

## Comparação de três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo

Carlos Henrique Pereira Mello (UNIFEI) carlos.mello@unifei.edu.br  
Carlos Eduardo Sanches da Silva (UNIFEI) sanches@unifei.edu.br  
Sebastião Carlos da Costa (UNIFEI) scosta@unifei.edu.br

### Resumo

*A prototipagem rápida pode auxiliar na redução do tempo de desenvolvimento de novos produtos. Entretanto, estudos comparativos entre diferentes tecnologias existentes ainda estão escassos na literatura. Na tentativa de sanar esta lacuna, este artigo tem por objetivo comparar três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo para construção de protótipos. Para tanto foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias de estereolitografia (SLA), modelagem por deposição de material fundido (FDM) e modelagem por jato de tinta (MJM), e utilizado como pano de fundo um estudo comparativo produzido por uma consultoria especializada sobre equipamentos para prototipagem rápida. O resultado do presente artigo mostrou que, com base nos requisitos avaliados, a tecnologia FDM é a que apresenta o melhor custo benefício, apresentando ainda a vantagem de poder ser instalada em ambientes não industriais, tais como os laboratórios de desenvolvimento de produtos das universidades brasileiras.*

*Palavras-chave: Prototipagem rápida, estereolitografia, modelagem por deposição de material fundido, modelagem por jato de tinta.*

### 1. Introdução

O mercado vem obrigando as empresas a lançar novos produtos em cada vez menos tempo. Para atender a esse anseio do mercado, as indústrias podem lançar mão de estratégias para reduzir o tempo de desenvolvimento e uma dessas estratégias pode ser o emprego das tecnologias de prototipagem rápida, reduzindo ainda o risco do desenvolvimento. Entretanto, segundo Grimm (2003), existe pouca informação disponível acerca de comparações entre as tecnologias de prototipagem rápida.

Sendo assim, o objetivo deste artigo é realizar uma comparação entre três tecnologias de prototipagem rápida (estereolitografia, modelagem por deposição de material fundido e modelagem por injeção de tinta) em relação a critérios de custo e tempo, para avaliar qual das três tecnologias apresenta o melhor custo benefício. Para tal foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema e utilizado um estudo entre diversas tecnologias de prototipagem realizada pela Grimm Associates.

### 2. Prototipagem rápida

A prototipagem rápida é uma tecnologia inovadora desenvolvida nas últimas duas décadas. Ela visa produzir protótipos de forma relativamente rápida para inspeção visual, avaliação ergonômica, análise de forma/dimensional e como padrão mestre para a produção de ferramentas para auxiliar na redução de tempo do processo de desenvolvimento de produtos (CHOI e CHAN, 2004). Para Palm (1998), o termo prototipagem rápida (PR) refere-se a uma classe de tecnologias que pode automaticamente construir modelos físicos a partir de dados de um projeto auxiliado por computador (CAD).

A utilização da prototipagem rápida no processo desenvolvimento de produtos apresenta, segundo Modeen (2005), os seguintes pontos fortes: (i) sua capacidade de produzir formas tridimensionais complexas e detalhadas; (ii) a redução de *lead times* para peças únicas; (iii) a possibilidade de sua instalação em ambientes não industriais, devido a baixa geração de ruídos ou desperdícios.

Gondak, Gondak e Zluhan (2005) destacam ainda como pontos fortes a redução substancial do tempo de lançamento do novo produto no mercado, em razão da diminuição da necessidade de testes e do retrabalho, e a melhoria na manufaturabilidade e a redução de custos no projeto de produtos, pelo fato do protótipo rápido auxiliar a revelar as deficiências e lacunas existentes nos processos de manufatura. Para Netto *et al.* (2003), os processos de prototipagem rápida intensificaram o interesse por protótipos físicos no desenvolvimento de produtos.

Entretanto, Modeen (2005) cita alguns pontos fracos do processo de prototipagem rápida: (i) em tempo real, a velocidade de produção do protótipo é muito lenta. Dependendo do nível de precisão requerido e do tamanho do objeto, o processo pode levar algumas horas ou alguns dias; (ii) atualmente, a maioria dos equipamentos somente pode fabricar itens de até 500 mm<sup>3</sup> de volume; (iii) o número de materiais disponíveis para a prototipagem rápida com adição de materiais é ainda limitado, mas tem aumentado gradativamente; (iv) a qualidade final da superfície do protótipo rápido gerado geralmente necessita de um acabamento secundário.

