de impressão com mais de 1.500 bocais.

Em 2003, a 3D Systems ® lançou uma tecnologia concorrente com o seu impressora 3D InVision ®. Com tecnologia de moldagem multi-jato o sistema de impressão utilizado nesta máquina, era na verdade uma extensão da tecnologia desenvolvida com a linha ThermoJet ®, apesar da mudança na estratégia de

solidificação do material. Atualmente, as empresas continuam a melhorar e a inovar nas soluções de projetos de máquinas de MA.

## 2.3 Máquinas de Impressão 3D comerciais

### 2.3.1 Máquinas e processos mais usuais

#### 2.3.1.1 SLS (“Selected Laser Sintering”)

A sinterização seletiva a laser é baseada na fusão de materiais particulados através de uma fonte de calor fornecida por um feixe de laser. Uma das vantagens deste processo de prototipagem rápida é a possibilidade de utilizar diversos materiais como metais, cerâmicas e polímeros. Segundo Volpato (2001), existem duas abordagens para a sinterização por laser: Direta e Indireta. A direta é quando o material é sinterizado pela ação direta do laser e a indireta (somente para metais e cerâmicas) ocorre quando um material ligante é utilizado para dar forma ao objeto fabricado que posteriormente será sinterizado em um forno. Os sistemas disponíveis de sinterização a laser são similares e funcionam basicamente como o esquema apresentado na figura 2.a.1. O equipamento funciona com uma plataforma onde são depositadas camadas de pó e, para cada camada de pó depositada, um escâner de espelhos galvanométricos direcionam um feixe de laser sobre a superfície de pó, fazendo com que o só seja sinterizado e unido a camada anteriormente feita.

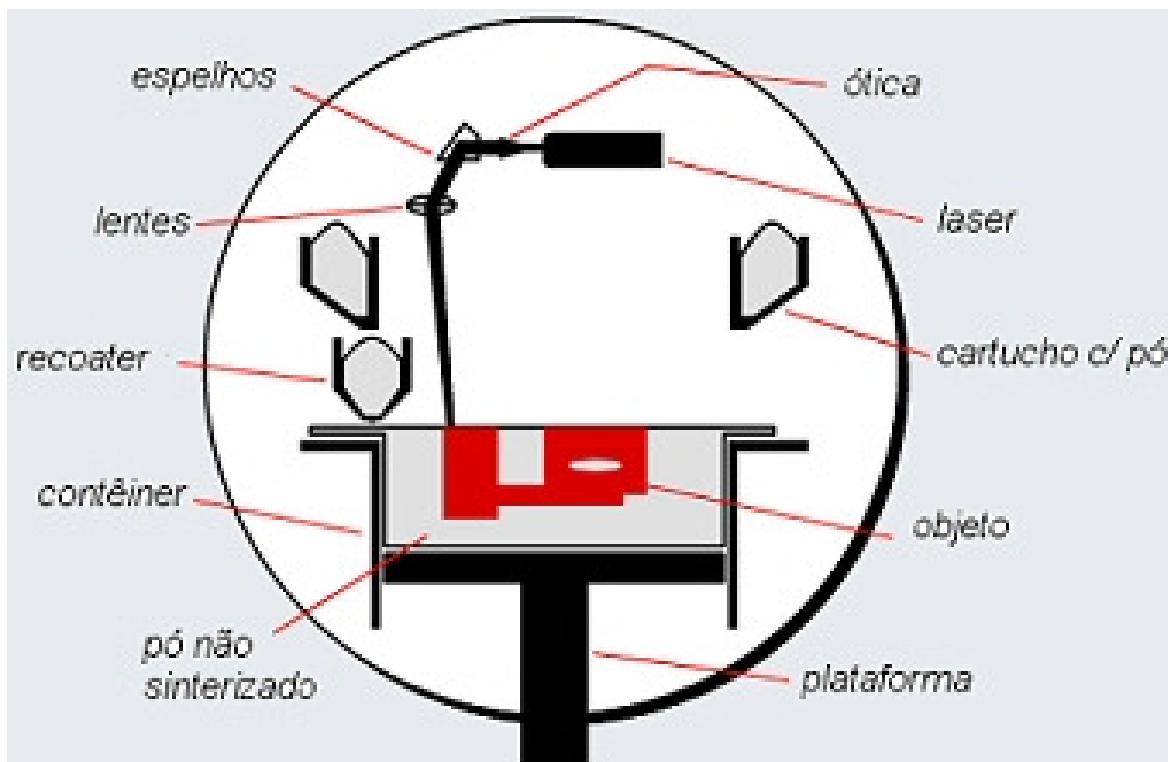


Figura 2.1 - Esquema de um sistema de sinterização a laser

Fonte: EOS ( 2002)

Atualmente existem dois principais fabricantes de equipamentos de sinterização a laser: a 3D Systems (E.U.A.) e a EOS (Alemanha). O sistema norte-americano da 3D Systems funciona para metais, cerâmicas e plásticos. No entanto a sinterização direta só ocorre para os plásticos. A EOS possui uma máquina específica para cada classe de material, sendo que a sinterização de metais e cerâmicas é diretamente realizada pelo feixe de laser para todos os materiais. O quadro 2.1 abaixo apresenta os materiais comercialmente disponíveis para a fabricação de componentes.

Quadro 2.1 - Pós comercializados atualmente para os sistemas de sinterização à laser

<b>Fabricante / tipo de material</b>	<b>3D Systems</b>	<b>EOS</b>	<b>DSM Somos</b>
<b>Metais</b>	Laserform ST-200: aço inox com recobrimento polimérico para insertos rápidos.	DirectMetal 50 & 20: mistura de níquel, bronze e fosfato de cobre	-
		DirectSteel 50 & 20: aço P20	-
<b>Cerâmicas</b>	Sandform: cerâmica recoberta com um ligante polimérico.	LaserCron: areia especial para fabricar cascás para fundição.	-
<b>Polímeros</b>	Duraform: poliamida para protótipos.	PA 2200: poliamida para protótipos.	DSM201: pó com características de elastômeros para protótipos flexíveis.
	Duraform GF: poliamida com fibra de vidro para protótipos	PA 3200 GF: poliamida com fibra de vidro para protótipos	
	Castform: poliestireno para modelos de fundição.	PrimeCast: poliestireno para modelos de fundição.	

Segundo Volpato (2001), 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.

Normalmente são encontrados dois tipos laser utilizados nos sistemas SLS: CO2 e Nd:YAG. A potência do laser necessária para sinterizar um pó varia consideravelmente com o material que está sendo processado. Além disso, outros

fatores como densidade da potência do laser e o tamanho do comprimento de onda influenciam na eficiência da sinterização. Por isso, o laser de Nd:YAG que possui um comprimento de onda de 1,06 μm, é recomendado para uso na sinterização de metais e cerâmicas. Para o laser de CO<sub>2</sub>, que tem um comprimento de onda maior (10,6 μm), a aplicação é voltada para polímeros. No entanto, isso não significa que um tipo de laser não possa ser utilizado para sinterizar outra classe de materiais. As potências dos lasers variam muito de material para material, mas 25 à 50 Watts é comumente utilizado para polímeros e de 200 à 1000 Watts para metais e cerâmicas. O perfil da intensidade do laser também influencia na sinterização, sendo que a maioria dos lasers utilizados possui uma boa aproximação para um feixe de laser gaussiano.

A velocidade de deslocamento do feixe do laser influencia na sinterização simultaneamente com a potência. A redução da velocidade caracteriza o fornecimento de maior energia ao material, fazendo com que este seja aquecido mais profundamente do que o desejado provocando, por exemplo, empenamento da peça, aumento de densidade e peça maior que o desejado (acréscimo de material devido à penetração profunda do calor do laser). Inversamente, uma velocidade demasiadamente elevada impossibilita a fusão e aderência completa do pó à camada anterior, causando alterações nas propriedades mecânicas do objeto fabricado.

Outro parâmetro que afeta a sinterização do material é o espaçamento entre cada "passada" do feixe do laser. A correta sobreposição das passadas auxilia na fusão do material proporcionando uma união mais homogênea. A figura 2.2 apresenta como os parâmetros influenciam na união do material interagindo entre si.

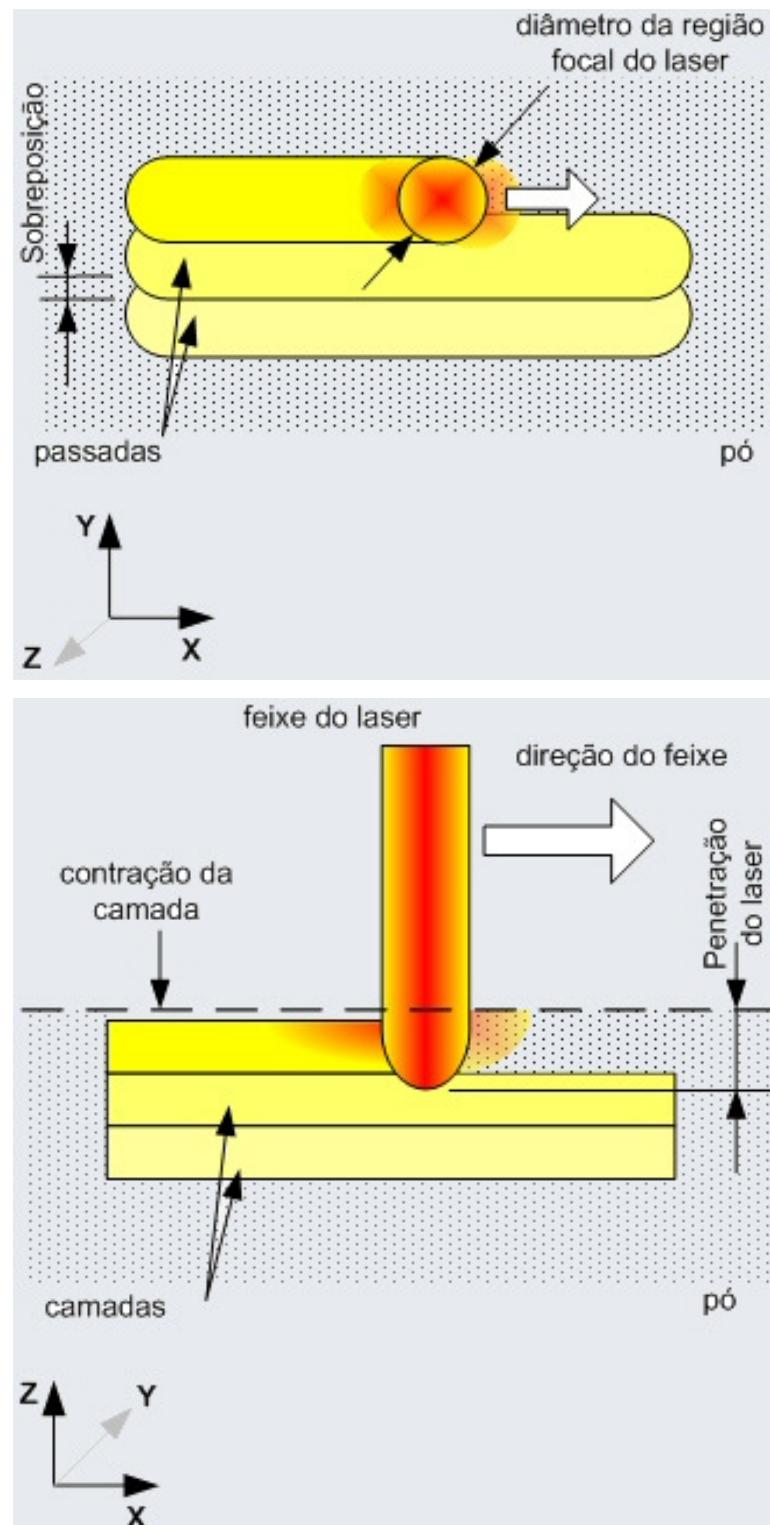


Figura 2.2 Influência dos principais parâmetros de construção no processo SLS

Segundo Hardro et al. (1998), além da velocidade, potência do laser e espaçamento das passadas a temperatura na câmara de construção também influencia no processo de sinterização. A quantidade de energia a ser fornecida pelo laser é menor quanto maior for a temperatura do pó (WANG, 1999).

### 2.3.1.2 SLA (“*Stereolithography Apparatus*”)

O processo de fotopolimerização consiste na polimerização de uma resina líquida fotocurável, que se solidifica como resultado de irradiação eletromagnética. A grande maioria dos polímeros comerciais é curável na faixa do espectro ultravioleta.

#### A. *Processos de cura por ponto*

A terminologia mais usada para a cura por ponto de fotopolímeros é a estereolitografia. Neste processo as peças são construídas ponto a ponto, linha por linha, camada por camada numa cuba de resina líquida fotocurável, como mostra a Figura 2.3 2.3.

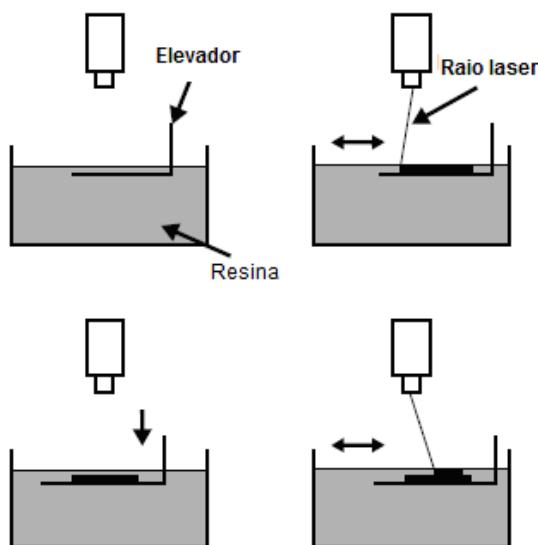


Figura 2.3 Esquema do processo de estereolitografia  
Fonte: Powers et al. (2007)

Inicialmente uma fina camada é formada no topo, através de um mecanismo de recobrimento. Um raio *laser* focado precisamente, desenha a seção transversal da camada, na superfície de resina líquida. A resina é curada por toda a trajetória feita pelo *laser*, criando uma camada sólida que fica aderida na plataforma. A plataforma é deslocada para um nível inferior, por um sistema de movimentação e uma nova camada é feita sobre a camada recém-formada. Um exemplo comercial desta tecnologia é a *iPro™ 9000 XL* da empresa *3-D Systems Corporation*.

### **B. Processos de cura por camada**

Para superar as limitações de velocidade pela cura de polímero usando uma fonte de energia por ponto, foi desenvolvido um processo que utiliza projetores DLP para curar camadas inteiras em um único passo o qual. Alguns exemplos comerciais desta tecnologia é a *ULTRA* da empresa *EnvisionTEC GmbH*, a *V-Flash* e a *ZBuilder® Ultra* da empresa *3-D Systems Corporation*.

Os modelos de máquinas (T66 e T612) *SolidScape®* ambos descendentes da linha *ModelMaker®* anterior que se baseia na primeira geração de máquinas que utiliza a técnica de derretimento de cera. Cada uma destas máquinas emprega dois jatos individuais um para depositar o material termoplástico e outro para depositar um material de suporte de cera para formar camadas de 0,0005 polegadas de espessura. Deve notar-se que estas máquinas também nivelam as camadas após a deposição para garantir que a camada esteja plana para a deposição da camada posterior. Por causa do modelo de construção lento e preciso, bem como dos materiais cerosos, estas máquinas são muitas vezes usadas para fabricar moldes para peças fundidas para as indústrias de jóias e odontologia.

A empresa americana *3D Systems®* e empresa israelense *Objet Geometries®* oferecem máquinas que usam a capacidade de imprimir e curar fotopolímero de acrílico. *Objet Geometries®* comercializa as séries de impressoras *Eden®*, *Alaris®* e *Connex®*. Estas máquinas imprimem certo número de diferentes materiais à base de acrílico fotopoliméricos em camadas de 0,0006 polegadas contendo 1.536 bicos individuais, resultando numa rápida deposição multi-linha com mais eficiência, em vez da abordagem mono-ponto mais lenta usada pelo *SolidScape*. Cada camada de fotopolímero é curada com luz ultravioleta imediatamente após a impressão, resultando na produção de modelos completamente curados, dispensando assim a pós-cura. As estruturas de suporte são construídas num material tipo gel, o qual é removido à mão e com jatos de água.

A Figura 2.4 para uma ilustração do sistema de fotopolimerização da *Objet PolyJet®*, o qual é utilizado em todas as máquinas *Eden®*.

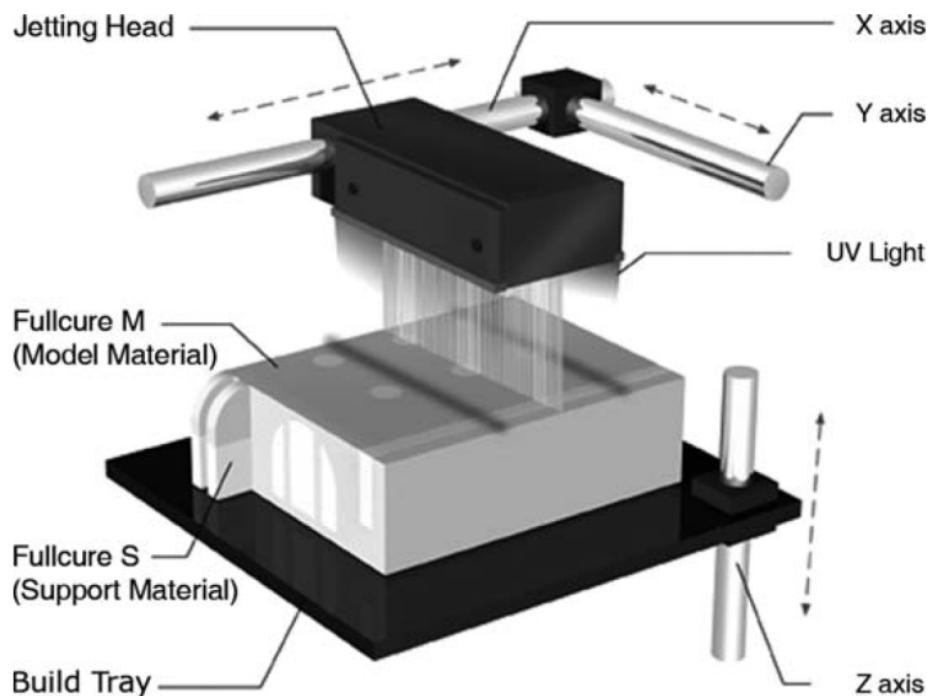


Figura 2.4 - Processo de construção de uma máquina de fotopolimerização

Fonte: Object Poli-Jet ® (2006)

A máquina Connex500 ® é a primeira da Objet ® que fornece capacidade multi-material. Apenas dois fotopolímeros diferentes podem ser impressos em um momento, no entanto, ajustando-se automaticamente a máquina pode imprimir, funcionalmente, até 25 diferentes materiais, variando a relação de composição dos dois fotopolímeros.

Cada processo de manufatura aditiva tem suas vantagens e desvantagens. As principais vantagens da impressão, tanto direta como impressão ligante, incluem baixo custo, alta velocidade, escalabilidade, facilidade de peças de construção em vários materiais, e a capacidade de cores de impressão. Máquinas de impressão tem muito mais baixo custo do que outras máquinas, como no caso das que usam lasers. Em geral, as máquinas de impressão podem ser montadas a partir de componentes padrão (servomotores, estruturas, cabeças de impressão), enquanto outras têm componentes muitos mais específicos. Alta velocidade e escalabilidade estão relacionadas da seguinte maneira: usando as cabeças de impressão com centenas ou milhares de jactos, é possível depositar uma grande quantidade de material de forma rápida e de uma área considerável. Escalabilidade neste contexto

significa que a velocidade de impressão pode ser aumentada pela adição de uma outra cabeça de impressão na mesma máquina, uma tarefa relativamente fácil, muito mais fácil do que a adição de um outro laser.

Como exemplo toma-se a máquina Connex500 ® da Objet ®, que imprime em dois materiais diferentes. Pode-se imaginar a adição de mais cabeças de impressão para aumentar a capacidade para três ou quatro materiais. Compatibilidade e resolução precisam ser garantidas, mas ao que tudo indica que esses tipos de melhorias devem ocorrer em futuro próximo. Relacionando vários materiais e cores pode ser impresso por algumas máquinas de M.A. comercial. A capacidade de impressão de cor é um avanço importante na indústria da M.A, por muitos anos, as peças foram fabricadas em apenas uma cor. O única exceção foram as resinas seletivamente plausíveis SL usadas na indústria médica, que foram desenvolvidos em meados da década de 1990. Estas resinas eram capazes de imprimir em apenas duas cores, âmbar e azul ou vermelho. Em contraste, a ZCorp ® desenvolveu uma máquina que imprime em alta resolução de 24-bits de cor. Várias empresas estão usando essas máquinas para produzir estatuetas para vídeo-jogos e para outros consumidores.

Para completar, algumas desvantagens da impressão: A escolha dos materiais até à data é limitada. Para a impressão direta, apenas ceras e fotopolímeros estão disponíveis comercialmente. Na impressão ligante, alguns polímeros compósitos cerâmicos e metais estão disponíveis, mas eles vêm com muitas limitações. Precisão da peça, em especial para as peças de grandes dimensões, não é geralmente tão boa quanto comparadas a alguns outros processos, nomeadamente “*Deposition Modeling*” SL e fundidas. No entanto, a precisão tem vindo a melhorar em todo o setor e esperam-se mais melhorias em todos os processos.

Enquanto as indústrias do setor, que até agora introduziram máquinas de impressão que utilizam ceras, polímeros acrílicos e fotopolímeros exclusivamente, grupos de pesquisa ao redor do mundo experimentaram o potencial de máquinas de impressão que poderiam construir naqueles e em outros materiais. Entre esses materiais os mais estudados e mais promissores para aplicações futuras são

polímeros, cerâmicas, e metais. Esta seção dá destaque a realizações nessas áreas de pesquisa.

### 2.3.1.3 Impressão 3-D Aglutinante

O processo 3D Printing possui como princípio a aglutinação de pós pela ação de um líquido aglutinante expelido em gotículas por um cabeçote tipo "jato-de-tinta", muito parecido com os utilizados em impressoras comuns. O jato de aglutinante gerado pelo cabeçote é aspergido sobre uma camada de pó depositado sobre uma plataforma que se movimenta na direção Z. Um rolo é utilizado para depositar novas camadas de material e compactar uma camada sobre a outra. O processo, esquematizado na figura 2.5, foi desenvolvido pelo MIT ("Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts", E.U.A.) e a patente do processo foi segmentada em diferentes atividades industriais. Existem máquinas específicas para a fabricação de objetos com plásticos, cerâmicas e metais, além de outras aplicações mais específicas como a fabricação de próteses biomédicas e o encapsulamento de remédios. A Quadro 2.2 resume as aplicações, diferenças e materiais empregados na tecnologia 3DP.

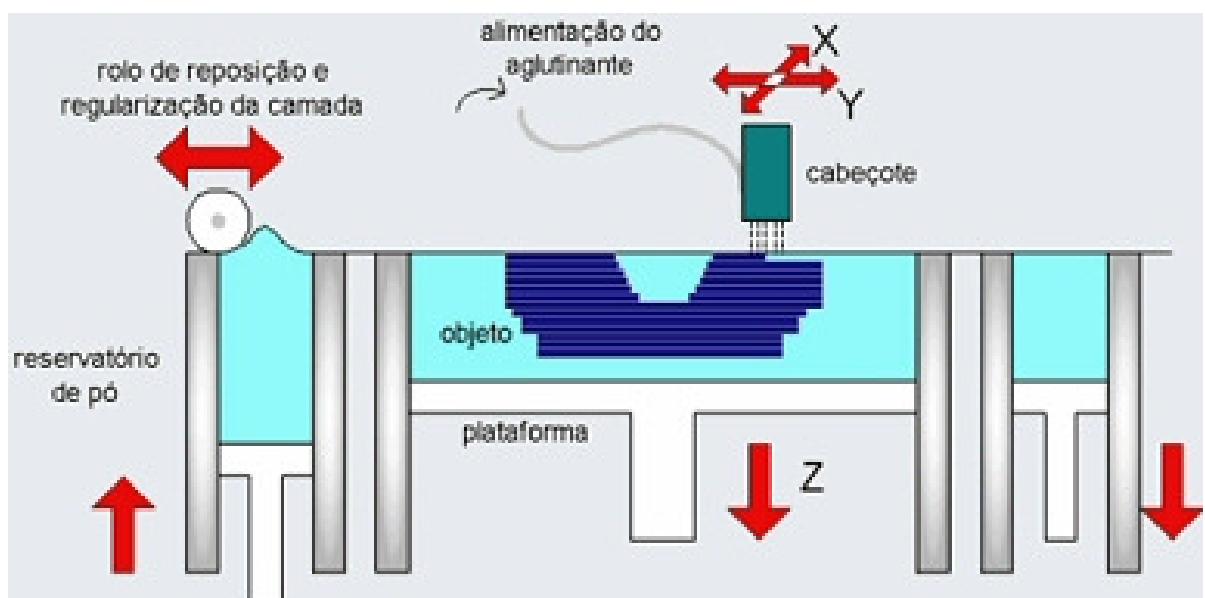


Figura 2.5 Esquema básico do processo 3D Printing

Fonte: CIMJECT (2013) [C]

Quadro 2.2 - Principais divisões do processo 3DP

Empresa	Materiais & Aplicação	Funcionamento
<b>Z Corporation Plásticos</b>	Modelos e protótipos	Um aglutinante é aspergido sobre pó plástico e posteriormente o objeto deve ser infiltrado com cera ou selador. É possível fabricar protótipos multicoloridos.
<b>Solidgen</b>	Cerâmicas	Cascas para fundição O objeto é feito com pó cerâmico e recebe tratamento térmico em fornos para obter resistência mecânica.
<b>ExtrudeHone</b>	Metais	Moldes para injeção e O aglutinante utilizado é uma resina foto sensível que é curada, camada por camada, com luz ultravioleta. Após finalizado o objeto, este é colocado em um forno para extrair o aglutinante e posteriormente sobre sinterização e infiltração com um liga de baixo ponto de fusão.

### 2.3.1.4 LENS (“Laser Engineering Net-Shape”)

O processo LENS (“*Laser Engineering Net-Shape*” ou “*volume laser cladding*”) é fundamentado na adição através da fusão de partículas que são aspergidas com um gás inerte sobre o foco de um potente feixe de laser. Este por sua vez, funde as partículas que ao solidificarem umas nas outras formam as camadas. Podem ser utilizadas ligas de titânio: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2MO, Ti-48Al-2Cr-2Nb, Ti-22Al-23Nb e aços como o H13. Os componentes fabricados por esta técnica de prototipagem rápida possuem baixa porosidade, no entanto a precisão dimensional é pequena. A Figura 2.6 abaixo apresenta uma simplificação do processo LENS.

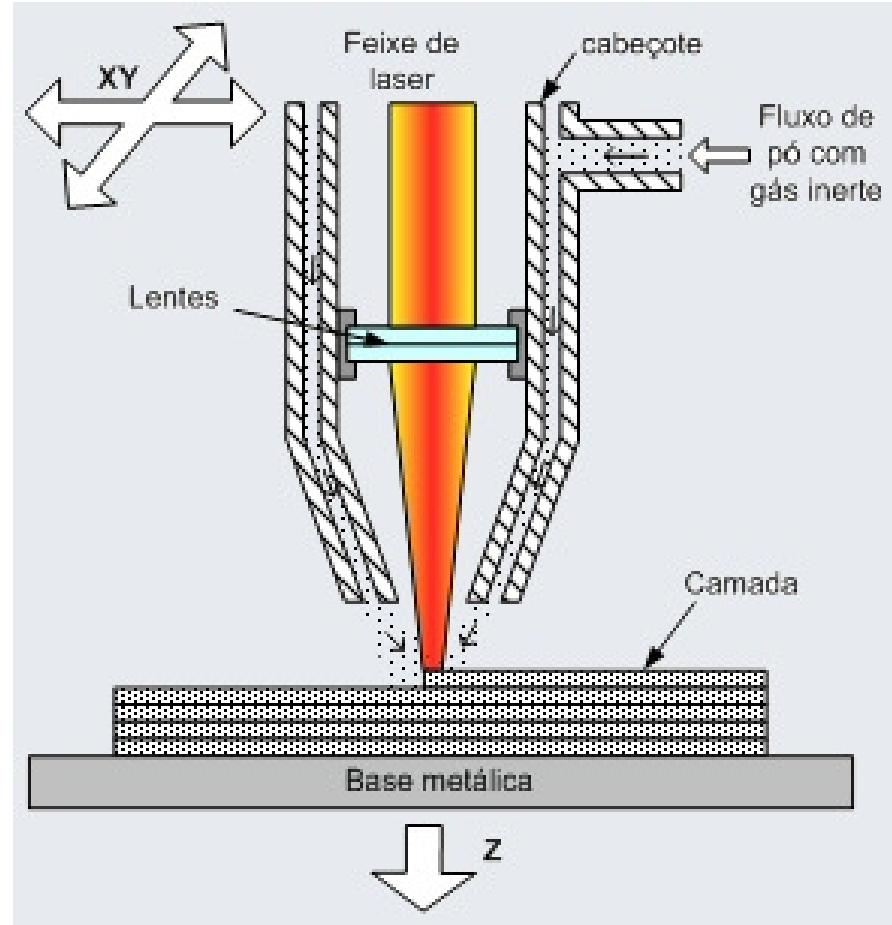


Figura 2.6 - Esquema simplificado do processo LENS

Geralmente em objetos fabricados pelo processo LENS são realizadas operações posteriores de acabamento como fresamento e torneamento. Há limitações geométricas para superfícies complexas além de ser necessário o uso de uma base para poder iniciar a fabricação de objetos. As aplicações principais, até o momento, são voltadas para a obtenção de componentes de ligas especiais e restauração de matrizes.

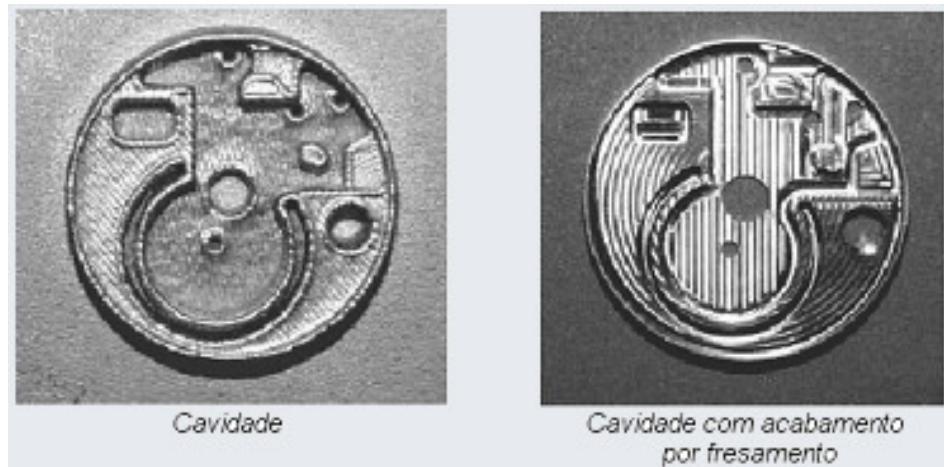


Figura 2.7 - Exemplo de acabamento obtidível pelo processo LENS

Fonte: Atwood et al. (1998)

### 2.3.1.5 FDM (“Fused Deposition Modeling”)

O processo de manufatura aditiva baseado em fusão de filamento (FDM) utiliza normalmente um termoplástico e uma câmara de aquecimento para liquefazer o polímero que é alimentado para dentro do sistema como um filamento. O filamento é empurrado para dentro da câmara por um conjunto de extrusão parafuso sem fim e é este deslocamento que gera a pressão de extrusão.

A máquina FDM possui um cabeçote que se movimenta no plano horizontal (plano xy) e uma plataforma que se movimenta no sentido vertical (eixo z). No cabeçote, os fios de material termoplástico são forçados, por guias rotativas, a atravessarem dois bicos extrusores aquecidos. Um bico recebe material para a construção do objeto 3D enquanto outro recebe material para ser utilizado como suporte para a fabricação de superfícies suspensas ou complexas. O cabeçote movimenta-se no plano xy enquanto as guias rotativas empurram o fio para o interior do bico extrusor fazendo com que o material seja aquecido, extrudado e depositado. Ao final de cada camada a plataforma se desloca para baixo, com uma distância igual à espessura de camada, e o cabeçote começa a extrudar novos filamentos para construir uma nova uma camada sobre a anterior, repetindo este procedimento

até formar por completo o objeto 3D. A figura 2.8 abaixo apresenta um esquema simplificado do processo FDM.

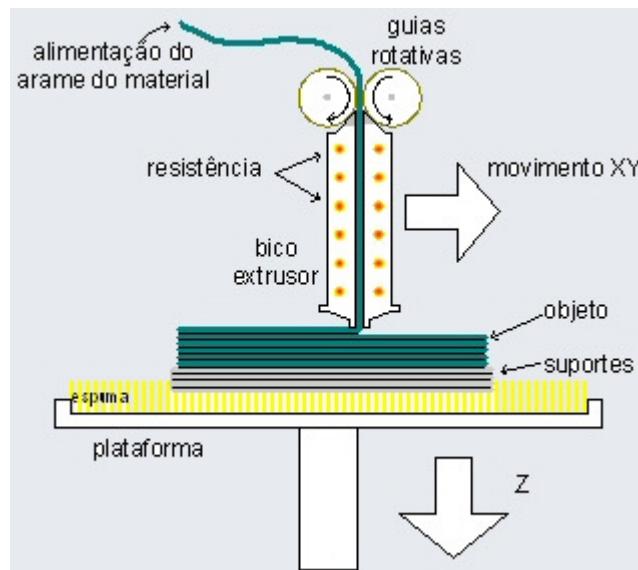


Figura 2.8 - Esquema simplificados do processo FDM  
Fonte: CIMENJECT (2013)

Uma máquina típica FDM pode ser visto na Figura. 2.9, juntamente com uma foto de uma cabeça de extrusão. A patente inicial FDM foi atribuído ao fundador da empresa Stratasys, Scott Crump em 1992. Atualmente, representa uma fração significativa das máquinas de manufatura aditiva utilizadas em ambientes industriais.

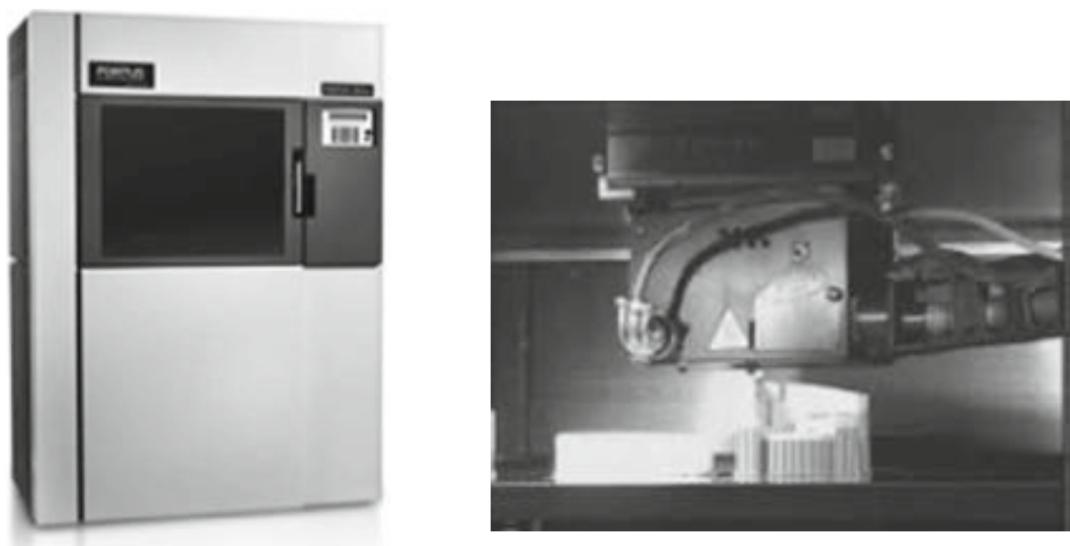


Figura. 2.9 - Típica máquina Stratasys ® mostrando: cabeçote de FDM  
Fonte: STRATASYS (2013)

A maior força das FDM está na gama de materiais e nas propriedades mecânicas das partes resultantes feitas utilizando esta tecnologia. Peças feitas usando FDM estão entre as mais fortes dentre qualquer processo de fabricação aditiva à base de polímero.

A principal desvantagem de usar esta tecnologia é a velocidade de construção. Como mencionado anteriormente, a alta inércia dos cabeçotes de impressão significa que as velocidades máximas e acelerações que podem ser obtidos são um pouco menores do que outros sistemas. Além disso, a FDM requer que o material seja plotados em um tipo de trama chamado ponto “wise”, o que envolve muitas mudanças de direção durante a impressão.

Através do processo FDM é possível fabricar objetos com ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), PC (policarbonato), elastômero e cera. O quadro 2.3 abaixo apresenta alguns dos materiais comercialmente disponíveis para a fabricação de objetos pelo processo FDM, quase todos fornecidos pela empresa Stratasys ®.

Quadro 2.3: Principais materiais utilizados no processo FDM

Nome comercial	Tipo	Aplicação
<b>ABS 400</b> <b>Stratasys (EUA)</b>	Filamento de ABS	Durável, resistente, boa resistência térmica e química. Colorido.
<b>ABSi 500</b> <b>Stratasys (EUA)</b>	Filamento de metilmetacrilato de ABS	Aplicações médicas. Poder ser esterilizado com radiação gama.
<b>IC W06 wax Stratasys (EUA)</b>	Filamento para modelos de fundição de cera perdida	Fundição de cera perdida.
<b>Elastomer E20 Stratasys (EUA)</b>	Filamento de elastômero	Material elástico resistente e flexível.
		Ideal para vedações e peças flexíveis.
<b>Polycarbonate Stratasys (EUA)</b>	Filamento de policarbonato	Termoplástico rígido de performance superior ao ABS.
<b>Polyphenylsulphone Stratasys (EUA)</b>	Filamento de polifenilsulfona	Termoplástico rígido para aplicações diversas.
<b>Polyester P1500</b> <b>Stratasys (EUA)</b>	Waffle de polímero a base de poliéster	Utilizado em protótipos conceituais
<b>Multi purpose ABS filament</b> <b>(Sibco, UK)</b>	Filamento de ABS	Durável, resistente, boa resistência térmica, química e colorido.

Fonte – CADCAMnet (2003)

A gama de máquina Stratasys ® FDM é muito ampla, de baixo custo, de pequena escala, máquinas com poucas variáveis foram substituídas por máquinas de maiores, mais versáteis e mais sofisticadas que são inevitavelmente mais caras.

Embora as máquinas de dimensão FDM possam ser usadas para fazer peças para uma ampla variedade de aplicações, a maioria das peças é susceptível de

serem utilizadas como modelos conceito pelas empresas que investigam as fases iniciais do desenvolvimento do produto. Aplicações mais exigentes, como os modelos para a aprovação do produto final, os modelos de testes funcionais, e modelos para a fabricação digital direta, talvez exijam máquinas que são mais versáteis, com mais controle sobre as configurações, mais opções de materiais e opções que permitem ao utilizador corrigir problemas menores no modelo de saída. Máquinas FDM com especificações mais elevadas são mais caras, não apenas por causa da tecnologia incorporada, mas também por causa do apoio de vendas, manutenção e confiabilidade. Stratasys ® separou esta tecnologia “de ponta” através da subsidiária nomeada Fortus ®, com modelos de ponta que custam cerca de US \$ 400.000 dólares. A menor máquina da Fortus ®, a 200MC ®, começa mais ou menos na dimensão das máquinas de ponta, com um envelope ligeiramente menor construção de 8" x 8" x 12" e especificações semelhantes. Mais acima na gama existem máquinas com aumentos no tamanho, precisão, variedade de materiais e gama de velocidades de construção. A maior e mais sofisticada máquina é a 900mc Fortus ®, que tem a maior precisão de todas as máquinas FDM Stratasys ® com uma espessura de camada de 0,076 milímetros. O envelope de construção é impressionante 36" x 24" x 36" e há pelo menos sete diferentes opções de materiais.

Deve ser notado que as máquinas FDM, que operam com diferentes espessuras de camada fazem-no por causa do uso de diferentes diâmetros dos bocais. Esses bicos são manualmente mutáveis e apenas um bocal pode ser utilizado durante uma construção específica. O diâmetro do bocal também controla a largura da carretera. Obviamente, um bocal de diâmetro maior pode expulsar mais material para uma velocidade de deposição específica e, assim, encurtar o tempo de construção à custa de menor precisão.

A velocidade de um sistema FDM é dependente da taxa de alimentação e da velocidade de plotagem. A taxa de alimentação também é dependente da capacidade de fornecimento do material e da taxa à qual o dispositivo de liquefação pode derreter o material e alimentá-lo através do bocal. Se o dispositivo de liquefação for modificado para aumentar a taxa de fluxo de material, o mais provável é que resultaria num aumento da massa. Isto, por sua vez, tornaria mais difícil para mover o cabeçote de extrusão mais rápido. Para que o movimento seja preciso, o

sistema de impressão é normalmente construído utilizando parafusos de potência. Sistemas de custos mais baixos podem usar correias, mas flexões nas cintas podem torná-lo menos preciso.

Um método para melhorar a velocidade de sistemas de acionamento do motor é reduzir o atrito correspondente. Stratasys ® usou a tecnologia Magnadrive para mover a trama do cabeçote em suas máquinas Quantum. Deslizando a cabeça sobre uma almofada de ar de contrapeso contra as forças magnéticas que atraem a cabeça de um cilindro de aço, o atrito foi significativamente reduzido, o que torna mais fácil mover o cabeçote à uma velocidade mais elevada. Este sistema foi substituído pelo parafuso da esfera convencional levando a mais recente máquina: Fortus 900mc ® isto indica que a melhoria não foi suficiente para se equilibrar com o custo (GIBSON et al. (2010)).

### **2.3.2 Outros Sistemas**

Embora Stratasys ® detenha a maioria das patentes sobre FDM e tecnologias de extrusão similares baseadas em calor, há uma série de outros sistemas comercialmente disponíveis. A maioria destes sistemas só pode ser adquirida na China, até a expiração de patentes da Stratasys ®. O sistema mais bem-sucedido e conhecido está disponível pela empresa Yinhua Pequim ®. A maioria destas máquinas de FDM concorrentes utiliza um sistema de extrusão de parafuso que são alimentadas através de pó ou de pellets, em vez de filamentos contínuos (GIBSON, 2010).

#### **2.3.2.1 “Contour Crafting” – CC (Construção por Contornos)**

Na produção normal por adição, as camadas são considerados como formas 2D extrudadas linearmente na terceira dimensão. Camadas mais espessas resultam em menor precisão nas partes, particularmente onde há encostas ou curvas na direção vertical. Uma importante inovação na abordagem com base em extrusão pode ser encontrada na tecnologia “Contour Crafting” desenvolvida pelo Prof. B. Khoshnevis e sua equipe na Universidade do sul da Califórnia. Tomando o princípio

acima mencionado que a superfície exterior é a mais crítica em termos de requisitos de precisão do que todo o conjunto, este equipo de investigação desenvolveu um método para alisar a superfície com uma raspagem por meio de uma ferramenta. Isto é semelhante à forma como os artesãos de barro e / ou concreto, usam espátulas. Contornando as camadas enquanto elas estão sendo depositadas, usando a ferramenta de raspagem para interpolar as camadas entre elas, inclusive camadas muito espessas podem ser feitas, e ainda assim é replicada a geometria externa com boa tolerância (GIBSON, 2010).

Utilizando esta técnica, é possível fabricar conceptualmente objetos extremamente grande muito rapidamente em comparação com outros processos de aditivos, pois a precisão exterior não é mais determinada exclusivamente pela espessura da camada. A ferramenta raspadora não precisa ter uma borda em linha reta, e pode ser de certa maneira reconfigurável pelo posicionamento das diferentes partes da ferramenta em diferentes regiões ou usando-se vários passes. Para ilustrar esta vantagem a equipe que desenvolveu a tecnologia mostra que pode produzir edifícios de tamanho normal, utilizando uma mistura do processo *Contour Crafting* e robótica de montagem, ver Figura 2.10.

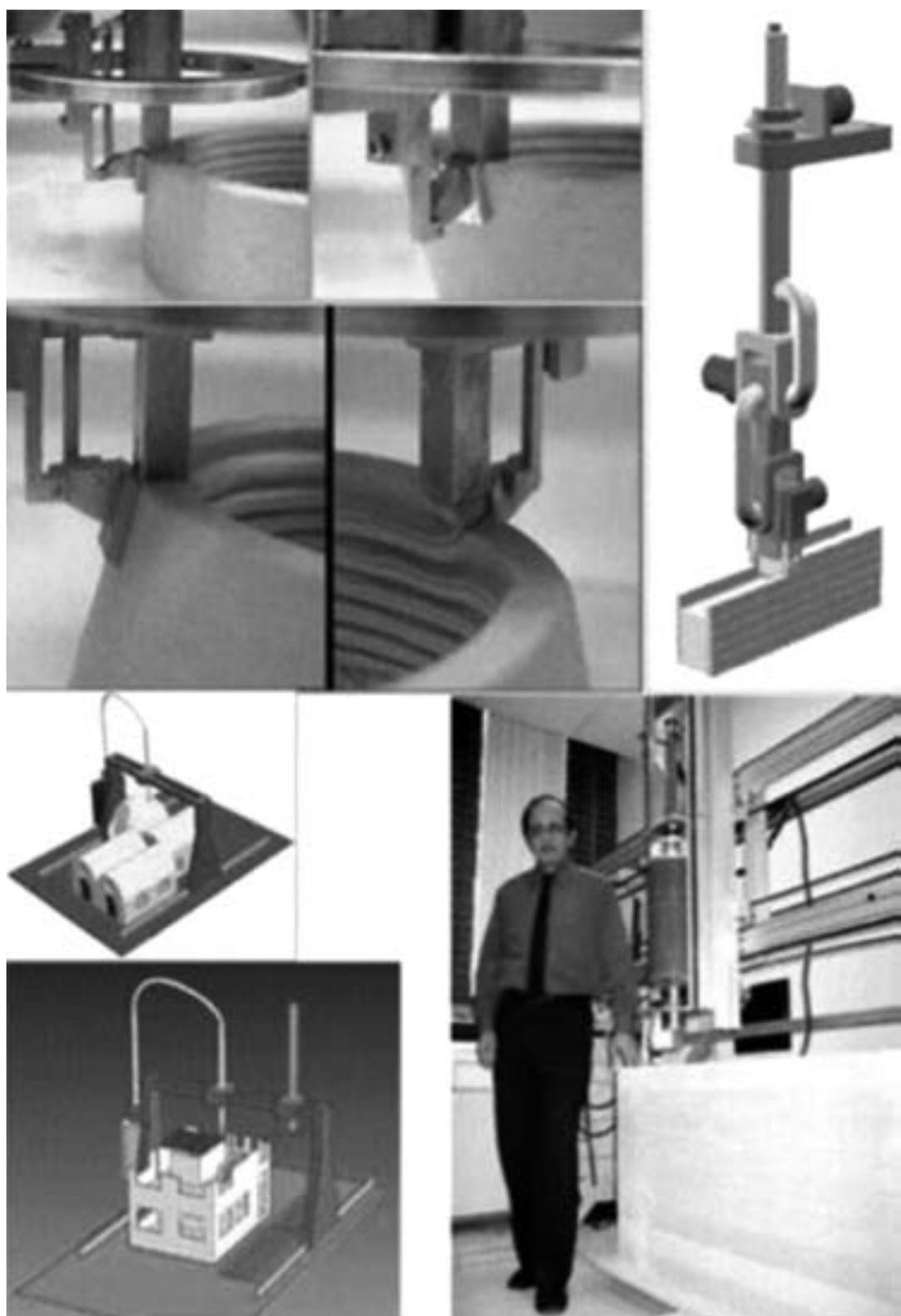


Figura 2.10 - Tecnologia *Contour Crafting*, desenvolvida na USC, mostrando dispositivo de raspagem e máquina de grande escala  
Fonte: Gibson (2010)

### 2.3.2.2 Sistemas não planares

Houve algumas tentativas de desenvolvimento de tecnologia M.A. que não usa camadas planas. Os projetos mais notáveis são “*Deposition Shaped Manufacture*” (SDM) Figura 2.11, “*Ballistic Particle Manufacture*” (BPM) e “*Curved Laminated Object Manufacture*” (Curved LOM) Figura 2.12. O processo *Curved LOM*, em particular visa à utilização de materiais compósitos reforçados com fibras, colados juntos em camadas para tendo como fim tornar a casca das peças dura, para a fabricação de componentes como cones do nariz para aeronaves que utilizam fibra de carbono e roupas blindadas com fibra de aramida (Kevlar ®). Para funcionar adequadamente, as camadas de material devem conformar-se à forma das partes que estão sendo concebidas. Se as bordas dos laminados estão expostas, em seguida, eles podem facilmente se soltar através da aplicação de forças de cisalhamento. O processo Curved LOM demonstrou viabilidade, mas também rapidamente o sistema se tornou muito complexo, pois foram necessários equipamentos de movimentação robótica e equipamentos de alta potência de corte a laser para os laminados.

É possível a utilização de fibras curtas misturadas com resinas de polímero no FDM. As fibras podem ser extrudadas, enquanto o diâmetro e o comprimento das fibras forem suficientemente pequenos para impedir o entupimento dos bicos. Como com o *Curved LOM*, é um pouco inútil usar tal material na FDM se as camadas estão alinhadas com o plano de construção. No entanto, se as camadas foram alinhadas de acordo com a camada exterior da peça, pode ser útil. As partes não podem ser construídas utilizando-se uma camada fixa muito próxima, neste caso processar o planejamento para geometrias complexas torna-se problemático. No entanto, certas partes que requerem tenacidade superficial podem ser beneficiadas com esta abordagem não-planar.

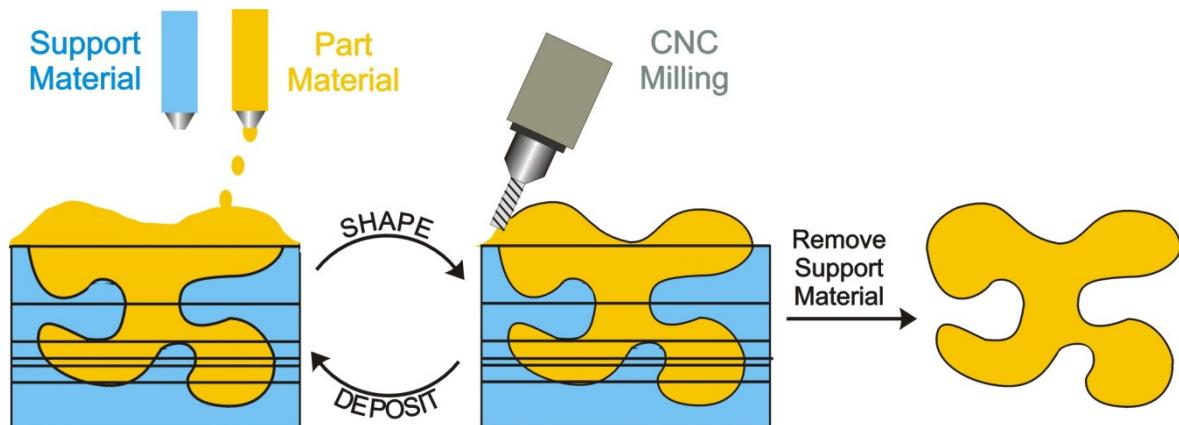


Figura 2.11 - Exemplo de um processo “Deposition Shaped Manufacture” (SDM)  
Fonte: Carnegie Mellon University (2013)

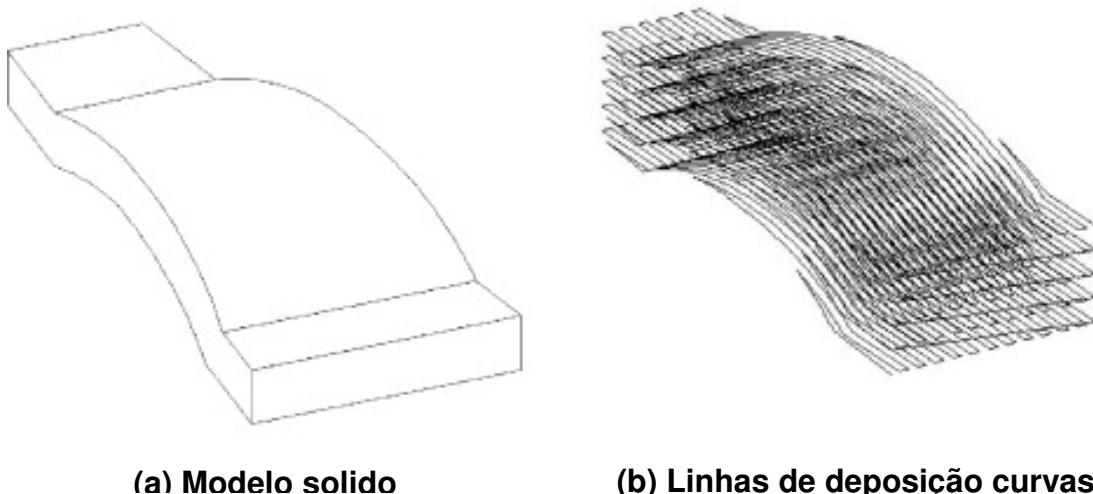


Figura 2.12 - Objeto produzido por meio da tecnologia Curved LOM. Note-se as linhas de deposição não lineares  
Fonte: “Modeling and evaluation of curved layer fused deposition” (2012)

Utilizando-se o processo Curved LOM é possível obter modelos com propriedade mecânicas superiores ao processo convencional de deposição por camadas lineares, este melhoramento pode resultar vantajoso quando se deseja a obtenção de modelos com maior tenacidade. A figura 2.13 mostra resultados do ensaio de deflexão de peças produzidas pelo método de deposição de camadas lineares (a) e pelo método curved LOM (b). É possível notar a diferença no comportamento mecânico das peças produzidas por ambos os métodos.

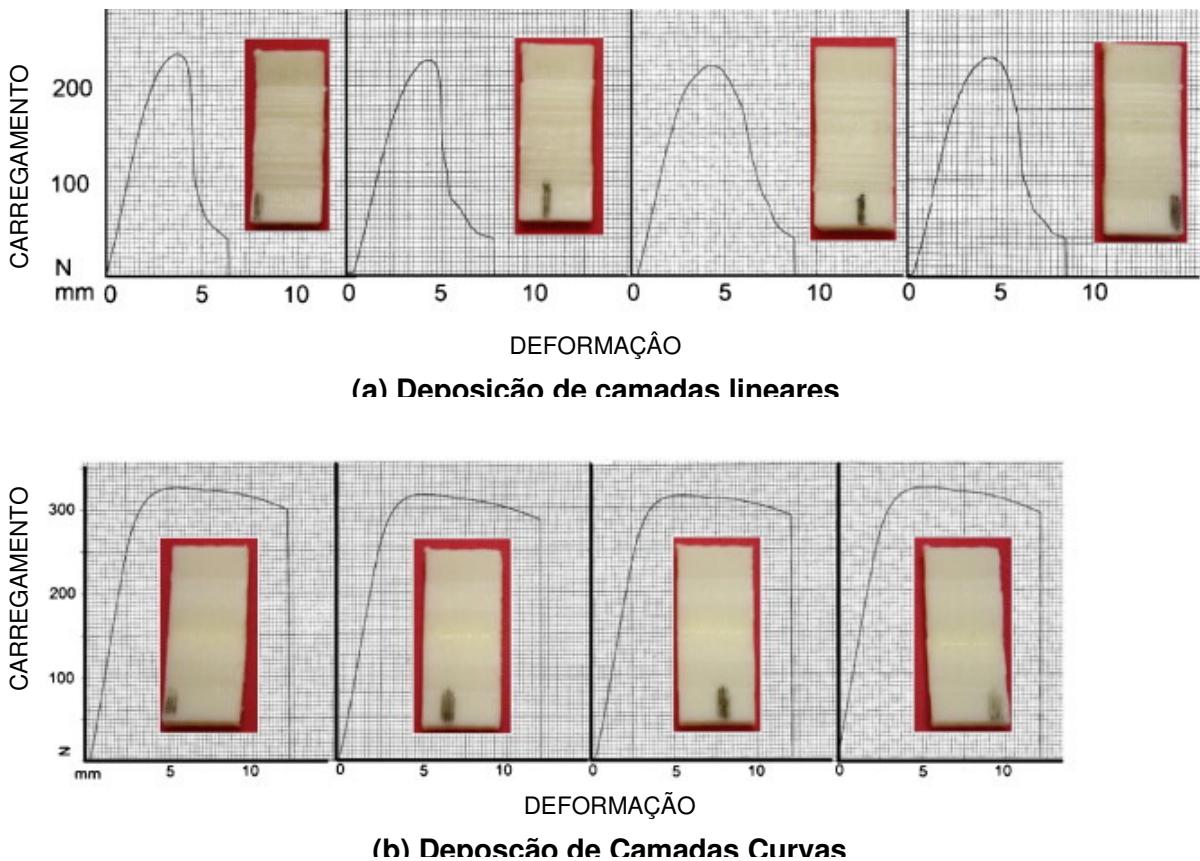


Figura 2.13 - Resultado do ensaio de deflexão de modelos produzidos por deposição de camadas lineares (a) e pelo processo Curved LOM (b)  
Fonte: “Modeling and evaluation of curved layer fused deposition” (2012)

## 2.4 Materiais para impressão tridimensional

### 2.4.1 Definição de Polímero

Os polímeros representam uma classe de materiais, que permitem uma ampla variedade de manipulação de propriedades mecânicas, físicas e térmicas.

Os polímeros são compostos por moléculas muito grandes, que são cadeias de átomos de carbono, às quais vários átomos ou radicais estão lateralmente ligados. Considera que essas macro moléculas podem ser compostas por “meros”, que por sua vez são entidades estruturais menores, que se repetem ao longo da cadeia. O comprimento da cadeia pode ser especificado pelo grau de polimerização, que por sua vez é o número médio de unidades de mero por molécula.

Com base no comportamento tensão-deformação, os polímeros se enquadram dentro de três classificações gerais:

Frágil – Sofre fratura enquanto se deforma elasticamente.

Plástico – Comportamento é semelhante a materiais metálicos, a deformação inicial é elástica, a qual é seguida por um escoamento e por uma região de deformação plástica.

Elastômericos – A deformação é totalmente elástica (grandes deformações recuperável mesmo sob pequenos níveis de tensão).

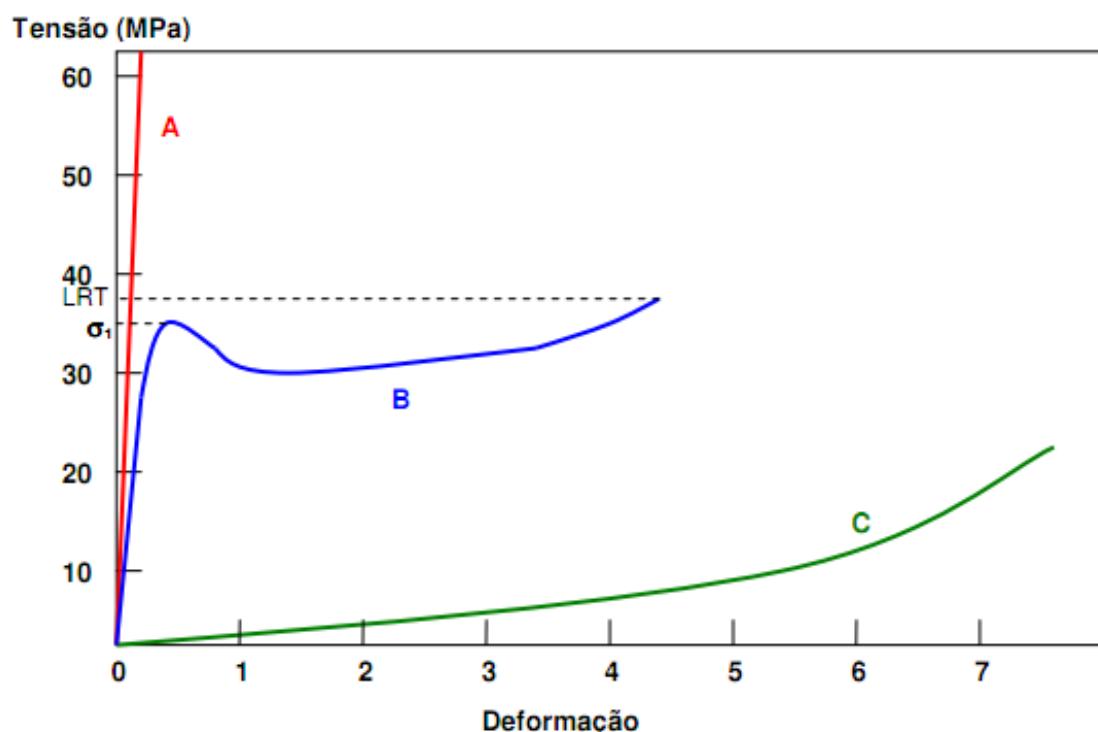


Figura 2.14: Curvas tensão deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e elastômericos (curva C)

Esses materiais, não são nem tão fortes e nem tão rígidos como os metais, e suas propriedades mecânicas são sensíveis a alterações de temperaturas.

Materiais poliméricos podem ser do tipo termofixo; que uma vez curado ou endurecido através de uma reação química, não irá amolecer ou fundir se

aquecido posteriormente, mas pode se degradar definitivamente com o excesso de temperatura. Podemos encontrar também polímeros do tipo termoplásticos; que amolece quando aquecido e endurece quando resfriado, enquanto se encontra no estado amolecido, o material pode ser conformado mediante moldagem ou extrusão,

#### **2.4.2 Uso dos Polímeros na MA**

Nas máquinas de impressão tridimensional os polímeros são amplamente utilizados, porém ainda há um grupo restrito de polímeros que são utilizados para geração de protótipos rápidos.

Gao e Sonin (2004) apresentam estudos da deposição e solidificação de grupos de microgotas de polímeros fundidos. Eles discutem as descobertas relacionadas a três modos de deposição: colunares, varredura (linear), e varredura repetida (paredes verticais). Os dois materiais utilizados nas investigações foram uma cera candelilla e uma cera microcristalina de petróleo, depositada em gotículas de 50 mm de diâmetro a partir de um cabeçote de impressão de 3-5 milímetros em um substrato arrefecido. Os autores consideram os efeitos da freqüência de deposição das gotículas e de resfriamento sobre as colunas de formação. Como seria de esperar, se as gotas fossem depositadas rapidamente (50 Hz, neste caso), o substrato sobre o qual elas incidiriam ainda está a uma temperatura elevada, reduzindo o ângulo de contato de solidificação e resultando em uma bola como deposições em vez de colunas. Análises numéricas da característica relevante de tempos de arrefecimento foram incluídas na análise. Ainda segundo Gao e Sonin (2004), a deposição horizontal de gotículas e a subsequente formação de linhas. São propostas que as linhas suaves dos sólidos sejam formadas apenas em uma pequena gama de frequências de deposição de gota, dependendo da velocidade de varredura, tamanho de gota, e da solidificação do ângulo de contato. Finalmente, os autores propõem que na deposição de parede seja usada uma combinação dos aspectos relevantes a partir de cada uma das situações acima.

Feng (2006) apresentar um sistema completo, com base em uma cabeça de impressão a partir de MicroFab Technologies Inc. ®, que funciona de forma semelhante à das máquinas disponíveis no mercado.

Ele imprime um material de cera, que é aquecida a 80 °C, 10 graus depois de seu ponto de fusão, e deposita-camadas de 13-60 milímetros de espessura. O padrão de deposição é controlado variando o tamanho da gotícula e a velocidade, bem como a altura e o espaçamento das linhas de deposição.

O material mais popular é o material ABSplus, que pode ser usado em todas as atuais máquinas FDM da Stratasys ®. Esta é uma versão atualizada do ABS original (acrilonitrila butadieno-estireno), o material que foi desenvolvido para a tecnologia anterior de FDM. Os usuários interessados em um efeito translúcido pode optar pelo material ABSi, que tem propriedades semelhantes a outros materiais dentro do alcance do ABS. Algumas máquinas têm também uma opção para ABS misturado com policarbonato. A tabela 2.7 apresenta as propriedades para vários materiais e misturas de ABS.

Tabela 2.4 - Variações nas propriedades mecânicas, físicas e térmicas, para o intervalo de materiais ABS para deposição FDM

Propriedade	ABS	ABSi	ABSplus	ABS/PC				
Tensão de tração	22 MPa	37 MPa	36 MPa	34,8 MPa				
Modulo de tensão	1,627 Mpa	1,915 Mpa	2,265 Mpa	1,827 Mpa				
Alongamento	6%	3,1%	4%	4,3%				
Tensão de Flexão	41 Mpa	61 Mpa	52 Mpa	50 Mpa				
Modulo de Flexão	1,834 MPa	1,820 MPa	2,198 MPa	1,863 MPa				
Impacto IZOD	106,78 J/m^2	101,4 J/m^2	96 J/m^2	123 J/m^2				
Deflexão Térmica @ 66 psi	90º C	87 º C	96 º C	110 º C				
Deflexão Térmica @ 264 psi	76 º C	73 º C	82 º C	96 º C				
Extenção Elástica	5,6	E-5	6,7	E-6	4,90	E-5	4,10	E-5
Expansão Térmica	in/in/F		in/in/F		in/in/F		in/in/F	
Gravidade Específica	1,05		1,08		1,04		1,2	

Fonte: Stratasys ® (2010)

Estas propriedades são muito semelhantes aos de muitos materiais utilizados. Deve notar-se, contudo, que as peças feitas com estes materiais nas máquinas FDM podem apresentar regiões de menor resistência do que mostrados na tabela por causa de regiões de interface nas camadas e possíveis espaços vazios nas peças.

Existem três outros materiais disponíveis para a tecnologia FDM que podem ser úteis caso os materiais ABS não possam cumprir os requisitos. Um material que é predominantemente baseado em PC podem fornecer propriedades de resistência mais elevadas, com uma resistência à flexão de 104 MPa. Uma variação deste material é o PC-ISO, o qual é também baseado em PC, formulado para ISO 10993-1 e requisitos USP da Classe VI. Este material, embora mais fraco do que o PC normal, com uma resistência à flexão de 90 MPa, é certificado para uso em alimentos e embalagens de medicamentos e fabricação de dispositivos médicos. Outro material que foi desenvolvido para atender às normas industriais é o material ULTEM 9085. Este tem propriedades particularmente favoráveis de fumaça, chama e toxicidade (FST), que torna adequado para utilização em veículos de aeronaves, marinho, e do solo. Se as aplicações requerem uma deflexão térmica melhorada, uma opção seria a utilização o polifenilsulfona (PPSF) que tem uma temperatura de deflexão térmica de 264 psi de 189 ° C. Deve notar-se que estes três últimos materiais só podem ser usados nas máquinas de ponta e que eles só trabalham com o sistema de apoio, tornando seu uso um pouco difícil e especializado. O fato de que tem-se explorado diferentes materiais para matéria primas, enquadrando-os sob numerosas normas, como a ASTM e similares indica que o setor industrial está seriamente interessado na fabricação de produtos finais (Manufatura Digital Direta, “*Direct Digital Manufacturing*”, em inglês) como uma aplicação-chave para FDM.

Note-se que FDM funciona melhor com polímeros que são amorfos na natureza, em vez do que os polímeros altamente cristalinos que são mais adequados para processos de PBF. Isto é porque os polímeros que funcionam melhor são aquelas, que quando extrudados tornam-se pasta viscosa e não os de menor viscosidade. Com os polímeros amorfos, não há distinção do ponto de fusão e o material amolece mais, e a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. A viscosidade quando estes polímeros amorfos são extrudados sob pressão é elevada o suficiente para que a sua forma seja largamente mantida depois da extrusão, mantendo a forma de extrusão e permitindo a solidificação com rapidez e facilidade. Além disso, quando o material é adicionado numa fileira adjacente, ou numa nova camada, o material previamente extrudado pode facilmente se ligar a ele. Isto é diferente da Sinterização Seletiva a Laser, que conta com a alta

cristalinidade do material em pó para assegurar que não há uma mudança de material para o estado líquido além do interior de uma região de temperatura bem definida.

#### ***2.4.2 Uso de materiais cerâmicos com tecnologia FDM***

Outra possível aplicação do FDM é o de desenvolver processos de fabricação de peças em cerâmica. Em particular, o FDM pode ser utilizado para fazer a extrusão de pastas cerâmicas que podem rapidamente solidificar. As peças resultantes podem ser direcionadas para um forno de alta temperatura para fundir e densificar as partículas de cerâmica. As peças resultantes podem ter propriedades muito boas com as características geométricas complexas próprias dos processos M.A. Outros processos M.A. também têm sido utilizados para criar produtos compósitos cerâmicos, mas a maior parte do trabalho usando FDM saiu da Universidade de Rutgers, nos EUA (GIBSON, 2010).

### **2.5 Desafios Técnicos da Impressão**

Como evidenciado pela indústria e aplicações de pesquisa, a impressão tridimensional está em crescente desenvolvimento e aplicações, como apresentado na Introdução deste trabalho. Existem, no entanto, algumas deficiências técnicas que têm impedido o seu desenvolvimento para um maior crescimento. Para identificar e resolver esses problemas, os fenômenos relevantes e abordagens estratégicas tomadas por seus desenvolvedores devem ser entendidas. A seguir, os desafios técnicos do processo de impressão são descritos, o mais importante sobre as limitações é referentes à identificação de polímeros funcionais para a deposição.

A impressão tridimensional para a fabricação é um processo extremamente complexo, desafiando questões técnicas por toda parte. O primeiro desses desafios é a obtenção do material líquido. Se o material não está na forma líquida para começar, pode resultar em partículas em suspensão num veículo líquido, tendo-se que dissolver materiais no seio de um solvente, ou um polímero sólido ser derretido por fusão, ou a mistura de uma formulação de monómero ou pré-polímero com um

iniciador de polimerização. Em muitos casos, de outras substâncias, tais como agentes tenso-ativos são adicionados ao líquido para atingir características aceitáveis. Todas as indústrias de impressão 2D são dedicados à pesquisa de mistura de tintas para a impressão em duas dimensões, e é razoável supor que, no futuro, este também será o caso da impressão tridimensional.

O segundo obstáculo a superar é a formação de gotículas. Para usar o método de deposição a jato de tinta, o material tem de ser convertido a partir de um volume de líquido contínuo num número de pequenas gotículas discretas. Esta função é muitas vezes dependente de um relacionamento finamente ajustado entre o material a ser impresso, o hardware envolvido, e os parâmetros do processo, existe um número razoável de métodos utilizados para conseguir a formação de gotículas. Pequenas alterações nos materiais tais como a adição de pequenas partículas, pode mudar radicalmente o comportamento das gotas em formação, assim como pode introduzir alterações à configuração física.

Um terceiro desafio é o controle da deposição destas gotículas, o que implica questões de trajetória de voo de gotas, impacto e molhamento do substrato ou interação.

Em os processos de impressão, quer a cabeça de impressão ou o substrato encontra-se geralmente em movimento, de modo que o cálculo da trajetória das gotículas deve levar em conta esta questão.

Além do local de chegada das gotas a velocidade e tamanho de gota será também um fator a afetar as características de deposição, estes fatores devem ser medidos e controlados por meio do desaino e operação do bocal. A qualidade do impactado da gota também deve ser controlada; se gotículas mais pequenas, chamadas de satélites, desprendem-se da gotícula principal durante o voo, em seguida, o material é depositado espalhando-se sobre uma área maior do que o pretendido e assim a deposição não terá limites bem definidos. Da mesma forma, se as projeções das gotículas de impacto, formam o que é chamado de "coroa", resultados semelhantes ocorrerão. Todos os efeitos irão impactar negativamente na qualidade de impressão da peça impressa.

Ao mesmo tempo, a conversão das gotículas de material líquido e a geometria sólida devem ser cuidadosamente controladas.

A impressão direta baseia-se na mudança de fase do material impresso. Exemplos de modos de mudança de fase utilizados nas tecnologias atuais de impressão são: solidificação de um material fundido (por exemplo: cera, solda), a evaporação da parte líquida da solução (por exemplo: cerâmica), e a cura de um fotopolímero (por exemplo, Objet ®, máquinas PROJET ®) ou outras reações químicas. A mudança de fase deve ocorrer tanto durante o voo de gotículas quanto logo após o impacto, a hora e o local de esta conversão também afetará a interação da gota com o substrato, e a deposição final criada. Para reforçar ainda mais o complicado da questão é necessário saber que as gotas podem solidificar não uniformemente, a criação de empenamento e outros resultados indesejáveis podem ocorrer.

Na impressão direta, um desafio adicional surge: a de controlar a deposição sobre camadas de deposição anterior, em vez de apenas acontecer somente sobre o substrato inicial. As gotas irão interagir de forma diferente, por exemplo, com um substrato de chapa de metal que com uma superfície de gotículas de cera impressas anteriormente. Para criar as camadas de um objeto 3-D, cada camada depositada tem de ser integralmente ligada à camada anterior para evitar a delaminação, mas isto sem danificar a camada enquanto está sendo criada.

Máquinas disponíveis comercialmente tendem a abordar este problema utilizando um elemento para alisar a superfície periodicamente.

Considerações operacionais também representam um desafio no processo de planejamento para a impressão.

Por exemplo, como os bicos são tão pequenos, muitas vezes podem entupir, impedindo a saída das gotículas. Muita atenção tem sido dada à monitorização e manutenção do desempenho o bico durante a operação. A maioria das máquinas

em uso atualmente passa por purgas e ciclos de limpeza para manter os bicos os mais abertos possíveis.

Algumas máquinas podem também empregam sistemas complexos de sensores para identificar e compensar avarias ou bicos inconsistentes. Além disso, muitas máquinas, incluindo todas as máquinas comerciais de MA, têm bicos substituíveis em caso de bloqueio permanente.

Finalmente, para obter a melhor resolução de impressão, é vantajosa a produção de muitas pequenas gotículas muito próximas. No entanto, isto requer uma densidade elevada de bocais na cabeça de impressão, que é inatingível para muitos processos de produção de bicos industriais. Uma alternativa a densidade do bocal é fazer várias passagens sobre a mesma área, efetivamente usando o planejamento do processo, em vez de hardware para criar o efeito desejado. Mesmo nos casos em que a densidade alta de bicos no bocal é possível surgem problemas devido ao "crosstalk" - basicamente uma "sobreposição" dos diferenciais térmicos ou pressão utilizada para dirigir os jactos adjacentes.

Ao abordar um processo de impressão, estes numerosos desafios devem, de alguma maneira ser abordados sequencialmente: padrão de voo não pode ser estudado até que as gotas sejam formadas e camadas não podem ser investigadas até que a deposição de gotículas individuais seja controlada. Em termos de deposição de polímero funcional, o desafio de preparação do material é efetivamente abordado; numerosas resinas poliméricas e misturas já existem. É o segundo desafio - a formação de gotículas - por conseguinte, o fator de limitação na deposição destes materiais.

## 3 CONSIDERAÇÕES SOBRE METODOLOGIA DE PROJETO

### 3.1 Visão do projeto de engenharia

A missão do engenheiro é encontrar soluções para problemas técnicos. Para tanto ele se baseia em conhecimentos das Ciências naturais e da engenharia e leva em conta as condicionantes relativas aos materiais, tecnológicas e econômicas, bem como restrições legais, ambientais e aquelas impostas pelo ser humano. As soluções precisam atender aos objetivos prefixados e autopropostos. Após seu esclarecimento, os problemas são convertidos em subtarefas concretas que o engenheiro terá pela frente durante o processo de desenvolvimento do produto. Isto ocorre tanto no trabalho individual quanto no trabalho em equipe, no qual é realizado desenvolvimento interdisciplinar de produtos.

Na busca da solução e no desenvolvimento de um produto o projetista, sinônimo para engenheiro de desenvolvimento e engenheiro de projeto, atua numa posição relevante e responsável. Suas ideias, conhecimentos e talento determinam as características técnicas, econômicas e ecológicas do produto perante o fabricante e o usuário.

Desenvolver e projetar são atividades de interesse da engenharia que:

- abrangem quase todos os campos da atividade humana;
- aplicam leis conhecimentos das ciências naturais;
- adicionalmente se apoiam no conhecimento prático especializado;
- são em grande parte exercidas sob responsabilidade pessoal;
- criam os pressupostos para a concretização de ideias da solução.

Esta atividade multifacetada pode ser descrita sob diferentes pontos de vista. Situa-se o trabalho construtivo, cujo resultado é o anteprojeto técnico, no centro de influências interferentes de nossa vida cultural e técnica.

Segundo Pahl et al. (2005) a inserção do engenheiro de projeto ocorre em três níveis de atuação na sociedade:

- 1) Do ponto de vista da psicologia do trabalho, projetar é uma atividade intelectual, criativa, que requer uma base segura de conhecimentos nas áreas de matemática, física, química, mecânica, termodinâmica, mecânica dos fluidos, eletrotécnica, assim como de tecnologias de produção, ciência dos materiais e ciência do projeto, como também conhecimentos e experiências no campo a ser trabalhado. Concomitantemente, força de vontade, prazer em decidir, senso econômico, perseverança, otimismo e disposição em fazer parte de equipes são qualidades úteis, porém imprescindíveis para projetistas em postos de responsabilidade.
- 2) Do ponto de vista metodológico, projetar é um processo de otimização com objetivos predeterminados e condicionantes em parte conflitantes. Os requisitos variam em função do tempo, de modo que uma solução de projeto só pode ser objetivada ou almejada de maneira otimizada, sob as condicionantes existentes na época da solicitação.
- 3) Do ponto de vista organizacional, o projeto participa de forma significativa do ciclo de vida de um produto. O ciclo inicia por uma demanda do mercado ou por uma vontade, começando pelo planejamento do produto e, após a sua utilização, terminando na reciclagem ou num outro tipo de descarte.

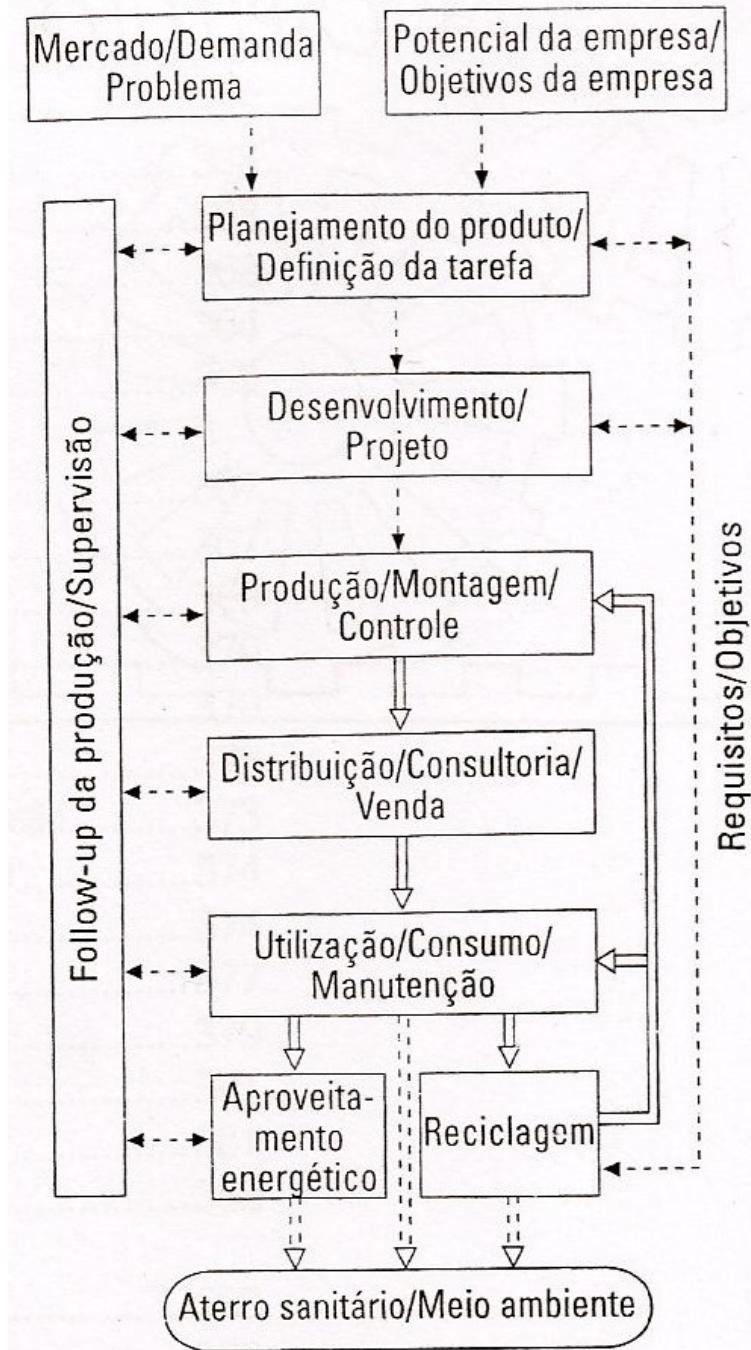


Figura 3.1 - Ciclo de vida de um produto  
Fonte: Pahl et al. (2005)

Esse processo também representa uma geração de valor desde a ideia até o produto no qual o projetista somente consegue levar a cabo sua tarefa se trabalhar em estreita colaboração com outras áreas e pessoas de outras especialidades.

Ainda segundo Pahl et al. (2005), as tarefas e atividades do projetista são influenciadas por diferentes aspectos:

Origem das tarefas: principalmente para produtos em série, as tarefas são preparadas pelo planejamento do produto que, além de outras atividades, deverá efetuar uma apurada pesquisa de mercado. O elenco dos requisitos elaborado pelo planejamento do produto frequentemente ainda deixa aberto um amplo espaço para as soluções do projetista.

Por outro lado, no caso de um pedido para um produto concreto unitário ou em pequena série frequentemente é preciso satisfazer requisitos quantitativos mais severos. O projetista se orienta de preferência pelo know-how da empresa ou se baseia em desenvolvimentos ou pedidos anteriores. O desenvolvimento se processa por etapas relativamente curtas com um risco limitado.

Caso o desenvolvimento não seja destinado para um produto completo, mas apenas para um subconjunto, os limites dos requisitos e de projeto serão ainda mais severos, e maior será a necessidade de entendimento com as demais áreas de projeto. No âmbito da realização da produção técnica de um produto, também se inserem tarefas de projeto de máquinas para a produção e testes, nas quais o atendimento da função e das condicionantes tecnológicas desempenha papel de destaque.

Organização da empresa: a organização de um processo de desenvolvimento ou de projeto se orienta primeiramente pela organização geral da empresa.

Nas formas de organização orientadas pelo produto, a responsabilidade central pelo desenvolvimento e subsequente produção de um grupo de produtos compete a diferentes setores da empresa (p. ex., divisão de turbocompressores, de compressores a pistão, divisão de engenharia de processos).

Nas estruturas de organização orientadas por problemas (p. ex., equipes para cálculos, tecnologia de comando e controle, projetos de engenharia mecânica), a divisão de trabalho exige a respectiva formulação das subtarefas (ou formulações de problemas) bem como uma coordenação, por exemplo, por meio de um gerente de projeto. Quando, no desenvolvimento de novos produtos pelas divisões ou pelos grupos de produtos, for formada uma equipe de desenvolvimento autônoma com

duração limitada, torna-se necessária uma coordenação por um gerente de produto. A equipe reporta seus resultados diretamente à gerência de desenvolvimento ou à direção da empresa.

Outras estruturas organizacionais podem ser criadas em função de uma apropriada divisão de trabalho com relação à etapa de projeto a ser executada (conceitual, anteprojeto, detalhamento): quanto à especialidade (projeto mecânico, projeto eletro-eletrônico, desenvolvimento de software): ou quanto à etapa de desenvolvimento a ser empreendida (desenvolvimento preliminar e testes, execução de um pedido). Além disso, em projetos de grande porte. Com várias especialidades bem diferenciadas, poderá ser vantajosa a construção paralela de subconjuntos.

A inovação implica em novos projetos, para novas formulações de tarefas e novos problemas são realizados utilizando novos princípios de solução. Tais princípios poderão resultar de uma seleção e combinação de princípios e tecnologias conhecidas. Caso contrário, terá que ser adentrada uma área técnica nova, inclusive nos casos em que colocações de tarefas conhecidas ou ligeiramente modificadas são solucionadas com o emprego de novos princípios de solução, estas serão consideradas como projetos novos. Geralmente, tais projetos requerem a passagem por todas as fases de um projeto, envolvimento de princípios físicos e de engenharia de processos, assim como uma abrangente elucidação técnica e econômica do problema. Projetos novos podem referir-se tanto a um produto completo ou somente a subconjuntos ou peças.

Nos projetos adaptativos conservam-se princípios de solução familiares e consagrados e a configuração é adaptada às novas condições periféricas. Mesmo assim, frequentemente faz-se necessário um projeto novo de peças ou subconjuntos específicos. Neste tipo de tarefa, passam a ocupar posição de destaque as questões geométricas, de resistência dos materiais, de produção e de tecnologia dos materiais.

No curso do desenvolvimento de um projeto alternativo de sistemas já existentes altera-se, dentro de limites, a escala e/ou o arranjo de componentes ou subconjuntos (p. ex., séries construtivas, sistemas modulares). Assim, como

acontece com um projeto original, o trabalho de projeto somente é requerido uma única vez e, ao longo do processamento do pedido não gera maiores problemas de projeto. Aqui também se enquadram os trabalhos de projeto onde, no caso de pedido, sob manutenção do princípio de solução e projeto básico já executado, somente são alteradas as dimensões de componentes específicos, isto é geralmente denominado de “projeto de princípio” ou “projeto com princípio fixo”.

Na prática, os tipos de projetos citados, que em geral servem apenas para uma classificação grosseira, frequentemente não permitem delimitações nítidas.

Quantidade de peças: projetos para produção individual ou de série reduzida, em função da inexistência de protótipo, requerem para fins de redução dos riscos uma previsão reforçados de todos os processos físicos e dos detalhes de configuração, onde a confiabilidade e a segurança em serviço são frequentemente prioritárias perante otimizações de natureza econômica.

Tarefas para produções em série e especialmente produções em massa requerem execução consciente, com auxílio de modelos de construção e de protótipos, principalmente quanto à adequada durabilidade e também com relação aos aspectos econômicos. Para tanto, em parte são necessárias várias etapas de desenvolvimento, Fig. 3.2.

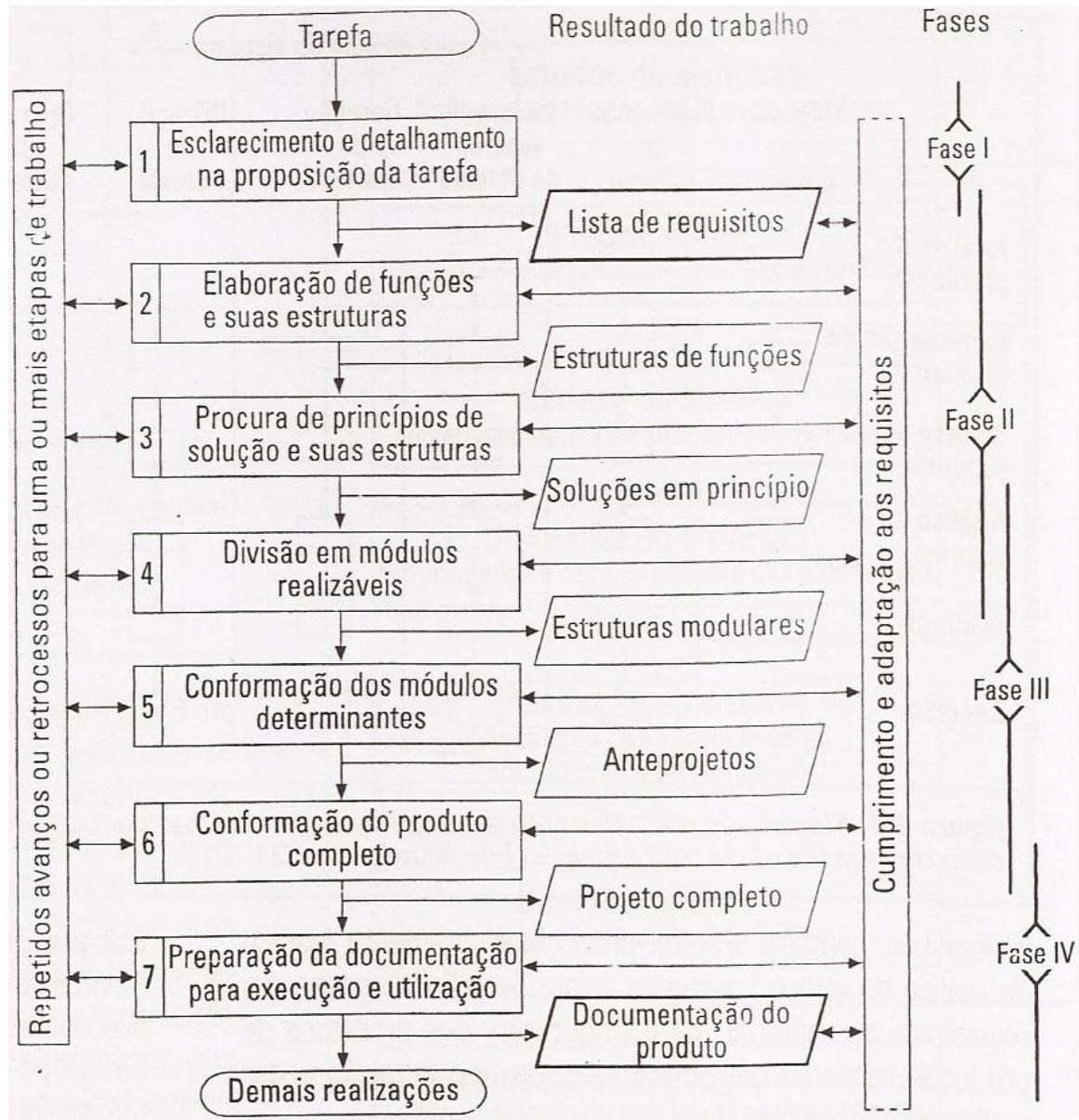


Figura 3.2 - Etapas do projeto

Fonte: Pahl et al. (2005)

Ramo de especialidade: a engenharia mecânica abrange um amplo espectro de problemas. Em consequência disso, os requisitos e o tipo da solução são extraordinariamente variados e sempre exigem um apropriado ajuste das ferramentas e dos métodos de solução. Características específicas não são raras.

Os objetivos estão relacionados com a solução dos problemas ou das tarefas orienta-se pelos objetivos a serem optimizados, levando em conta as condicionantes restritivas prefixadas. Assim, novas funções, maior durabilidade, custos menores,

problemas específicos de produção, novos requisitos ergonômicos e muitas outras coisas podem ser isoladamente ou de forma combinada, o objetivo de um desenvolvimento.

Não por último, uma crescente consciência ecológica exige uma nova concepção de produtos e de processos ou sua melhoria, onde a formulação da tarefa e o conceito de solução deverão ser repensados. Isso exige uma visão global do projetista. Muitas vezes em trabalho conjunto com especialistas de outras disciplinas.

Essa diversidade de tarefas e objetivos exige do projetista uma habilidade polivalente, assim como diferentes formas de procedimentos e ferramentas. Os conhecimentos de projeto requerido precisam ser amplos onde, para problemas especiais, deverão ser consultados especialistas. O domínio de uma metodologia geral de trabalho, dos métodos de solução e de avaliação de aplicação geral (cf. 3.2.2), bem como a consideração de novos campos de solução facilita a execução dessa variedade de atividades.

Portanto, as atividades do projetista podem ser desdobradas em:

- conceituais, ou seja, o esforço de busca do princípio da solução para o qual. além dos métodos de aplicação geral também servem métodos especiais.
- de pré-projeto, ou seja, trabalhos de concretização do princípio da solução pela definição da configuração e do material, para o qual são especialmente adequados os métodos;
- de detalhamento, ou seja, atividades referentes à preparação dos subsídios para a produção e utilização;
- atividades de cálculo, desenho e busca de informações, que incidem em todas as etapas de projeto.

Outra habitual estruturação generalista é a diferenciação entre as atividades de projeto diretas (por exemplo, calcular, configurar, detalhar) que se prestam diretamente ao encontro de soluções, e as atividades de projeto indiretas (p. ex., busca e preparação de informações, reuniões, gerenciamento) que só influenciam o progresso do trabalho de projeto indiretamente. Nisto deve-se procurar manter reduzida ao máximo a participação das atividades indiretas.

Por isso, num processo de projeto, as atividades necessárias precisam ser apropriadamente ordenadas num fluxo de trabalho claro, com etapas principais e etapas de execução, para que possam ser planejadas e controladas.

### **3.1.1 *Diretriz metodológica resultante***

A solução de problemas técnicos é determinada pelos objetivos a serem atingidos e pelas condicionantes restritivas. O atendimento da função técnica, sua realização econômica e a consideração da segurança para o homem e o ambiente/meio ambiente podem ser considerados os objetivos gerais. Unicamente. o atendimento da função técnica não corresponderia à colocação do problema, pois seria apenas um fim em si mesmo. Sempre é objetivada uma realização econômica. A preocupação com a segurança do homem e do ambiente já resulta tão-somente de razões éticas. Cada um dos objetivos citados também é condicionante para os demais objetivos.

Além disso, a solução de problemas técnicos está sujeita a condicionantes decorrentes da relação homem-máquina, da produção, das possibilidades de transporte, dos critérios para o uso etc., não importando se essas condicionantes são fixadas pelo problema concreto ou pelas condições atuais da tecnologia. No primeiro caso, trata-se de condicionantes específicas, no segundo de condicionantes gerais da tarefa que não são explicitamente mencionadas, mas implicitamente admitidas numa tarefa e, por isso, precisam ser levadas em conta.

Com base nas necessidades do trabalho de projeto, PAHL et al., (2005), denominou estas influências de categorias de propriedades, falando sobre

propriedades operacionais, ergonômicas, de aparência, de distribuição, de fornecimento, de planejamento de fabricação, de custos de projeto e de produção.

Portanto, além das inter-relações de função, funcionamento e configuração, a solução também deve satisfazer as condicionantes gerais ou resultantes da tarefa concreta. De forma resumida e abrangente, essas condicionantes permitem ser classificadas pelas seguintes características:

- Segurança: também no sentido da confiabilidade, disponibilidade;
- Ergonomia: relação homem-máquina e também modelagem da forma (design);
  - Produção: tipo e recursos de produção para a fabricação de componentes;
  - Controle: a qualquer momento durante o curso da produção do objeto;
  - Montagem: durante, após e fora da produção das peças;
  - Transporte: dentro e fora da fábrica;
  - Emprego: serviço, manuseio;
  - Manutenção: monitoramento, inspeção e reparo;
  - Reciclagem: reaproveitamento, recondicionamento, descarte, disposição final ou eliminação;
  - Gastos: custos, tempos e prazos.

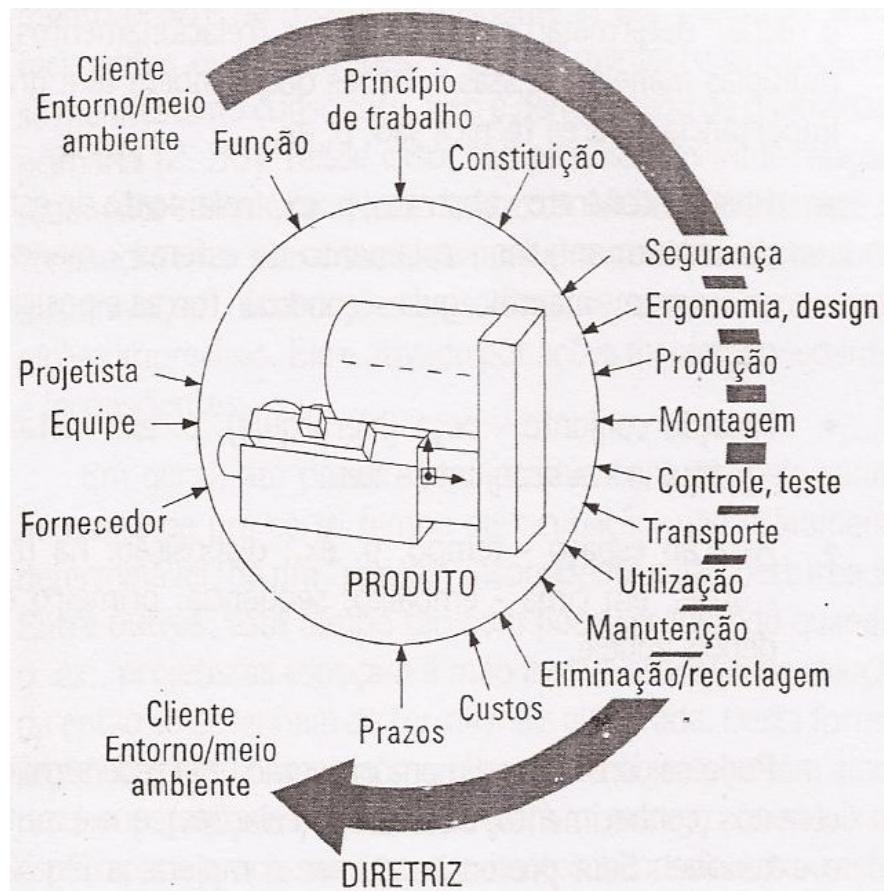


Figura 3.3 - Grandezas e condições que influenciam no desenvolvimento e na construção de um produto.

Fonte: Pahl et al. (2005)

As condicionantes deriváveis destas características, que normalmente redundam em requisitos, atuam sobre as estruturas de função, funcionamento e construção e também se influenciam mutuamente. Devido a isso, elas sempre serão usadas como uma linha mestra a ser considerada ao longo do processo de realização do projeto, devidamente ajustadas ao respectivo grau de materialização em cada uma das etapas principais Fig. 3.3.

Além disso, também há influências por parte do projetista, da equipe de desenvolvimento, e do subfornecedor e finalmente do cliente, do ambiente e das condições ambientais.

As citadas condicionantes já deveriam ser basicamente consideradas na concepção da estrutura de funcionamento. Na fase de projeto básico, onde a constituição da estrutura está em primeiro plano através da quantificação mais ou menos elaborada qualitativamente tanto o objetivo da tarefa como também as condicionantes gerais e específicas da tarefa precisam ser considerados de forma detalhada e bastante concreta. Isso ocorrerá em várias etapas de trabalho, por meio de informações, configuração de detalhes e eliminação de pontos fracos com uma renovada, porém mais restrita busca de soluções para sub-tarefas dos mais diversos tipos até que, com o detalhamento das especificações para a produção, o processo de projeto possa ser considerado como encerrado.

## **3.2 Procedimento metodológico para o desenvolvimento de um produto**

### ***3.2.1 Requisitos e necessidades***

Face à grande importância do desenvolvimento de um produto no momento certo e que desperte interesse por parte do mercado, torna-se necessário um procedimento para desenvolvimento de boas soluções, que seja planejável, flexível, otimizável e verificável. Tal procedimento só é aplicável quando, além do necessário conhecimento especializado, os projetistas souberem trabalhar de modo sistemático e essa metodologia de trabalho exigir ou for auxiliada por medidas organizacionais.

Pahl et al.(2005) distinguem a ciência de projeto e metodologia de projeto. Com a ajuda de métodos científicos a ciência de projeto visa analisar a constituição de sistemas técnicos e sua interação com a circunvizinhança de modo que, partindo das relações e dos componentes identificados no sistema posam ser derivadas regras para seu desenvolvimento.

Por metodologia de projeto, entende-se um procedimento planejado com indicações concretas de condutas a serem observadas no desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos, que resultaram de conhecimentos na área da ciência

de projeto e da psicologia cognitiva e também da experiência com diferentes aplicações. Disto fazem parte os procedimentos para interligação de etapas de trabalho e fases do projeto tanto pelo conteúdo quanto pela organização que de maneira flexível são adaptados ao respectivo problema. É necessária a observância dos objetivos gerais e a definição de regras e princípios (estratégias), especialmente para a configuração, bem como de métodos para solução de problemas de projeto ou sub-tarefas específicas.

Com isso, porém, não deve ocorrer a desvalorização da intuição ou de um projetista talentoso e experiente. Pretende-se o contrário. A incorporação de procedimentos metodológicos irá intensificar a capacidade de produção e de invenção. Qualquer método de trabalho, por mais lógica e metodicamente sofisticado, sempre irá requerer um elevado grau de intuição, ou seja, de lampejos que permitam idealizar ou identificar a solução global. Sem intuição o verdadeiro sucesso poderá ficar ausente.

Com os métodos de projeto é objetivado despertar as habilidades individuais do projetista por meio de diretrizes e ajuda. Potencializar sua disposição com relação à criatividade e simultaneamente evidenciar a necessidade de uma avaliação subjetiva do resultado. Assim geralmente é possível elevar o nível do departamento de projeto. Através do procedimento planificado, o próprio projeto se tornará comprehensível e possível de ser ensinado. O que foi percebido e apreendido não deverá ser obedecido como dogma, pelo contrário, já no subconsciente, o procedimento metodológico deveria conduzir a atividade do projetista em trajetórias e ideias próprias. Assim, interagindo com engenheiros de outras áreas e atividades, o engenheiro de projeto não só irá se impor como também exercer uma função executiva.

O projeto metodológico possibilita uma racionalização eficaz do processo de projeto e produção. Nos projetos novos, os procedimentos coordenados e progressivos, inclusive em níveis parcialmente mais abstratos, possibilitam a geração de documentação reaproveitável das soluções. A estruturação dos problemas e das tarefas facilita a percepção das possibilidades de emprego de soluções consolidadas provenientes de desenvolvimentos anteriores e a utilização

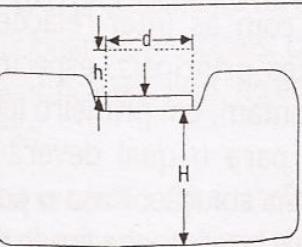
de catálogos de soluções. A progressiva concretização dos princípios de solução possibilita a seleção precoce e a otimização com menor volume de trabalho. Para o departamento de projeto, porém, sobretudo para o processo de produção. as séries construtivas e a metodologia modular representam um importante passo de racionalização.

A metodologia de projeto também é um pré-requisito imprescindível para um processo de projeto flexível e permanente, assistido por computador, que emprega modelos do produto armazenados na memória. Sem uma metodologia de projeto, não são possíveis o desenvolvimento de um sistema de programas baseados no conhecimento, o projeto de complexos de funcionamento controlados por computador. a aplicação de dados e programas arquivados na memória, a interligação de programas específicos principalmente de modeladores de geometria e programas de cálculo. Como também o tráfego do fluxo de dados e a interligação com dados dos demais setores da empresa (CIM, PDM). A sistematização dos procedimentos também facilita a divisão sensata de trabalho entre projetista e computador e uma técnica interativa amigável ao usuário.

A demanda por racionalização também abrange a responsabilidade do projetista pelos custos e pela qualidade. Pré-cálculos de custo mais precisos e rápidos com auxílio dos meios de informação aprimorados constituem uma exigência imperiosa para a área de projeto, assim como a detecção de pontos fracos. Para tanto, novamente são pré-requisitos a preparação sistemática da estrutura de construção e a documentação das informações.

A seguir um exemplo de uma lista de requisitos (Quadro 3.1):

Quadro 3.1 - Lista de requisitos para um sensor para medição de combustível em um veículo automotor

TH Darmstadt Dept. de Elementos de Máquinas do Projeto na Engenharia Prof. Dr.-Ing. G. Pahl		Lista de requisitos do sensor para indicação do conteúdo de um reservatório	Folha: página 1												
Modificação	F W	Requisitos	Responsável												
	W	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pré-sistema (reservatório, tanque)</li> </ul> <p>Geometria  <math>H=100 \text{ mm até } 600 \text{ mm}</math>  Volume: de <math>2 \text{ dm}^3</math> até <math>630 \text{ dm}^3</math></p> 													
	W	<p>Forma do reservatório dada, mas arbitrária (estabilidade da forma)  Reservatório parcialmente ou totalmente não estável com relação à forma</p> <p>Material: aço, plástico</p>													
	W	<p>Ligaçāo do reservatório  Engate tipo baioneta, engate de encaixe, superior ou lateral:  <math>d = \varnothing 71 \text{ mm}</math>, <math>h = 20 \text{ mm}</math>  Reservatório livre de pressão (ventilado)  Pressão de ensaio do reservatório: 0,3 bar</p>													
		<p>Conteúdo do reservatório, intervalo de temperatura</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Meio</th> <th>Faixa de medida C</th> <th>Faixa de armazenagem C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>gasolina</td> <td>-25 até +65</td> <td>-40 até +100</td> </tr> <tr> <td>óleo diesel</td> <td>-25 até +65</td> <td>-40 até +100</td> </tr> <tr> <td>óleo de motor</td> <td>até +140</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Meio	Faixa de medida C	Faixa de armazenagem C	gasolina	-25 até +65	-40 até +100	óleo diesel	-25 até +65	-40 até +100	óleo de motor	até +140		
Meio	Faixa de medida C	Faixa de armazenagem C													
gasolina	-25 até +65	-40 até +100													
óleo diesel	-25 até +65	-40 até +100													
óleo de motor	até +140														
	W	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pós-sistema (dispositivo de marcação)</li> </ul> <p>Sistemas com entrada de sinal elétrico  Mecanismo de medida por quociente de eletroimā rotativo  Mecanismo de medida termobimetálico  Calculadora de bordo (computador)</p> <p>Catálogo</p>	Catálogo												
		<p>Fonte de energia existente</p> <table> <tr> <td>Tensão nominal</td> <td>12 V, 24 V</td> </tr> <tr> <td>Tensão de serviço</td> <td>-10% até 20% da tensão nominal</td> </tr> <tr> <td>Corrente</td> <td>300 mA máxima</td> </tr> </table>	Tensão nominal	12 V, 24 V	Tensão de serviço	-10% até 20% da tensão nominal	Corrente	300 mA máxima							
Tensão nominal	12 V, 24 V														
Tensão de serviço	-10% até 20% da tensão nominal														
Corrente	300 mA máxima														

Fonte: Pahl et al. (2005)

### **3.2.2 Seleção de ideias para um projeto**

As ideias geradas primeiramente são submetidas a um método de seleção (cf. 3.2.3). Para essa seleção preliminar, são suficientes os critérios vinculados aos objetivos da empresa, desde que estimáveis. Pelo menos deverão ser levados em conta: Faturamento elevado, elevada parcela de mercado e vantagens funcionais para os usuários. Para uma seleção mais detalhada deverão ser empregados os demais critérios. No sentido de uma aplicação racional dos procedimentos de seleção, geralmente é suficiente trabalhar apenas com valorações binárias (sim/não), para distinguir ideias promissoras de produtos das demais.

### **3.2.3 Processo de seleção e avaliação de soluções**

Nesta etapa, podem-se desenvolver os processos de seleção e avaliação subsequente ao processo de criatividade e abstração.

#### **3.2.3.1 Seleção de variantes de soluções apropriadas**

No procedimento metodológico, almeja-se um campo de soluções, o mais amplo possível. Sob consideração dos critérios ordenadores e características imagináveis, consegue-se frequentemente um maior número de propostas de solução. Nesta abundância revelam-se ao mesmo tempo a força e a fraqueza da abordagem sistemática.

O grande número de soluções frequentemente não promissoras, teoricamente concebíveis, porém não realizáveis na prática, muitas vezes precisam ser limitados o quanto antes. Por outro lado, é preciso ficar atento para que princípios de trabalho adequados não sejam eliminados, pois em muitos casos, somente na sua combinação com outras estruturas aflorará uma estrutura de trabalho vantajosa. Um processo absolutamente seguro que evite decisões erradas não existe, mas com auxílio de um método de seleção sistemático e verificável, a seleção de uma solução promissora a partir de uma profusão de propostas de solução pode ser gerenciada mais facilmente.

Esse método de seleção distingue-se pelas duas atividades: eliminação e priorização.

Primeiro, descarta-se o absolutamente inadequado. Caso ainda restem muitas soluções, evidentemente dar-se-á preferência às melhores. Apenas aquelas que pareçam ser melhores são continuadas na sua concretização e novamente avaliadas.

Havendo numerosas propostas de solução, é útil compilar uma lista de seleção segundo Figura 3.5. A princípio, após cada etapa de trabalho, portanto logo após elaboração das estruturas de funções e também em todas as etapas subsequentes da busca da solução só se deveria continuar a desenvolver propostas de solução que:

- sejam compatíveis com a tarefa global e/ou entre si (critério A);
- satisfaçam as necessidades da lista de requisitos (critério B);
- possibilitem pressentir uma possibilidade de realização com relação ao nível de trabalho, tamanho, arranjo necessário, além de outros itens (critério C) e
- permitam antecipar um custo aceitável (critério D).

**Quadro 3.2 - Exemplo de uma lista de soluções para medir o conteúdo de um tanque**

<i>Número</i>	<i>Princípio da solução (sugestões)</i>	<i>Sinal</i>
	<b>1. Medida para líquido</b>	
	<b>1.1 mecânico estático</b>	
1	Apoiar o reservatório em três pontos. Medir as forças verticais e assim determinar o peso. (Eventualmente é suficiente a medida em um apoio.)	Força
2	Força de atração entre duas massas. A força é proporcional à massa e consequentemente à massa de líquido.	Força
	<b>1.2 físico atômico</b>	
3	Distribuição de uma porção radioativa no líquido	Concentração da intensidade de radiação
	<b>2. Medida da altura de líquido</b>	
	<b>2.1 mecânico estático</b>	
4	Flutuador com ou sem multiplicação por alavancas. Alavanca com deslocamento linear ou angular como saída. Resistência do potenciômetro como cópia do reservatório	Deslocamento
	<b>2.2 elétrico</b>	
5	Fio de resistência, quente no gás, frio no líquido. Da altura de líquido dependem: resistência total, volume (dependente da temperatura e do comprimento do fio)	Resistência ôhmica
6	Líquido como resistor ôhmico (dependente da altura). Variação da resistência com a variação da altura do líquido (condutor)	Resistência ôhmica
	<b>2.3 óptico</b>	
7	Fotocélulas no reservatório. Conforme a altura o líquido encobre mais ou menos fotocélulas. O número de sinais de luz é inverso à medida da altura de líquido.	Sinal de luz (discreto)
8	Transmissão escalonada de luz através do líquido. Na presença de líquido, transmissão da luz de um condutor para o outro (p. ex. de plexiglas), na presença de gás, reflexão total da luz	Sinal de luz (discreto)

Fonte: Pahl et al. (2005)

TH Darmstadt MuK		Lista de seleção para sensor de um medidor do conteúdo de um reservatório						Folha: / página:	
Assinalar variante da solução (Lv):	Julgar variantes da solução segundo critérios de avaliação:							DECIDIR	
	( + )	Sim	( - )	Não	( ? )	Faltam informações	( ! )	Verificar lista de requisitos	Marcar variantes da solução:
Observadas as compatibilidades							Satisfetidas as exigências da lista de requisitos		
Em princípio realizável							Dispêndio aceitável		
Observadas medidas de segurança direta							Preferida pela própria empresa		
Lv	A	B	C	D	E	F	G	Observações (sugestões, justificações)	Decisão
1	1	+	+	+	2			Número de pontos de medida	?
2	2	+	-					Armazenamento da massa	-
3	3	-						Radioatividade	-
4	4	+	+	+	+	(+)		(Continuar desenvolvimento das atuais soluções)	+
5	5	+	+	+	+				+
6	6	-						Líquido não condutor	-
7	7	+	+	+	+				+
8	8	+	+	+	+			Veja variante da solução 7	+
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
Data: 9.85				Responsável:					

Figura 3.4 – Exemplo de uma lista de seleção, utilizada para seleção sistemática. Os valores 1, 2, 3, ... são variantes das propostas de soluções apresentadas na Tab. 3.4. A coluna das observações realça os motivos da falta de informação ou de eliminação  
Fonte: Pahl et al. (2005)

Soluções inadequadas são eliminadas pelos critérios citados, aplicados na ordem indicada. Os critérios A e B são apropriados para decisões do tipo sim-não e são empregados sem maiores problemas. Para os critérios C e D, frequentemente é necessário um exame de cunho mais quantitativo. Porém, isso somente deverá ser feito, caso os dois critérios anteriores (A e B) possam ser respondidos afirmativamente.

Como a avaliação com respeito aos critérios C e D envolve considerações quantitativas, eles podem servir tanto para a eliminação de soluções, por exemplo, por um nível de trabalho insuficiente ou um custo muito elevado. Mas também para dar preferência a um nível de trabalho especialmente elevado, a uma reduzida demanda de espaço e à expectativa de baixo custo, desde que ficar além ou aquém proporcione vantagens importantes.

Uma preferência é justificável quando, entre as muitas soluções possíveis houver aquelas que:

- permitam medidas de segurança diretas ou apresentem pressupostos ergonômicos favoráveis (critério E) ou
- por pertencerem ao ramo de atividade da empresa com know-how, materiais e procedimentos conhecidos, bem como apresentarem uma condição propícia quanto à obtenção de patentes são fáceis de realizar (critério F). Também podem ser adotadas outras ou novas características de seleção que pareçam mais relevantes para a avaliação.

Deve-se ressaltar que a seleção com base em critérios preferenciais somente é recomendada quando as variantes presentes estejam numa quantidade tal, que a avaliação individual não pareça apropriada, devido à elevada demanda de tempo e esforço.

Se, na sequência colocada, um critério conduz à eliminação de uma proposta, os critérios restantes não são aplicados a essa proposta de solução. A princípio,

somente se dá seguimento às variantes de solução que atendam a todos os critérios. Às vezes, por falta de informação é impossível decidir a questão.

Nas variantes aparentemente promissoras, que satisfazem os critérios A e B, esta lacuna precisa ser preenchida e a proposta reavaliada, a fim de não se passar ao largo de boas soluções.

A citada sequência dos critérios foi escolhida, objetivando um procedimento que poupe trabalho; assim, não se objetivou uma sequência específica em função da tarefa no significado dos critérios.

O processo de seleção foi esquematizado conforme Tab. 3.5 para facilitar sua implantação e verificação. Lá os critérios estão relacionados e as razões da eliminação para cada proposta de solução estão registradas. A experiência tem demonstrado que o procedimento de seleção descrito pode ser executado rapidamente fornece uma visão de conjunto dos motivos da seleção e fornece uma documentação apropriada em forma de lista de seleção.

Com um número menor de propostas de solução, elimina-se pelos mesmos critérios, porém, de modo menos formal.

O exemplo registrado refere-se a propostas de solução para um sensor de medição do conteúdo de um tanque de acordo com a lista de requisitos da Tab. 3.3

### **3.2.3.2 Avaliação das variantes da solução**

As variantes de solução apontadas pelo processo de seleção como dignas de uma continuação de seu desenvolvimento, normalmente precisam ser mais concretizadas antes da avaliação final, na qual serão aplicados critérios de avaliação mais detalhados e, na medida do possível, quantificáveis. Essa avaliação envolve a atribuição de valores técnicos, ecológicos, econômicos e de segurança. Para tanto foram desenvolvidos processos de avaliação que, mediante apropriada escolha dos critérios de avaliação, são universalmente aplicáveis na avaliação de sistemas

técnicos e não técnicos e em qualquer fase do desenvolvimento de um produto. Métodos de avaliação, por sua natureza, são mais trabalhosos do que os processos de seleção e, por isso, somente são empregados depois do encerramento das etapas de trabalho mais relevantes, a fim de calcular o “valor” atual alcançado por uma solução. Em geral, isto acontece no preparo de decisões básicas relativas ao rumo da solução ou no fim da etapa conceitual ou de configuração.

### ***3.2.4 Fundamentos dos métodos de avaliação***

Uma avaliação deve calcular o “valor”, “benefício” ou “potência” de uma solução em relação a um objetivo preestabelecido. O objetivo é indispensável, uma vez que o valor de uma solução não pode ser considerado em absoluto, mas somente mensurado em relação a certos requisitos. Uma avaliação envolve a comparação de variantes da solução entre si ou, no caso de comparação com uma solução ideal hipotética, envolve uma pontuação, como grau de aproximação dessa solução ideal.

A avaliação não pode ser baseada em aspectos pontuais específicos, como custos de produção, questões de segurança, de ergonomia ou do meio ambiente, mas, de conformidade com os objetivos gerais. Deve levar em conta todas as influências na justa proporção.

Por isso, são necessários métodos que permitam uma avaliação mais abrangente. Eles consideram um amplo leque de objetivos (requisitos específicos da tarefa e condicionantes gerais) e as características que os satisfazem. Os métodos não devem poder processar apenas as características quantitativas, mas também as qualitativas das variantes, para que possam ser aplicados inclusive à fase de concepção, com seu baixo grau de concretização e respectivo estágio de conhecimentos. Para tanto, os resultados precisam ser suficientemente confiáveis. Além disso, é exigível reduzido volume de trabalho, bem como ampla transparência e reprodutibilidade. Atualmente, a análise do valor de valores da engenharia de sistemas e a avaliação técnico-econômica, são os métodos mais utilizados.

A seguir, (*cf. 3.3.1*) é exposto o procedimento básico de uma avaliação onde foram incorporadas as diferentes propostas e conceitos da análise de valores.

### ***3.2.4.1 Identificação de critérios de avaliação***

O primeiro passo em qualquer avaliação é a elaboração do conjunto de objetivos, dos quais serão derivados os critérios pelos quais as variantes poderão ser avaliadas. Para tarefas técnicas, tais objetivos resultam, sobretudo, das necessidades da lista de requisitos e das condicionantes gerais, que frequentemente são reconhecidos durante a elaboração da solução.

Normalmente, a meta imaginada engloba várias metas que não só introduzem uma diversidade de fatores técnicos, econômicos e de segurança, mas também podem ter relevância diferenciada.

No estabelecimento dos objetivos, precisam ser satisfeitas, tanto quanto possível, as seguintes condições:

- As metas devem atender os requisitos decisivos relevantes e os condicionantes gerais da forma mais completa possível, a fim de evitar que um critério essencial não seja considerado.
- As metas individuais, pelas quais a avaliação se orienta, precisam ser amplamente independentes entre si, ou seja, as providências para elevação do valor de uma variante em relação a um objetivo não podem influenciar os valores da variante em relação a outros objetivos.
- Se o trabalho para a aquisição das informações for aceitável, as características do sistema a ser avaliado em relação aos objetivos deveriam ser expressas, se possível, em termos verbais quantitativos ou ao menos qualitativos.

A compilação desses objetivos depende em elevado grau do propósito da avaliação em questão, ou seja, da etapa de projeto e do grau de inovação do produto.

Os critérios de avaliação podem ser diretamente deduzidos das metas apuradas. Por causa da subsequente atribuição de valores, todos os critérios devem receber uma formulação positiva, ou seja, dotados de um sentido de avaliação uniforme, por exemplo:

- “Baixo ruído” ao invés de “barulhento”;
- “Maior eficiência” ao invés de “grandes perdas”;
- “Baixa manutenção” ao invés de “requer manutenção”.

A análise de valor de benefício sistematiza essa etapa de trabalho pela elaboração de urna árvore de objetivos, na qual cada um dos objetivos é subdividido numa ordem hierárquica. Na vertical, as metas são lançadas em níveis de complexidade crescente e, na horizontal, os objetivos são lançados por setores, por exemplo, setor técnico, setor econômico ou, por diferentes importâncias (metas principais e secundárias) (Fig. 3.6). Devido à desejada independência, as metas de nível mais alto só devem ser interligadas com as metas do nível contíguo, imediatamente abaixo. Essa ordem hierárquica facilita ao projetista julgar se foram incluídas todas as metas relevantes para a decisão. Além do mais, simplifica a avaliação importância relativa das metas no valor global da solução. Os critérios de avaliação, que pela análise de valor também são denominados de critérios-alvo, são então derivados das metas das etapas de menor complexidade.

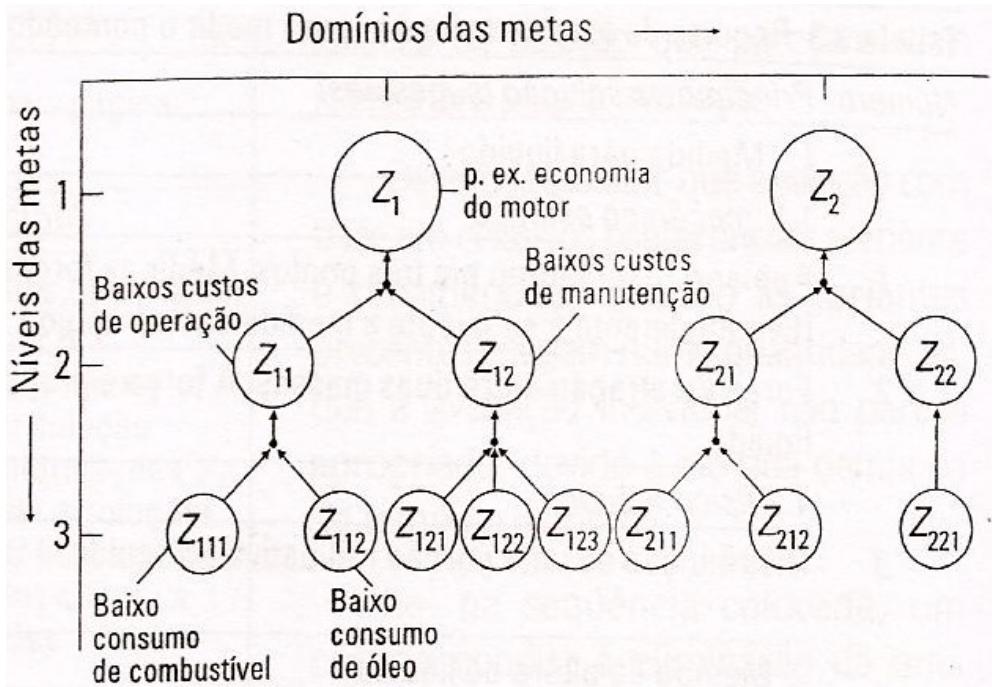


Figura 3.5 – Estrutura de um sistema de metas  
Fonte: Pahl et al. (2005)

#### A. Análise da relevância para o valor global

Para formular critérios de avaliação, é necessário identificar sua importância relativa (peso) para o valor global da solução, para que critérios eventualmente irrelevantes possam ser eliminados antes de iniciar a avaliação propriamente dita. Apesar de terem relevância diferente, os critérios de avaliação remanescentes são tipificados por "fatores de ponderação ou peso" que serão levados em conta na subsequente etapa de avaliação. Um fator de ponderação é um número real, positivo. Ele exprime a contribuição relativa de um critério de avaliação (meta).

Foi sugerido que essas ponderações já fossem atribuídas aos desejos na lista de requisitos, mas isso somente seria possível se na elaboração da lista de requisitos estas vontades já pudessem ser ordenadas por ordem de importância. Porém, neste estágio prematuro esse ordenamento frequentemente não é possível. A experiência mostra que muitos critérios de avaliação só afloram no curso do desenvolvimento de uma solução e, então, sua importância se modifica. Contudo é confortador quando a relevância das vontades puder ser estimada na preparação da

lista de requisitos, pois nessa ocasião, os interlocutores envolvidos normalmente estão disponíveis.

Na análise de valores, pondera-se com fatores entre 0 e 1 (ou 0 e 100). Além disso, a soma dos fatores de todos os critérios de avaliação (metas do nível de menor complexidade) deverá ser igual a 1 (ou 100), visando a uma ponderação porcentual das metas. A elaboração de uma árvore de metas facilita essa ponderação. Esse procedimento é mostrado basicamente na Fig. 3.8

Aqui, os objetivos foram ordenados, por exemplo, em quatro níveis de objetivos de complexidade decrescente e, dotados de fatores ponderais. A avaliação progride por etapas, caminhando do nível de objetivos de maior complexidade para o nível Contíguo de menor complexidade. Assim, as três metas  $Z_{11}$ ,  $Z_2$ ,  $Z_{13}$  do segundo nível serão primeiramente ponderadas em relação à meta  $Z_1$ , nesse caso, com 0,5, 0,25 e 0,25. A soma dos fatores de ponderação de qualquer nível de metas deve ser sempre (somatório de  $g(i)$ ) igual a 1. Segue-se a ponderação das metas do terceiro nível com relação às submetas do segundo nível. Assim, a relevância das metas  $Z_{111}$  e  $Z_{112}$  em relação à meta de nível superior  $Z_{11}$  foi fixada em 0,67 e 0,33. Procede-se analogamente com as demais metas. O fator de ponderação da meta de um determinado nível em relação à meta  $Z_1$  é obtido pela multiplicação do fator de ponderação deste nível pelos fatores de ponderação dos níveis de metas superiores; por exemplo, se a meta  $Z_{11}$  em relação à meta  $Z_{111}$  do nível imediatamente acima tem como fator de ponderação 0,25, com relação à meta  $Z_1$  terá como fator de ponderação  $0.25 \times 0.67 \times 0.5 \times 1 = 0.09$ . Essa ponderação por níveis normalmente possibilita uma pontuação mais realista, pois é mais fácil ponderar duas ou três metas em relação a uma meta imediatamente superior do que limitar a ponderação a um mesmo nível principalmente para as metas dos níveis mais baixos. A Fig. 3.6 dá um exemplo concreto do procedimento recomendado.

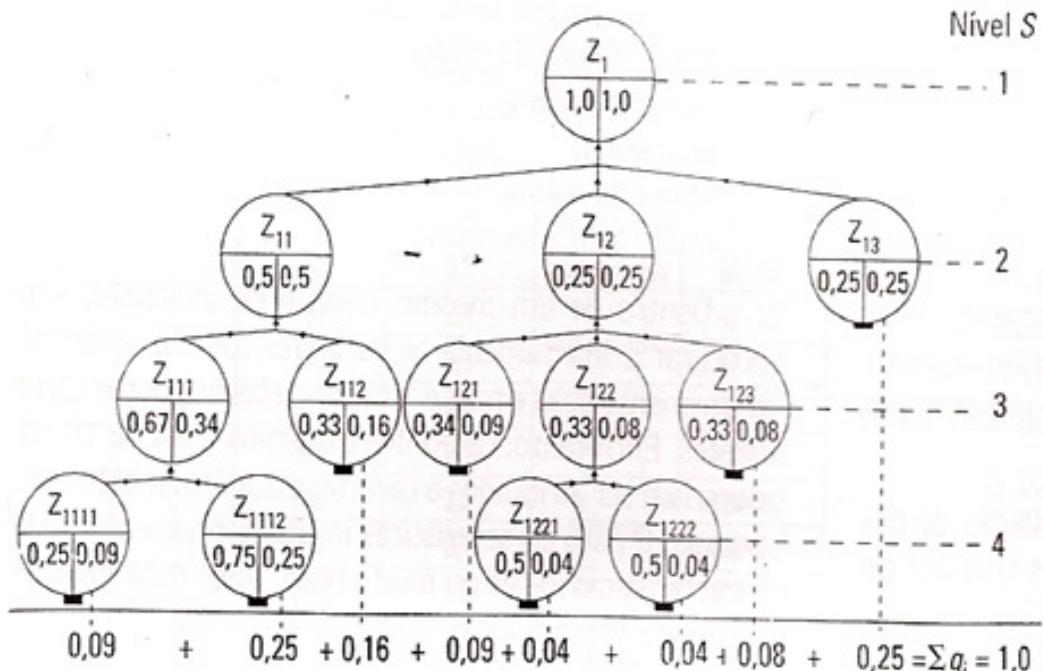


Figura 3.6 – Determinação por níveis dos fatores de ponderação dos objetivos de um sistema baseados em metas

Fonte: Pahl et al. (2005)

### 3.2.4.2 Composição de parâmetros

Depois de estabelecer critérios de avaliação e definir sua relevância, na etapa subsequente de avaliação das variantes, os parâmetros conhecidos ou determinados analiticamente, são correlacionados com esses critérios. Esses parâmetros podem ser quantificáveis ou, caso isso não seja possível, devem ser feitas asserções verbais, concretas. Mostrou-se prático correlacionar esses parâmetros com os critérios de avaliação numa folha de avaliação, antes de efetuar a avaliação. A tabela 3.3 mostra uma dessas folhas onde parâmetros relevantes ou que satisfazem os critérios de avaliação, foram lançados na coluna da respectiva variante. Como exemplo, servem as grandezas usadas para avaliação de motores de combustão interna. Nota-se que critérios de avaliação, principalmente quando expressos verbalmente e parâmetros podem ser formulados da mesma forma.

Tabela 3.3 – Relacionamento entre critérios de avaliação e parâmetros em uma lista de avaliação

Critérios de avaliação		Parâmetros	Variante $V_1$ (p.ex. $M_1$ )			Variante $V_2$ (p.ex. $M_2$ )			...	Variante $V_i$			...	Variante $V_m$		
			carac- terística	valor	valor ponderado	carac- terística	valor	valor ponderado		carac- terística	valor	valor ponderado		carac- terística	valor	valor ponderado
Nr.	fator	unidade	$e_{11}$	$w_{11}$	$WG_{11}$	$e_{12}$	$w_{12}$	$WG_{12}$	...	$e_{ij}$	$w_{ij}$	$WG_{ij}$	...	$e_{im}$	$w_{im}$	$WG_{im}$
1	baixo consumo de combustível	0,3	consumo de combustível	g/kWh	240			300					...	$e_{1j}$		
2	construção leve	0,15	potência específica	kg/kW	1,7			2,7					...	$e_{2j}$		
3	fácil fabricação	0,1	simplicidade das peças fundidas	—	baixo			médio					...	$e_{3j}$		
4	elevado tempo de vida	0,2	tempo de vida	quilome- tragem	80.000			150.000					...	$e_{4j}$		
...	...	...	...	...	...			...					...	...	...	
$i$	$g_i$					$e_{i1}$		$e_{i2}$					...	$e_{ij}$		
...	...	...	...	...	...			...					...	...	...	
$n$	$g_n$					$e_{n1}$		$e_{n2}$					...	$e_{nj}$		
	$\sum_{i=1}^n g_i = 1$															

Fonte: Pahl et al. (2005)

Também se fala de uma “etapa objetiva” que antecede a “etapa subjetiva” de avaliação.

A análise de valores denomina estes parâmetros de variáveis-alvo e junto com os critérios de avaliação (critérios-alvo) as agrupa em uma matriz-alvo. A tabela 3.4 dá um exemplo prático disso.

Tabela 3.4 Lista de avaliação complementada com valores numéricos, a maneira de exemplo

Critérios de avaliação		Parâmetros	Variante $V_1$ (p.ex. $M_1$ )			Variante $V_2$ (p.ex. $M_2$ )			...	Variante $V_i$			...	Variante $V_m$					
			carac- terística	valor	valor ponderado	carac- terística	valor	valor ponderado		carac- terística	valor	valor ponderado		carac- terística	valor	valor ponderado			
Nr.	Fator	Unidade	$e_{11}$	$w_{11}$	$WG_{11}$	$e_{12}$	$w_{12}$	$WG_{12}$	...	$e_{ij}$	$w_{ij}$	$WG_{ij}$	...	$e_{im}$	$w_{im}$	$WG_{im}$			
1	baixo consumo de combustível	0,3	consumo de combustível	g/kWh	240	8	2,4	300	5	1,5	...	$e_{1j}$	$w_{1j}$	$WG_{1j}$	...	$e_{1m}$	$w_{1m}$	$WG_{1m}$	
2	construção leve	0,15	potência específica	kg/kW	1,7	9	1,35	2,7	4	0,6	...	$e_{2j}$	$w_{2j}$	$WG_{2j}$	...	$e_{2m}$	$w_{2m}$	$WG_{2m}$	
3	fácil fabricação	0,1	simplicidade das peças fundidas	—	compli- cado	2	0,2	médio	5	0,5	...	$e_{3j}$	$w_{3j}$	$WG_{3j}$	...	$e_{3m}$	$w_{3m}$	$WG_{3m}$	
4	elevado tempo de vida	0,2	tempo de vida	quilome- tragem	80.000	4	0,8	150.000	7	1,4	...	$e_{4j}$	$w_{4j}$	$WG_{4j}$	...	$e_{4m}$	$w_{4m}$	$WG_{4m}$	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...		
$i$	$g_i$					$e_{i1}$	$w_{i1}$	$WG_{i1}$	$e_{i2}$	$w_{i2}$	$WG_{i2}$	...	$e_{ij}$	$w_{ij}$	$WG_{ij}$	...	$e_{im}$	$w_{im}$	$WG_{im}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
$n$	$g_n$					$e_{n1}$	$w_{n1}$	$WG_{n1}$	$e_{n2}$	$w_{n2}$	$WG_{n2}$	...	$e_{nj}$	$w_{nj}$	$WG_{nj}$	...	$e_{nm}$	$w_{nm}$	$WG_{nm}$
	$\sum_{i=1}^n g_i = 1$								$Gw_1$	$Gwg_1$			$Gw_2$	$Gwg_2$			$Gw_m$	$Gwg_m$	

Fonte: Pahl et al. (2005)

Resumindo, constata-se na determinação dos valores que, tanto na construção de uma função de valor, como também de um esquema de avaliação, há uma possibilidade de influência fortemente subjetiva. Constituem exceções apenas os raros casos em que se consegue encontrar correlações inequívocas, se possível comprováveis experimentalmente, entre as ideias de valor e os parâmetros, como por exemplo, na avaliação do ruído de máquinas, nas quais a correlação entre o valor, ou seja, a proteção da audição e o parâmetro da intensidade de ruído em dB são conhecidos na ergonomia.

Os valores assim apurados para cada urna das variantes da solução com base em cada um dos critérios de avaliação (valores parciais), para fins da avaliação, serão lançados na lista de avaliação da tabela 3.5.

No caso de critérios de avaliação com diferentes relevâncias para o valor global da solução, os fatores de ponderação definidos na segunda etapa também serão considerados. Isto ocorre pela multiplicação de cada valor parcial  $w_{ij}$  pelo respectivo fator de ponderação  $g_i$ . O valor ponderado resulta em:  $wg_{ij} = g_i \cdot w_{ij}$ .

A tabela 3.5 mostra um exemplo prático com ponderação. A análise de valores considera os valores parciais não ponderados como valores-alvo e os valores ponderados como valores-úteis.

Tabela 3.5 Avaliação de quatro variantes de solução para o banco de provas de carga pulsante.

Criterios de avaliação			Parâmetros			Proprie-dades $\theta_{ij}$	Variante $V_1$ Valor $w_{ij1}$	Valor ponderado $wg_{ij1}$	Proprie-dades $\theta_{ij2}$	Variante $V_2$ Valor $w_{ij2}$	Valor ponderado $wg_{ij2}$	Proprie-dades $\theta_{ij3}$	Variante $V_3$ Valor $w_{ij3}$	Valor ponderado $wg_{ij3}$	Proprie-dades $\theta_{ij4}$	Variante $V_4$ Valor $w_{ij4}$	Valor ponderado $wg_{ij4}$
N	fator	Unid.	Variante $V_1$ Valor $w_{ij1}$	Valor ponderado $wg_{ij1}$	Variante $V_2$ Valor $w_{ij2}$	Valor ponderado $wg_{ij2}$	Variante $V_3$ Valor $w_{ij3}$	Valor ponderado $wg_{ij3}$	Variante $V_4$ Valor $w_{ij4}$	Valor ponderado $wg_{ij4}$							
1	Pouco desgaste	0,556	Magnitude do desgaste	—	elevado	3	0,168	médio	6	0,336	médio	4	0,224	baixo	6	0,336	
2	Pouca sensibilidade a vibrações	0,14	Freqüência angular natural	s <sup>-1</sup>	410	3	0,420	2,370	7	0,90	2,370	7	0,90	< 410	2	0,280	
3	Poucas influências Perturbadoras	0,084	Influências perturbadoras	—	elevado	2	0,168	baixo	7	0,588	baixo	6	0,504	(médio)	4	0,336	
4	Tolerância à sobrecarga	0,12	Reserva de carregamento	%	5	5	0,600	10	7	0,840	10	7	0,840	20	8	0,960	
5	Alta confiabilidade dos componentes	0,21	Segurança mecânica esperada	—	médio	4	0,840	elevado	7	1,470	elevado	7	1,470	bem elevado	8	1,680	
6	Pequena possibili-dade de erros de operação	0,09	Possibilidade de erros operacionais	—	elevado	3	0,270	baixo	7	0,630	baixo	6	0,540	médio	4	0,360	
7	Pequena diversida-de de componentes	0,03	Diversidade de componentes	—	médio	5	0,150	médio	4	0,120	médio	4	0,120	baixo	6	0,180	
8	Pouca complexida-de dos componentes	0,012	Complexidade dos componentes	—	baixo	6	0,72	baixo	7	0,004	médio	5	0,060	elevado	3	0,036	
9	Muitos compo-nentes padronizados e fornecedores	0,018	Participação de componentes padronizados e de fornecedores	—	baixo	2	0,036	médio	6	0,108	médio	6	0,108	elevado	8	0,144	
10	Montagem simples	0,04	Simplicidade de montagem	—	baixo	3	0,120	médio	5	0,200	médio	5	0,200	elevado	7	0,280	
11	Conservação simples	0,06	Despesa de conservação mínima em relação ao tempo e ao custo	—	médio	4	0,240	baixo	8	0,480	baixo	7	0,420	elevado	3	0,180	
12	Troca rápida dos corpos-de-prova	0,084	Tempo de substituição dos corpos-de-prova	min	180	4	0,336	120	7	0,588	120	7	0,588	180	4	0,336	
13	Fácil acesso ao sistema de medição	0,056	Acessibilidade do sistema de medição	—	bom	7	0,392	bom	7	0,392	bom	7	0,392	médio	5	0,280	
		$\Sigma g_i=1,0$					$Gw_1=51$ $W_1=0,39$	$Gw_1=3,812$ $W_1=0,38$		$Gw_2=85$ $W_2=0,65$	$Gw_2=6,816$ $W_2=0,68$		$Gw_3=78$ $W_3=0,80$	$Gw_3=6,446$ $W_3=0,64$		$Gw_4=68$ $W_4=0,52$	$Gw_4=5,388$ $W_4=0,54$

Fonte: Pahl et al. (2005)

#### A. - Determinação do valor global:

Depois de obter os subvalores de cada variante, é necessário determinar seu valor global.

Para a avaliação de produtos técnicos consolidou-se a somatória dos subvalores que, a rigor, só é válida com a clara independência dos valores atribuídos pelos critérios de avaliação. Mesmo que esse pressuposto seja atendido apenas parcialmente, a adoção de uma estrutura aditiva para o valor global parece justificada.

O valor global de uma variante será então calculado por:

$$\text{Não-ponderado: } Gwj = \sum_{i=1}^n wij \quad [3.1]$$

$$\text{Ponderado: } Gwgj = \sum_{i=1}^n gi \cdot wij = \sum_{i=1}^n wgij \quad [3.2]$$

Se as informações disponíveis sobre as características de todas as variantes do conceito permitirem estimativas econômicas concretas, é recomendável calcular uma valoração técnica  $W_t$  e uma valoração econômica  $W_w$  separadamente.

- Comparação de variantes de solução

Com base na regra da somatória é possível avaliar as variantes de diversas maneiras.

Determinação do valor global máximo: este método avalia como sendo a melhor variante aquela que possui o maior valor global.

$$Gwj \rightarrow \text{Máx} \quad \text{Ou} \quad Gwgj \rightarrow \text{Máx} \quad [3.3]$$

Trata-se portanto de uma comparação relativa entre as variantes. É utilizada pela análise de valores.

### 3.3 Estimativas das incertezas da avaliação

Possíveis erros ou incertezas do método de avaliação proposto podem ser classificados em dois grupos principais, a saber: erros subjetivos e falhas básicas inerentes ao próprio método.

Erros subjetivos podem resultar de:

- abandono de uma posição imparcial, ou seja, adoção de uma posição fortemente subjetiva. Essa avaliação subjetiva, por exemplo, pode ocorrer inconscientemente a um projetista que compara seu próprio projeto com propostas apresentadas por outros. Por isso, é necessária uma avaliação por diferentes pessoas, se possível, de diferentes áreas de projeto e de produção. Recomenda-se ainda, com insistência,

rotular as variantes por uma designação neutra, por exemplo, A, B, C, etc., e não por solução “João”, ou “Proposta fábrica de Projetos”, pois poderão suscitar identificações desnecessárias com emoções prejudiciais;

- uma esquematização ampla do procedimento também contribui para a derrubada de influências subjetivas;
- comparação de variantes sempre pelos mesmos critérios de avaliação, mas que não são igualmente apropriados para todas as variantes. Esse erro já pode ser percebido na determinação dos parâmetros e sua correlação com os critérios de avaliação. Se, para variantes específicas, não for possível determinar a magnitude dos parâmetros com respeito a determinados critérios de avaliação, deve-se reformular ou eliminar esses critérios a fim de não se deixar induzir por uma avaliação incorreta dessas variantes específicas;
- variantes são avaliadas isoladamente e não uma após a outra segundo os critérios de avaliação estabelecidos. Por sua vez, cada critério tem de ser aplicado a todas as variantes (linha por linha da lista de avaliação), a fim de reduzir o preconceito contra uma variante específica;
- forte dependência dos critérios de avaliação entre si;
- seleção de funções de valor inadequadas;
- critérios de avaliação incompletos. Esse erro é enfrentado por obediência a um *checklist* adaptado aos critérios de avaliação da respectiva fase de projeto

Erros inerentes ao processo dos métodos de avaliação propostas devem-se à inevitável “incerteza do prognóstico”, que acontece porque as magnitudes dos parâmetros previstos, e com isso os valores, não são grandezas fixas imutáveis, porém variáveis aleatórias sujeitas a incertezas. Estes erros podem ser reduzidos de forma significativa, caso se faça uma estimativa das dispersões.

Com relação à incerteza do prognóstico, recomenda-se, portanto, somente expressar os parâmetros quantitativamente, quando isto for possível com certa precisão. Caso contrário, é mais correto empregar estimativas verbais (p. ex., alto, médio, baixo), cujo grau de incerteza pode ser percebido claramente. Valores numéricos, em contrapartida, são perigosos, pois induzem a uma falsa sensação de certeza.

Com um número suficientemente grande de critérios de avaliação e quando o nível dos subvalores da respectiva variante for razoavelmente compensado, o valor global fica subordinado um efeito estatístico compensador dos valores individuais calculados, em parte, de forma muito otimista e, em parte, de forma muito pessimista, de modo que resulta um valor global relativamente correto.

Incertezas na avaliação decorrem não apenas das incertezas do prognóstico, quer dizer, de incertezas no conhecimento dos princípios de solução e sua realização, mas também, por incertezas na formulação dos requisitos e na descrição da solução.

## 4 ESTUDO DE CASO

As máquinas comerciais utilizadas em manufatura aditiva possuem tecnologias encapsuladas (devido ao serviço de garantia e manutenção) e dependência de materiais (normalmente importados). Essas condições praticamente inviabilizam o uso dessas máquinas em ambientes de pesquisa, que requerem tecnologia aberta, tanto para acesso aos mecanismos de impressão tridimensional, *hardware* e programas computacionais (de interface). A inserção significativa da manufatura aditiva na obtenção de protótipos visuais, funcionais e até mesmo componentes finais também impulsionam sua aplicação em centros de pesquisa e desenvolvimento, tanto para a melhoria da precisão e repetibilidade do projeto mecânico, quanto das tecnologias de deposição. Além desses requisitos, estudos e desenvolvimento de materiais poliméricos e cerâmicos, com porosidade controlada (permeabilidade), bem como biomateriais sinalizam uma nova perspectiva dentro de aplicações da área de saúde tecnologia.

Segundo INFORÇATTI (2012) o mundo vive uma quarta revolução industrial: “A Era das Máquinas Livres”. Com o projeto e construção das primeiras máquinas de prototipagem rápida, na década de 80, para fins comerciais observou-se um crescente interesse no desenvolvimento de novas tecnologias para obtenção de modelos físicos com diferentes materiais. O elevado custo dessas máquinas, como por exemplo, custo de manutenção e aquisição de materiais, que causa forte dependência do fornecedor (Stratasys, 3-D Systems Object) tem apontado para soluções específicas de máquinas de impressão tridimensional “doméstica”.

Essas soluções se baseiam na manufatura de poucos produtos ou de peças individualizadas podendo ter geometrias complexas, com custo e tempo reduzidos. De fato, dadas às devidas proporções, uma mudança de paradigma, quando se compara ao início da industrialização no final do século 18, que visava a produção em massa e alto nível de padronização (INFORÇATTI NETO, 2013).

A primeira impressora tridimensional representante dessa nova “Era das Máquinas Livres” foi desenvolvida no projeto RepRap apresentada na Figura 4.1

desenvolvida inicialmente por Adrian Bowyer em 2006 na Universidade de Bath, Reino Unido. O objetivo inicial foi a geração de objetos tridimensionais, com deposição por filamento fundido, com custo reduzido. Entretanto, trouxe uma característica adicional de também se autoreplicar e, atualmente apresenta variações de projetos. A impressora Fab@home, apresentada na Figura 4.2 foi desenvolvida na Universidade de Cornell e representa outro exemplo da construção de impressoras portáteis, com melhor projeto mecânico básico e de controle, com custo reduzido para utilização para hobbistas e laboratórios. Esses exemplos de impressoras tridimensionais representam esforços convergentes da área de pesquisa em obter e promover software, impressora 3-D e microcontroladores livres e de interface abertas.

Há alguns conceitos de *design* para impressoras tridimensionais portáteis “open source” de custo reduzido. O projeto RepRap tem a proposta de autorreplicação de grande parte de seus elementos. A Universidade de Cornell desenvolveu a impressora Fab@Home construída como um pórtico com 3 eixos cartesiano, em que o deslocamento é feito por um motor de passo e a deposição de material é feita por meio de seringas.

O projeto RepRap é essencialmente um experimento com tecnologia “open source” (código aberto). A ideia inicial foi desenvolvida por um grupo da Universidade de Bath, no Reino Unido e projetos e ideias estão sendo desenvolvidos por uma série de entusiastas de todo o mundo. Um conceito que está sendo considerado é que a máquina é capaz de produzir componentes para máquinas do futuro, testar algumas das teorias de von Neumann de auto-replicar máquinas. Existe uma série de variantes de design, algumas usam resinas de cura a frio, e outras usam uma cabeça de extrusão térmica, mas todos são essencialmente são variantes do processo FDM, tal como ilustrado por um destes modelos mostrados na Fig. 4.1.

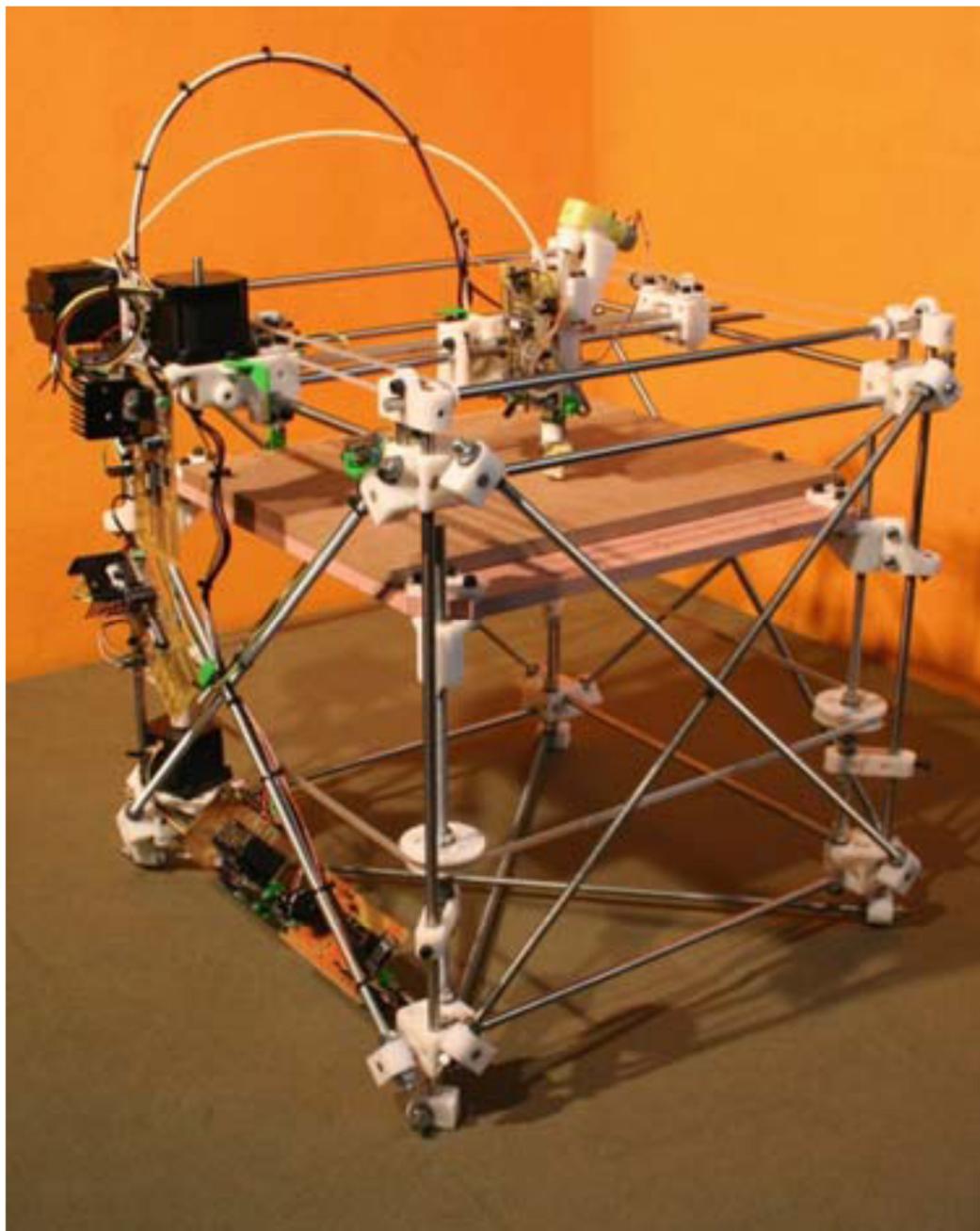


Figura 4.1 - A RepRap, máquina de "Darwin" que é capaz de fazer algumas das suas próprias peças  
Fonte: RepRap (2013)

Ambas as abordagens têm inspirado uma série de entusiastas a desenvolver as suas ideias. Alguns se centraram na melhoria dos projetos de modo que eles possam ser mais robustos ou mais versáteis. Outros desenvolveram rotinas de software que exploram coisas como digitalizações padronizadas, controles mais precisos, etc. No entanto, outros entusiastas desenvolveram novas aplicações em potencial para essa tecnologia, principalmente usando vários materiais que tem comportamento químico ou físico incomuns. A tecnologia Fab@home foi, por

exemplo, utilizada para desenvolver baterias e atuadores 3D. Alguns usuários têm mesmo experimentado com chocolate para criar esculturas comestíveis.

A Fab@CTI com cabeçote de seringa, baseada no projeto Fab@home é apresentada na Figura 4.2.

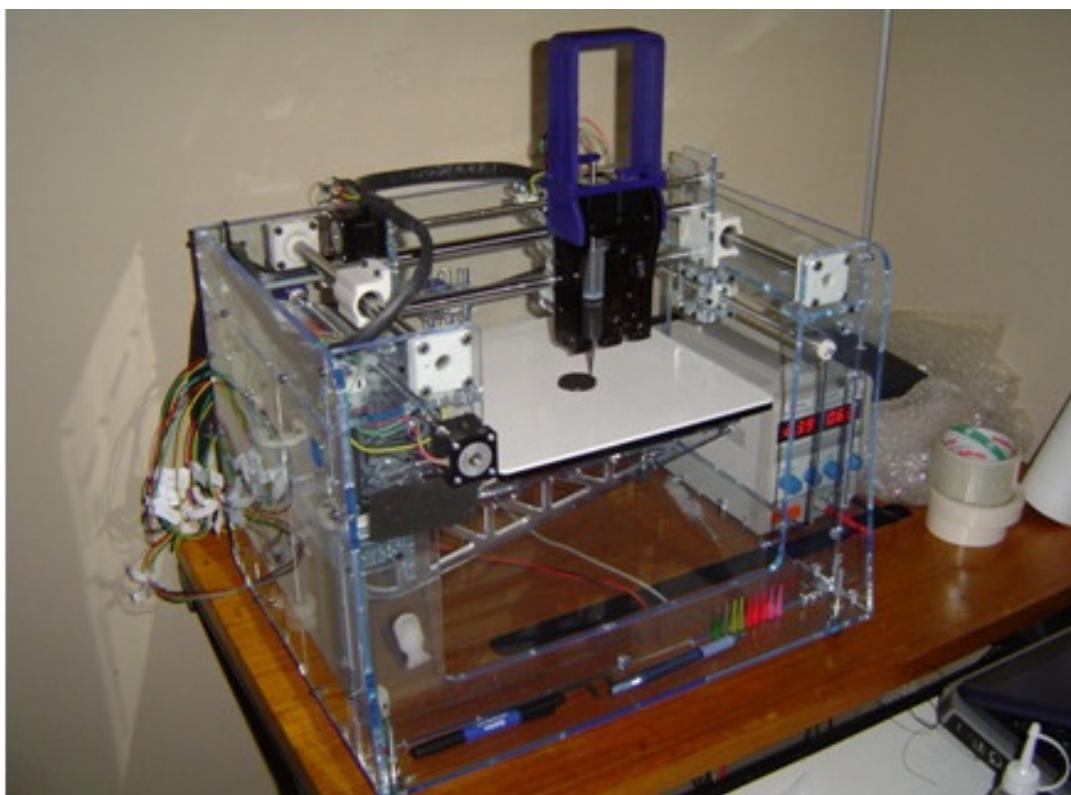


Figura 4.2 - Máquina Fab@Home construída no CTI  
Fonte: Inforçatti Neto (2013)

A utilização da manufatura aditiva para construção de bio-protótipos utilizando biomateriais, principalmente nos centros de pesquisa e em algumas universidades começam a fornecer contribuições significativas e promissoras na área da saúde, como por exemplo, os “*scaffolds*”. Uma das grandes dificuldades é a utilização de equipamentos comerciais de MA em áreas de pesquisas interdisciplinares como na bioengenharia, porque estes equipamentos possuem parâmetros inacessíveis de controle da máquina, além da dificuldade de aquisição de matéria-prima do próprio fabricante. Além disso, a quantidade de matéria-prima necessária para construção de um protótipo nestes equipamentos comerciais é elevada, tornando inviáveis as pesquisas com novos biomateriais. Os custos

elevados que envolvem a manipulação e aquisição de biomateriais devem ser levadas em consideração, além da necessidade de adaptar o equipamento de MA para utilização com este tipo de matéria-prima.

Uma primeira proposta de aplicação refere-se ao uso de biomateriais como matéria-prima para tecnologias de MA, viabilizando o desenvolvimento de dispositivos biomédicos personalizados e de geometria de alta complexidade. Neste contexto, a facilidade de controle e utilização de materiais diversos é uma exigência básica. O sistema “*open source*” da Fab@CTI permite este tipo de uso, desde que adaptado adequadamente.

Como consequência da necessidade de utilização de uma variedade crescente de novos materiais deve haver adaptações de tecnologias tradicionais de MA em relação à melhoria dos materiais, bem como o desenvolvimento de novas soluções construtivas de partes fundamentais da máquina, inclusive de novas propostas da estrutura básica da máquina.

## 5 ESTUDO DE CONFIGURAÇÃO IDEAL PARA A ESTRUTURA DE UMA IMPRESSORA 3D

### 5.1 Estudo de configurações de máquinas convencionais e estruturas de robôs

#### 5.1.1 *Estruturas de máquinas convencionais*

##### 5.1.1.1 *Estrutura de Pórtico (“Gantry-Type”)*

Esse tipo de estrutura se caracteriza por possuir uma “ponte” deslizante por meio de guias sobre bases laterais e mais duas guias de deslizamento lineares resultando num movimento composto de 3 translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiano. O volume de trabalho é um paralelepípedo contido no interior da estrutura (Fig. 5.1).

Esta estrutura de pórtico proporciona uma boa rigidez mecânica em qualquer ponto do volume de trabalho. Por outro lado, devido à exclusividade das juntas lineares, tal estrutura possui um baixo grau de destreza para realizar movimentos curvilíneos.

É normalmente utilizada em grandes máquinas de movimentação de objetos.

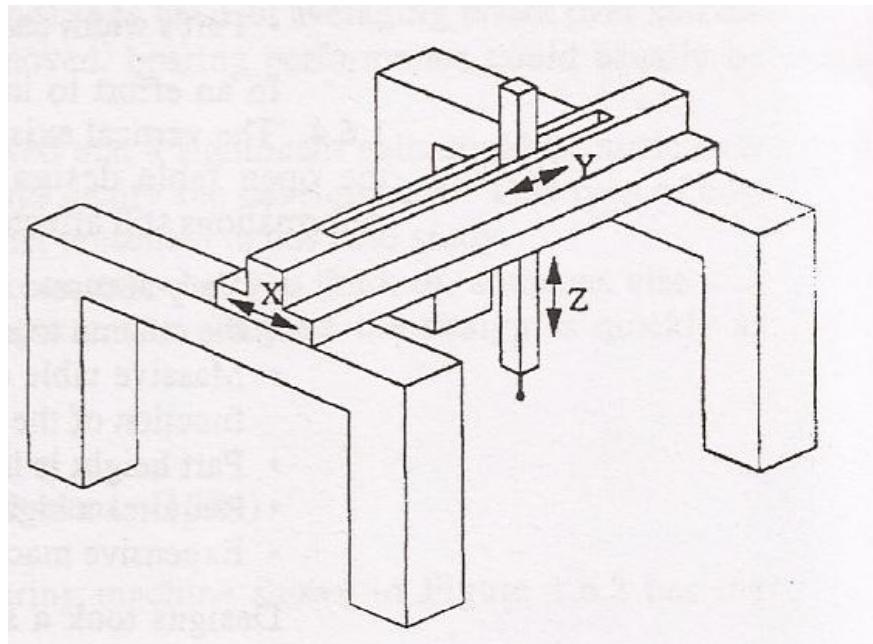


Figura 5.1 - Estrutura tipo pórtico.  
Fonte: Slocum (1992)

#### **5.1.1.2 Estrutura tipo “C” ou de coluna (“Column-Type”)**

Esse tipo de estrutura se caracteriza pelo cabeçote estar posicionado sobre uma coluna fixa com movimentos linear na direção vertical do cabeçote, sendo que a mesa de trabalho realiza os outros 2 movimentos de translação no plano. Assim resultando num movimento composto de 3 translações, cujos eixos de movimento também são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiano. O volume de trabalho também é um paralelepípedo, porém restringido dentro da estrutura somente na altura, não nas laterais (Fig. 5.2).

Este tipo de estrutura em “C” proporciona uma boa rigidez mecânica, entretanto menor do que a estrutura em pórtico. Assim como o pórtico devido à exclusividade das juntas lineares, estas estruturas possuem um baixo grau de destreza para realizar movimentos curvilíneos.

É importante notar que o objeto sobre a mesa permanece em constante movimentação, a diferença da estrutura pórtico onde o objeto permanece estático. Isto pode ocasionar perda de precisão no caso de fixação insuficiente da peça.

É normalmente utilizada em máquinas ferramentas como fresadoras, furadeiras etc.

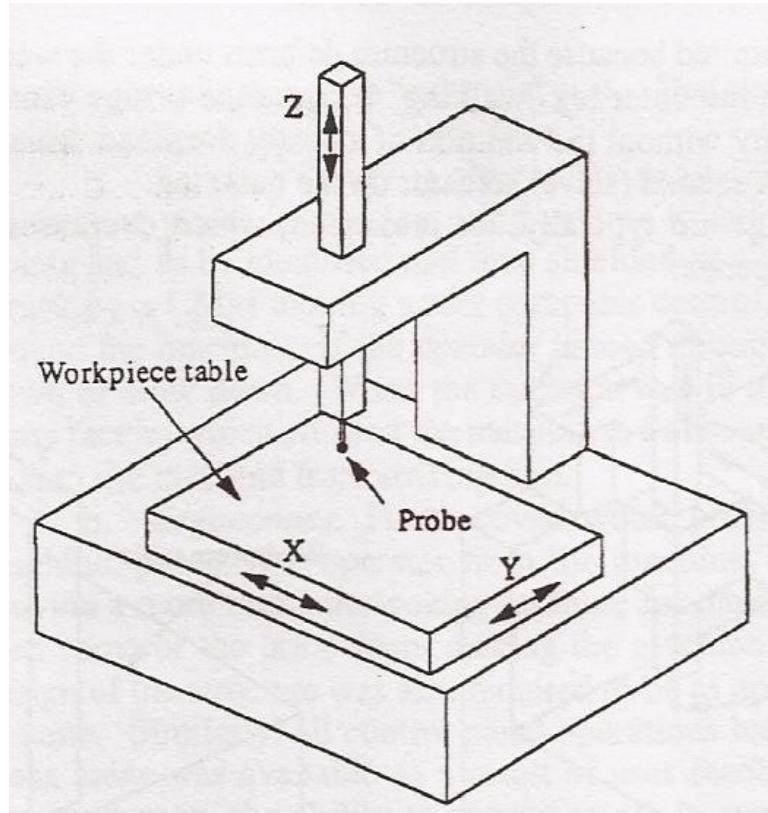


Figura 5.2 - Estrutura tipo "C"  
Fonte: Slocum (1992)

#### **5.1.1.3 Estrutura tipo "U" ou Ponte rolante ("Moving Bridge")**

Esse tipo de estrutura se caracteriza por um cabeçote com deslocamento vertical linear que está posicionado sobre uma coluna deslizante bi apoiada sobre guias lineares sobre a mesa de trabalho que é fixa. Como resultado tem-se um movimento de 3 translações, os eixos de movimento também são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiano. O volume de trabalho é um paralelepípedo restrinido dentro da ponte na altura e nas laterais (Fig. 5.3).

Com rigidez mecânica superior à estrutura "C", entretanto menor do que a estrutura em pórtico a estrutura em "U" combina propriedades desta outras duas configurações. Como o pórtico e a estrutura em "C" e devido à exclusividade das juntas lineares a estrutura em "U" possui um baixo grau de destreza para realizar movimentos curvilíneos.

A diferença do perfil “C” a mesa não se movimenta, portanto a peça trabalhada se mantém estática durante a operação o que garante uma maior estabilidade.

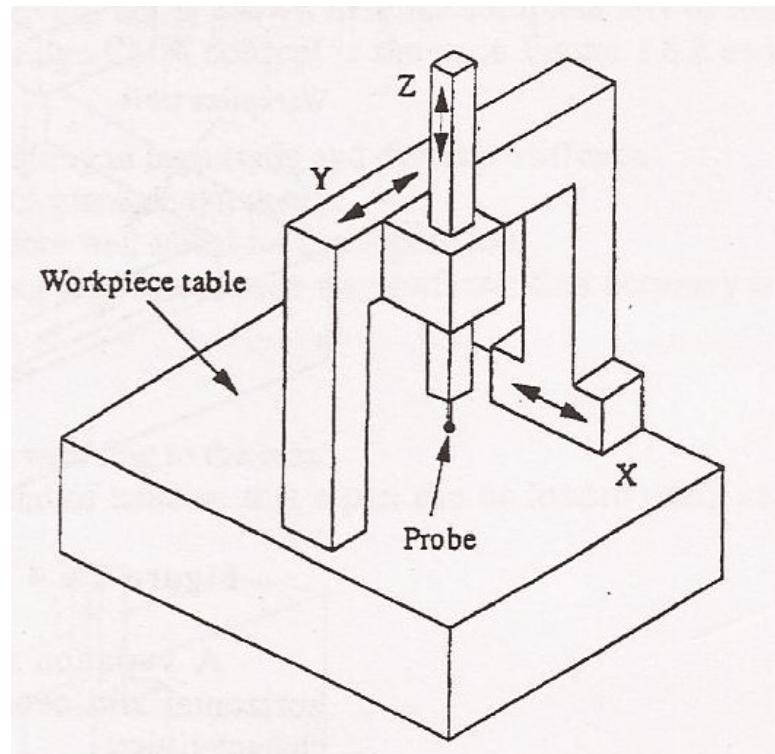


Figura 5.3 – Estrutura tipo “U”  
Fonte: Slocum (1992)

### **5.1.2 Estruturas Robótica**

Descreve-se a seguir alguns tipos de estruturas de robôs com relação as suas principais propriedades, aplicações usuais, vantagens e desvantagens, assim como ilustrações com seus respectivos volume de trabalho:

#### **5.1.2.1 Robô cartesiano**

Esse tipo de robô possui 3 juntas prismáticas resultando num movimento composto de 3 translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiano. O volume de trabalho é um paralelepípedo (Fig. 5.4). Tal estrutura cartesiana proporciona um bom grau de

rigidez mecânica e exatidão de posicionamento constante em qualquer ponto do volume de trabalho. Por outro lado, devido à exclusividade das juntas prismáticas, tal estrutura possui um baixo grau de destreza.

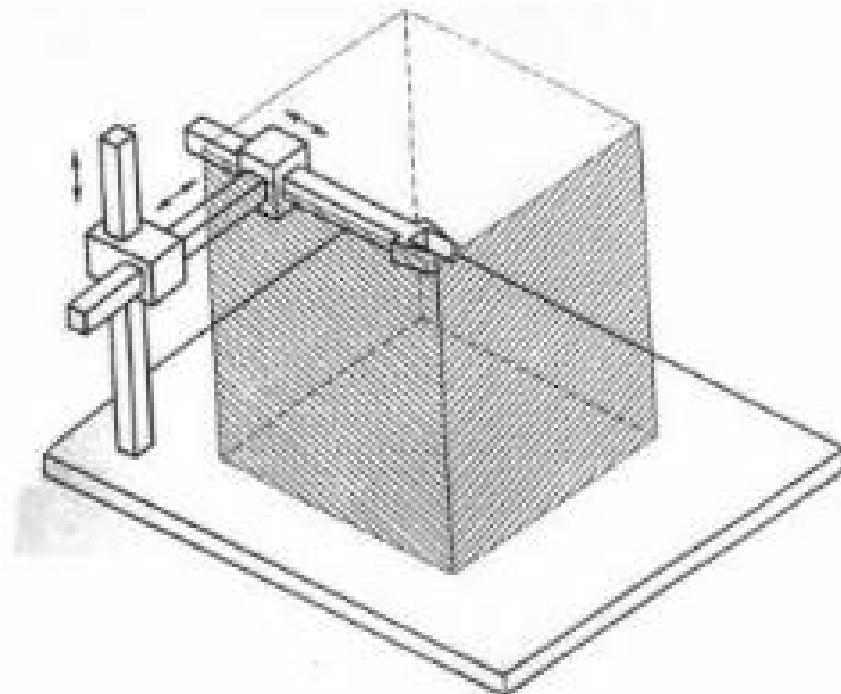


Figura 5.4 - Manipulador Cartesiano  
Fonte: Romano (2002)

#### 5.1.2.2 Robô Cilíndrico

Esse tipo de manipulador possui 2 articulações prismáticas e uma de rotação. Esta última substitui a primeira junta prismática do manipulador cartesiano. O grau de exatidão no posicionamento decai conforme o alcance do braço aumenta. O volume de trabalho é um cilindro vazado (Fig. 5.5).

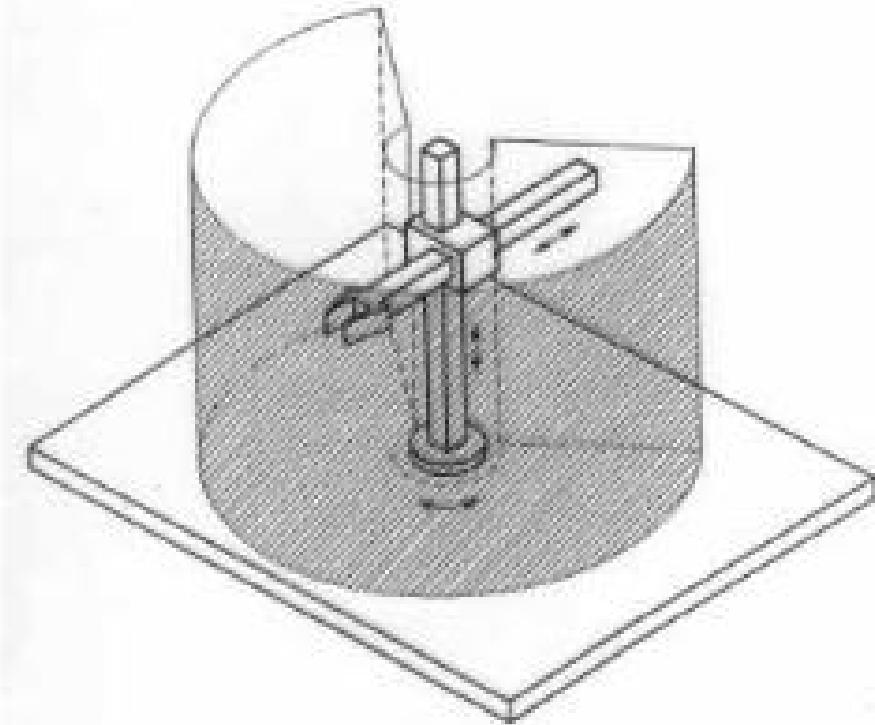


Figura 5.5 - Manipulador Cilíndrico  
Fonte: Romano (2002)

#### 5.1.2.3 Robô SCARA (“*Selective Compliance Assembly Robot*”)

Possui 2 juntas de rotação, cujos eixos são paralelos, para se movimentar o efetuador num plano, e uma terceira junta, prismática, perpendicular a esse plano. Ele é muito usado em tarefas de montagem de componentes de pequenas dimensões, como placas de circuitos eletrônicos. O volume de trabalho é aproximadamente cilíndrico (Fig. 5.6).

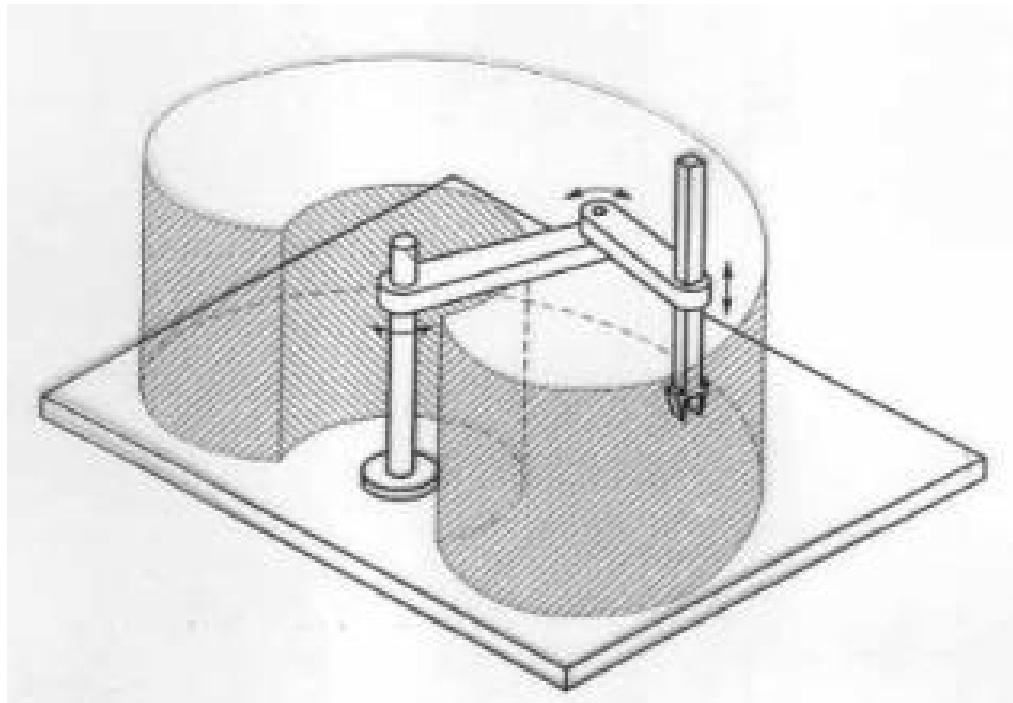


Figura 5.6 - Robô SCARA  
Fonte: Romano (2002)

#### 5.1.2.4 *Robô Articulado ou Antropomórfico*

Nesta configuração, existem pelo menos 3 juntas de rotação. O eixo de rotação da junta da base é perpendicular aos eixos das outras 2 juntas, que são paralelas entre si. Esta configuração apresenta maior mobilidade, entre todas as outras empregadas. A exatidão de posicionamento é inversamente proporcional ao alcance radial da extremidade do braço. O seu volume de trabalho é complexo, uma porção de esfera (Fig. 5.7). A rigidez depende da posição no volume de trabalho.

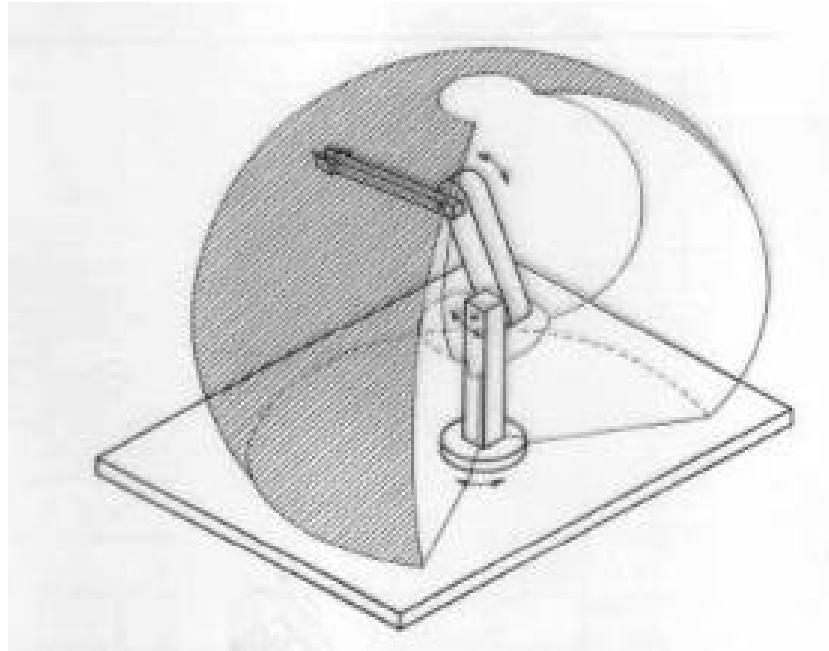


Figura 5.7 - Manipulador Antropomórfico  
Fonte: Romano (2002)

## 5.2 Aplicação do método de Ponderação

Este projeto de escolha de diferentes configurações para a estrutura de uma impressora 3D que funciona pelo processo FDM (*cf.* 2.3.1.5) tem como principal objetivo aumentar o volume de trabalho da impressora, assim como aumentar a versatilidade de utilização de máquinas de MA e estudar a viabilidade do uso de um cabeçote de extrusão em um braço robótico convencional de maneira a converter um braço robótico em uma impressora 3D para obter movimentos mais livres. Além de outros objetivos secundarias mas ainda assim relevantes e associadas a estes objetivos principais, como aumentar o número de graus de liberdade. Utilizar configurações que permitam destreza e agilidade de movimentação a fim de encurtar o tempo de produção de modelos, obter configurações com possibilidade de multiplicar o deslocamento em um eixo principal, como por exemplo na altura mediante do deslocamento da estrutura ou robô multiplicando consideravelmente o volumem de trabalho possibilitando a criação de peças com maiores dimensões.

Na análise será aplicado o método de ponderação sem considerações financeiras a fim de encontrar a melhor configuração teórica. Essa configuração

deve permitir o aumento do volume de trabalho e a melhoria da mobilidade do mecanismo para movimentos curvilíneos (*cf. 4.*)

### ***5.2.1 Lista de requisitos***

Para cumprir com o principal objetivo listaram-se como requisitos os seguintes pontos:

- Aumento do volume de trabalho;
- Aumento da versatilidade de uso (Possibilidade de transformação de um braço robótico convencional em impressora 3D);
- Facilidade de programação para movimentos curvilíneos (Implementação de Curved LOM (*cf. 2.3.2.2*));
- Facilidade de operação;
- Deflexão estrutural compatível com esforços envolvidos na FDM (Manter a rigidez estrutural);
- Possibilidade de deslocamento controlado em pelo menos uma direção da estrutura da impressora;
- Densidade volumétrica baixa, (isto é: peso estrutural leve para maior volume de trabalho);
- Complexidade de funcionamento baixa (“Design” simples);
- Montagem simples;
- Facilidade de manutenção;
- Passível de reciclagem;
- Facilidade de transporte;
- Viabilidade económica.

Com estes critérios é possível montar a tabela de requisitos (Quadro 5.1):

Quadro 5.1 (Continua) - Lista de requisitos para uma impressora 3D

Lista de requisitos para uma impressora 3D
<p><b><u>Aumento de Volumem de trabalho</u></b></p> <p>Evitar limitar o volume de trabalho para impressão. Estrutura que possibilite tanto a impressão quanto a retirada de modelos de grandes dimensões.</p>
<p><b><u>Aumento da versatilidade de uso</u></b></p> <p>Possibilidade de transformação de um braço robótico convencional em impressora 3D.</p>
<p><b><u>Facilidade de programação para movimentos curvilíneos</u></b></p> <p>Facilidade para implementação de Curved LOM. Preferência por estruturas com guias de revolução ao invés de guias retas que dificultam o movimento curvilíneo</p>
<p><b><u>Destreza de movimentação</u></b></p> <p>Escolha de configuração que possibilite maximizar a velocidade de deslocamento do cabeçote, a fim de diminuir o tempo de impressão e aumentar a aderência entre camadas</p>
<p><b><u>Facilidade de operação</u></b></p> <p>Estrutura que permita o fácil acesso a plataforma de plotagem para retirada do modelo, possibilidade de impressão sobre outra peça de maiores dimensões que a própria impressora (adição de "parte" à uma peça já existente), assim como a possibilidade de remoção da plataforma e de componentes expostos ao material de impressão para limpeza</p>
<p><b><u>Pouca deflexão estrutural</u></b></p> <p>Manter uma rigidez estrutural compatível com os esforços e pesos envolvidos. Deformação da estrutura compatível com tolerâncias aceitáveis quando submetida aos esforços operacionais ou ao próprio deslocamento</p>

Quadro 5.1 (Continuação) - Lista de requisitos para uma impressora 3D

Lista de requisitos para uma impressora 3D (Continuação)
<p><u>Possibilidade de deslocamento controlado em pelo menos uma direção da estrutura da impressora</u></p>
<p>Estrutura que permita ser colocada em uma plataforma ou guia a fim de desloca-la na altura ou na longitude para criação de modelos com uma dimensão maior que as demais</p>
<p><u>Densidade volumétrica baixa</u></p>
<p>Com isto quer se dizer da maximização da relação peso estrutural para maior volume de trabalho</p>
<p><u>Design simples</u></p>
<p>Design simples e "limpo" que permita a inserção do cabeçote de extrusão e a condução dos fios de comando e dutos de alimentação do próprio, contudo sem comprometer a facilidade de deslocamento.</p>
<p><u>Facilidade de manutenção</u></p>
<p>Evitar projetos com configurações que dificultem a desmontagem e manutenção</p>
<p><u>Montagem simples</u></p>
<p>Evitar configurações que tenham necessidade de alinhamento e precisão acuradas para a sua correta montagem. Preferir designs com montagens intuitivas e acessíveis até a operadores inexperientes</p>
<p><u>Passível de reciclagem</u></p>
<p>Componentes facilmente separáveis por famílias de matérias. Evitar o uso de materiais tóxicos e não recicláveis</p>

Quadro 5.1 (Continuação) - Lista de requisitos para uma impressora 3D

Lista de requisitos para uma impressora 3D (Continuação)	
<b><u>Facilidade de transporte</u></b>	Peças compactas quando desmontadas. Possibilidade de deslocamento da estrutura uma vez montada, como para "troca-la" de lugar ou movê-la facilmente se necessário, sem afetar o funcionamento
<b><u>Viabilidade económica</u></b>	Custo de fabricação menor que máquinas comercialmente disponíveis e compatíveis com o custo de produção de máquinas <i>open-source</i> semelhantes

### **5.2.2 Princípios de solução**

Utilizando-se da metodologia de projeto (*cf.* 3.2) e por meio de discussão com a equipe envolvida no projeto chegou-se a idealização de possíveis soluções para a estrutura da máquina de impressão 3D (*cf.* 3.2.2), o resultado pode ser observado no quadro 5.2 abaixo.

Para ter mais informações sobre cada configuração consultar o item 5.1 deste trabalho (*cf.* 5.1).

Quadro 5.2 - Lista de soluções de possíveis configurações estruturais para uma impressora

Número	Princípio de solução 3D	Graus de liberdade
1	1. Estrutura para Impressora 1.1 Convencional	3
	Pórtico	
2	Perfil "U"	3
3	Perfil "C"	3
4	Pórtico com deslocamento axial da estrutura	4
5	Perfil "U" com deslocamento axial da estrutura	4
6	Perfil "C" com deslocamento axial da estrutura	4
	1.2 Não convencional	
7	Braço Robótico Cartesiano	3
8	Braço Robótico Cilíndrico	3
9	Braço Robótico Articulado horizontalmente (Scara)	3
10	Braço Robótico Antropomórfico	3
11	Braço Robótico Cartesiano com deslocamento da estrutura	4
12	Braço Robótico Cilíndrico com deslocamento da estrutura	4
13	Braço Robótico Articulado horizontalmente (Scara) com deslocamento da estrutura	4
14	Braço Robótico Antropomórfico com deslocamento da estrutura	4

Uma vez obtida a lista com os princípios de solução resta continuar a aplicação do método de seleção para decidir quais soluções são possíveis de continuação de desenvolvimento e quais serão descartadas.

### 5.2.3 *Lista de seleção*

Aplicando critérios simples é possível definir quais princípios de solução são mais adequados para continuar a serem desenvolvidos (cf. 3.2.3.1) e quais serão descontinuados a fim de evitar um trabalho de desenvolvimento desnecessário para soluções pouco viáveis. Este procedimento pode ser visto no quadro 5.3 abaixo.

Quadro 5.3 - Lista de seleção para princípios de soluções para a estrutura de uma impressora 3D

Lista de Seleção								
Variante de solução (LV)	Para estrutura de uma impressora 3D							
	Julgar Variantes da solução segundo critérios de avaliação:							
	(+) Sim					DECIDIR		
	(-) Não					Marcar Variantes de Solução:		
	(? ) Faltam informações					(+) Continuar o desenvolvimento		
	Observadas as compatibilidades					(-) Eliminar a solução		
	Satisfaz as exigências					(?) Obter informações (Reavaliar a solução)		
	Custos Aceitáveis					(!) Verificar lista de requisitos quanto à alterações		
	Facilidade de movimentos curvilíneos							
	Destreza de movimentação							
	Design leve							
LV	A	B	C	D	E	F	Observações (Sugestões, justificações)	Decisão
1	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
2	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
3	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
4	+	+	+	+	+	-	Design muito enclausurado	-
5	+	+	+	+	+	+		+
6	+	+	+	+	+	+		+
7	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
8	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
9	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
10	+	-					Volume de trabalho muito limitado	-
11	+	+	+	-			Dificuldade de programação	-
12	+	+	+	+	-		Movimentação mais lenta que os demais	-
13	+	+	+	+	+	+		+
14	+	+	+	+	+	+		+
Data: 15/10/2013			Responsável: Ernesto Pallarolas					

Segundo esta análise serão continuados o desenvolvimento dos princípios de solução 5, 6, 13 e 14, as demais possíveis soluções não são convenientes de serem desenvolvidas, portanto serão descontinuados.

Utilizando esta abordagem de eliminação das piores soluções concentram-se esforços para o desenvolvimento das ideias e princípios de solução mais promissores e mais próximas da configuração ideal ou teórica que é por definição inalcançável dentro das limitações econômicas impostas ao projeto,

#### ***5.2.4 Identificação de critérios de avaliação***

A seguir são elaborar objetivos concretos derivados da lista de requisitos e a partir destes são formulados critérios de avaliação para efetuar a seleção ponderada da melhor solução para o problema (*cf. 3.3.1*).

Cada objetivo é relacionado a um critério que deve ser capaz de quantificar ou qualificar o nível ou a facilidade com que cada princípio de solução atende ao próprio objetivo. Ademais disto cada critério é relacionado a um parâmetro que estabelece a medida ou classe em que cada princípio de solução será classificado.

A seguir no quadro 5.4 são listados os objetivos e os respectivos critérios com seus parâmetros que serão usados para ponderar as soluções:

Quadro 5.4 - Objetivos, critérios e parâmetros utilizados para a ponderação

Nº	Objetivo	Critério	Parâmetro
Z1	<b>Aumento do volume de trabalho</b>		
Z1.1	Aumento do volume de trabalho	Volume	m3
Z1.2	Possibilidade de deslocamento controlado em pelo menos uma direção da estrutura	Possibilidade deslocamento em um eixo?	Sim/não
Z2	<b>Facilidade de operação</b>		
Z2.1	Facilidade de programação para movimentos curvilíneos	Movimentação em curvas	Nível de facilidade
Z2.2	Destreza de movimentos	Velocidade de movimentação	Nível de velocidade
Z2.3	Facilidade de operação	Acesso à plataforma	Nível de facilidade
Z3	<b>Fatores técnicos</b>		
Z3.1	Pouca deflexão estrutural	Rigidez estrutural	Nível de rigidez
Z3.2	Densidade volumétrica baixa	Peso baixo	Kg/m3
Z4	<b>Facilidade de manuseio</b>		
Z4.1	Design simples	Design simples	Nível de simplicidade
Z4.2	Montagem simples	Montagem	Nível de facilidade
Z4.3	Facilidade de transporte	Deslocável?	Nível de facilidade
Z5	<b>Fatores económicos</b>		
Z5.1	Passível de reciclagem	Reciclável?	Sim/não
Z5.2	Viabilidade económica	Custo aproximado	R\$

#### 5.2.4.1 Análise da relevância para o valor global

Estes critérios devem ser organizados por importância relativa (peso) para destacar critérios de principal importância e para que critérios eventualmente irrelevantes possam ter pouca influência sobre a escolha final (cf. 3.3.1.1).

A seguir a figura 5.8 contendo a estrutura com pesos dos diferentes critérios e organizada por níveis.

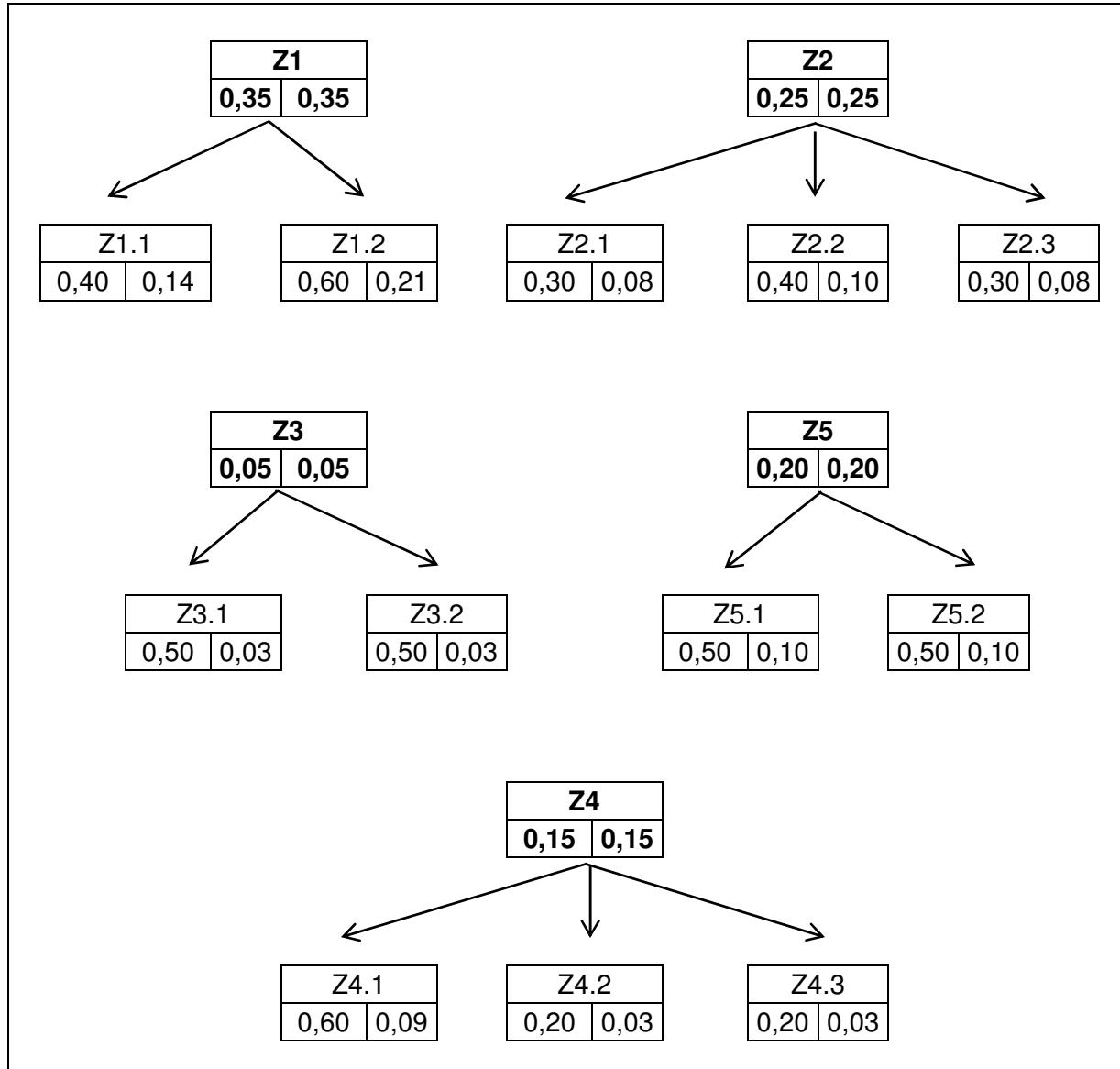


Figura 5.8 - Determinação por níveis dos pesos dos fatores de ponderação

Uma vez determinados os pesos de cada fator os mesmos devem ser organizados por ordem de importância para ter uma visão mais acurada da ordem de relevância dos critérios e evitar erros de avaliação.

Esta organização de critérios por peso pode ser vista no quadro 5.5, abaixo.

Nº	Descrição	Fator
Z1.2	Possibilidade de deslocamento controlado em pelo menos uma direção da estrutura	<b>0,21</b>
Z1.1	Aumento do volume de trabalho	<b>0,14</b>
Z2.2	Destreza de movimentos	<b>0,10</b>
Z5.1	Passível de reciclagem	<b>0,10</b>
Z5.2	Viabilidade económica	<b>0,10</b>
Z4.1	Design simples	<b>0,09</b>
Z2.1	Facilidade de programação para movimentos curvilíneos	<b>0,075</b>
Z2.3	Facilidade de operação	<b>0,075</b>
Z4.2	Montagem simples	<b>0,03</b>
Z4.3	Facilidade de transporte	<b>0,03</b>
Z3.1	Pouca deflexão estrutural	<b>0,025</b>
Z3.2	Densidade volumétrica baixa	<b>0,025</b>
<b>Somatória</b>		<b>1,00</b>

Quadro 5.5 – Critérios organizados por nível de relevância na ponderação

### **5.2.5 Composição de parâmetros**

Uma vez estabelecidos os critérios de avaliação e definida sua relevância, é possível avaliar as variantes de solução por meio dos parâmetros correlacionados a esses critérios (cf. 3.3.2).

Parametrizando cada princípio de solução dentro dos critérios e atribuindo valores a estas caracterizações é possível se obter a pontuação de cada princípio de solução para cada critério, e se fazendo a soma dos valores ponderados pelo peso relativo de cada critério é possível construir um valor total. Este valor final classifica de maneira relativa os critérios entre si e da bases para se fazer uma escolha.

A seguir a tabela 5.5 com o resultado da lista de avaliação com valores numéricos, contudo sem incluir questões econômicas, por não serem consideradas no escopo deste trabalho.

Tabela 5.5 (Continua) - Tabela de avaliação de configurações de estruturas para uma impressora 3D

Nº		Fator	Parâmetros		Variante 5		
					Característica	Valor	Valor ponderado
Z1.1	Aumento do volume de trabalho	0,14	Volume	m3	Alto	3	0,42
Z1.2	Possibilidade de deslocamento controlado em pelo menos uma direção da estrutura	0,21	Possibilidade deslocamento em um eixo ?	Nível de facilidade	Difícil	1	0,21
Z2.1	Facilidade de programação para movimentos curvilíneos	0,075	Movimentação em curvas	Nível de facilidade	Médio	2	0,15
Z2.2	Destresa de movimentos	0,10	Velocidade de movimentação	Nível de velocidade	Médio	2	0,2
Z2.3	Facilidade de operação	0,075	Acesso à plataforma	Nível de facilidade	Pouco Difícil	1,5	0,1125
Z3.1	Pouca deflexão estrutural	0,025	Rigidéz estrutural	Nível de rigidez	Alto	3	0,075
Z3.2	Densidade volumétrica baixa	0,025	Peso baixo	Kg/m3	Médio	2	0,05
Z4.1	Design simples	0,09	Desing simples	Nível de simplicidade	Médio Baixo	1,5	0,135
Z4.2	Montagem simples	0,03	Montagem	Nível de facilidade	Médio	2	0,06
Z4.3	Facilidade de transporte	0,03	Deslocável ?	Nível de facilidade	Alto	3	0,09
Z5.1	Passível de reciclagem	0,10	Reciclável ?	sim/não	Sim	1	0,1
Z5.2	Viabilidade económica	0,10	Custo aproximado	R\$			
Somatórias		1,000	Sem consideração Econm.		-	22,000	1,603
			Com consideração Econm.		-		

Tabela 5.5 (Continuação) - Tabela de avaliação de configurações de estruturas para uma impressora 3D

Variante 6			Variante 13			Variante 14		
Característica	Valor	Valor ponderado	Característica	Valor	Valor ponderado	Característica	Valor	Valor ponderado
Alto	3	0,42	Médio	2	0,28	Baixo	1	0,14
Médio	2	0,42	Alto	3	0,63	Alto	3	0,63
Médio	2	0,15	Médio Fácil	2,5	0,1875	Alto	3	0,225
Médio	2	0,2	Rápida	3	0,3	Alto	3	0,3
Médio	2	0,15	Alto	3	0,225	Alto	3	0,225
Médio	2	0,05	Baixo	1	0,025	Baixo	1	0,025
Médio	2	0,05	Baixo	3	0,075	Medio Baixo	1,5	0,0375
Médio	2	0,18	Alto	3	0,27	Alto	3	0,27
Médio alto	2,5	0,075	Alto	3	0,09	Alto	3	0,09
Alto	3	0,09	Alto	3	0,09	Alto	3	0,09
Sim	1	0,1	Sim	1	0,1	Sim	1	0,1
-	23,500	1,885	-	27,500	2,273	-	25,500	2,133
-			-			-		

### **5.2.6 Solução proposta**

O método ponderado resulta na maior pontuação para o princípio de solução, ou variante Nº 13.

De acordo com a escolha ponderada, por meio dos pesos (importância) dados a cada critério de avaliação, a variante Nº 13 é a melhor solução para resolver o problema global da escolha da melhor configuração para a estrutura de uma impressora 3D.

Note que esta escolha é a melhor para os critérios baseados nos objetivos que desejamos atingir e que estabelecemos de começo. Para objetivos diferentes ou inclusive para os mesmos objetivos com importância (pesos) diferentes esta escolha pode certamente não ser a melhor.

A seguir na figura 5.9 um croqui da solução proposta para a estrutura de uma impressora 3D (*cf. 5.2.1*):

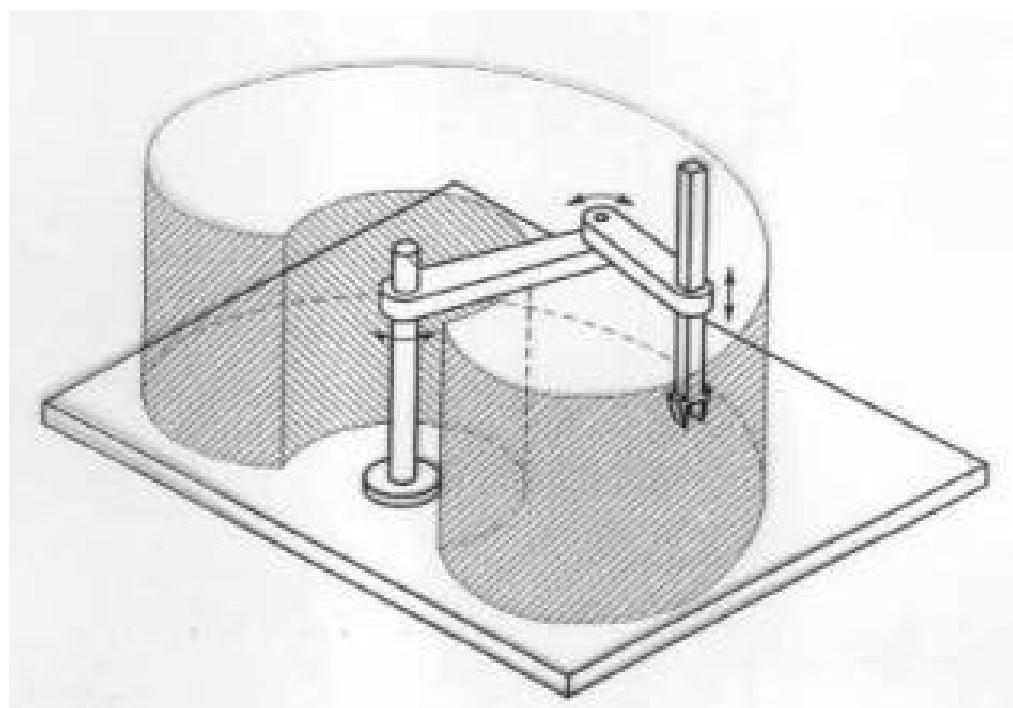


Figura 5.9 - Croqui de melhor configuração para uma impressora 3D. Robô SCARA.  
Fonte: Romano (2002)

## 6 CONCLUSÕES

As técnicas de manufatura aditiva estão em progressiva melhoria, tanto em relação ao desenvolvimento de novos materiais e processos, quanto de soluções que permitam o aumento da flexibilidade de aplicação e do volume de trabalho.

Grande parte dos processos de MA trabalha na geração de um protótipo 2 1/2D (Nada mais que uma protrusão de um modelo 2D) restringindo a complexidade que poderia ser melhor explorada camada a camada utilizando métodos de programação de estratégia de deposição não lineares, como a *Curved LOM* (*cf. 2.3.2*), o que leva a necessidade de implementação de estruturas que facilitem os deslocamentos curvilíneos.

As técnicas de metodologia de projeto auxiliam na sistematização da escolha de projeto baseado em critérios ponderados, que indicam uma configuração não trivial nem tendenciosa simplesmente por tomadas de decisões subjetivas e com valores quantitativos, eliminando assim a influência indesejável de tendências e escolhas sem fundamentos relevantes.

Com o desenvolvimento acelerado das tecnologias de MA tal vez as soluções que hoje são as mais adequadas podem ceder lugar, em futuro próximo, a projetos aprimorados em questões técnicas e mesmo económicas devido à continua melhoria dos processos de produção e expansão do mercado tecnológico que juntos possibilitam o acesso à componentes e máquinas que outrora não eram viáveis economicamente, pelo menos aos consumidores hobbistas e pequenos laboratórios.

## Referências

- CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, v.18, n.4, p.255-258, 2012.
- CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. School of Computer Science. Disponível em:<<http://www.cs.cmu.edu>>. Acesso: 13 Nov. 2013.
- CIMJECT. Disponível em:<<http://www.cimject.ufsc.br>>. Acesso em: 13 Nov. 2013.
- EOS GmbH \_ Electro Optical Systems. *Working principle of laser sintering*. Disponível em:<<http://www.eos-gmbh.de>>. Acesso em: 3 jan. 2003.
- FENG, W.; FUH, J.; WONG, Y. Development of a drop-on-demand micro dispensing system. *Materials Science Forum*, p.505–507, 2006.
- GAO, F.; SONIN, A..A. *Precise deposition of molten microdrops: the physics of digital fabrication*, 1994.
- GIBSON, I.; ROSEN, W.D.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Berlin: Springer.
- GOOGLES. Disponível em:<<http://www.google.com/trends>>. Acesso em: 8 jul. 2013.
- HARDRO, P.J.; WANG, J-H.; STUCKER, B. *Determining the parameter settings and capability of a rapid prototype process*. Lausanne: Department of Mechanical Engineering; Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne, 1998. (Material Fabrication and Properties – Report #2.)
- INFORÇATTI NETO, P. *Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabeçote de extrusão com rosca para impressoras tridimensionais portáteis*. 2013. 127p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- KLOSTERMAN, D.A. et al. Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics & ceramic matrix composites. *Rapid Prototyping Journal*, v.5, n.2, p.61–71, 1999.
- LUO, R.C. et al. The Development of a thermal extrusion based rapid prototyping mechatronics system. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL

ELECTRONICS SOCIETY, 28. 2002. *Proceedings...* [S.l.:s.n.], 2002. v.1, n.5-8, p.2237-2242.

MALONE, E.; LIPSON, H. (2007). Fab@Home: the personal desktop fabricator kit. *Rapid Prototyping Journal*, v.13, n.4, p.245-255, 2007.

PAHL, G. et al. *Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

PEARCE, J.M. *Building research equipment with free, open source hardware*. v.337, p.1303-1304. Disponível em: <[www.inovaçãotecnológica.com.br/notícias/notícias.php?artigo=quarta-revolução-industrial-era-das-máquinas](http://www.inovaçãotecnológica.com.br/notícias/notícias.php?artigo=quarta-revolução-industrial-era-das-máquinas)>. Acesso em: 24 Sept. 2012.

POWERS, M.T. et al. *Materials processing handbook*, 2007. Cap. 26.

3 D PRINTING and manufacturing. 2012. Disponível em:<<http://3dprintingformanufacturing.wordpress.com>>. Acesso em: 12 Nov. 2013.

THE 3D PRINTED part market will grow to \$8.4 billion in 2025, but materials suppliers need to see the small print. Disponível em:<<http://www.luxresearchinc.com>>. Acesso em: 12 Nov. 2013.

REPRAP. Disponível em:<<http://www.reprap.org>>.\_Acesso em: 10 Jan. 2012.

ROMANO, V.F. (Ed.). Robótica industrial: aplicações na indústria de manufatura e de processos. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

SINGAMNENI, S.; ROYCHOUDHURY, A.; DIEGEL, O. *Modeling and evaluation of curved layer fused deposition*. *Journal of Materials*, 2012.

SLOCUM, ALEXANDRE H. *Precision machine design*. New Jersey: Prentice Hall, 1992

VOLPATO, N. *Time-saving and accuracy issues in rapid tooling by selective laser sintering*. 2001. Tesis (PhD). University of Leeds, Leeds, 2001.

WANG, X. Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process. Rapid Prototyping Journal, v.5, n.3, p.129-133, 1999.