Segundo Ferreira *et al.* (2001), as tecnologias de prototipagem rápida se dividem em duas categorias principais: os métodos com remoção de material e com adição de material. A primeira requer um processo no qual uma ferramenta ‘subtrai’ material, através da utilização de uma variedade de diferentes tipos de fresas, geralmente de um bloco de madeira ou espuma, que é gradualmente reduzido para a réplica física do modelo original desenhado em CAD. No segundo caso, o modelo físico é construído sequencialmente, uma camada sobre a outra, até formar uma cópia analógica de seu original digital em CAD. A presente pesquisa tratará especificamente das tecnologias associadas aos métodos de PR com adição de material e a figura 1 ilustra as diversas tecnologias de prototipagem rápida.

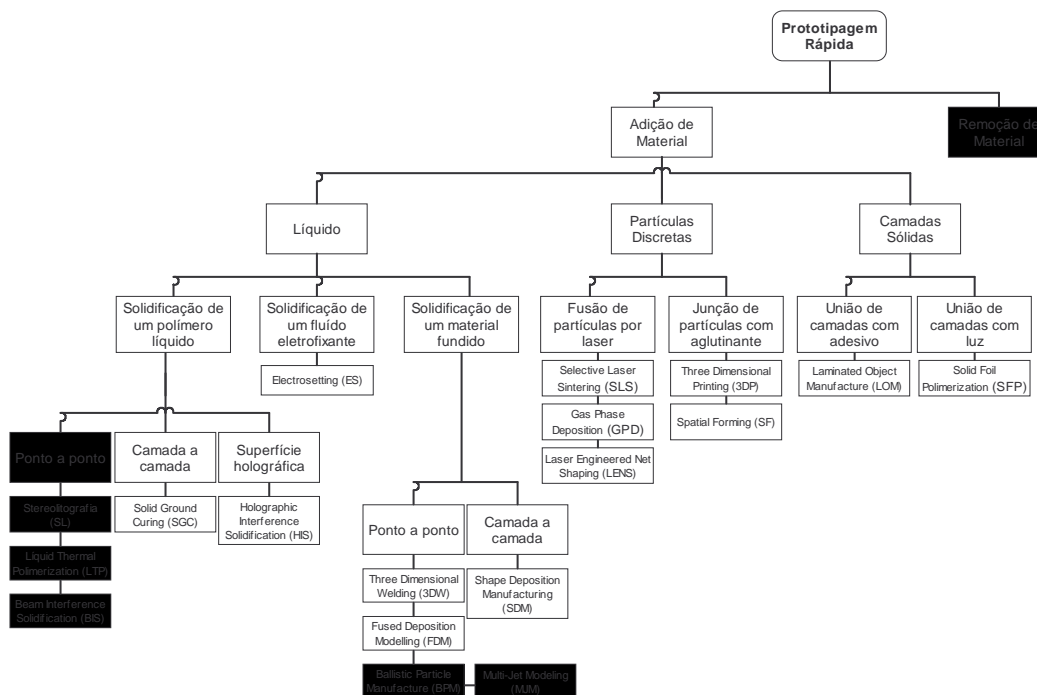


Figura 1 – Tecnologias associadas a prototipagem rápida  
Fonte: Adaptado de Pham e Gault (1998)

### 3. Tecnologias de adição de material

Em geral, as tecnologias de prototipagem rápida com adição de material empregam um processo de geração do protótipo dividido em três fases: pré-processamento, processamento do protótipo rápido (PR) e pós-processamento. Na primeira fase, em um software de desenho 3D, tal como o Solidworks, cria-se um modelo da peça que, depois de pronto, é exportado como um arquivo com extensão STL. O equipamento de prototipagem processa esse arquivo fatiando em diversas camadas o sólido desenhado em 3D. Em seguida, na fase de processamento do PR, o equipamento cria a primeira camada (ou fatia) do modelo físico e abaixa o modelo até a altura da espessura da próxima camada, repetindo-se esse processo até a completa construção do modelo sólido. Finalmente, na última fase, o modelo e seus suportes são removidos e é dado o acabamento final (em alguns casos, é necessário um processo final de cura ou ainda um tratamento da superfície) da peça física (PALM, 1998; EFUNDA, 2006).

A presente pesquisa se limita ao estudo e análise de três tecnologias de prototipagem rápida: a estereolitografia (SLA - *Stereolithography*), o processo pioneiro e que deflagrou a revolução da prototipagem rápida (Gorni, 2001); a modelagem por deposição de material fundido (FDM - *Fused Deposition Modeling*); e a modelagem por jato de tinta (MJM - *Multi Jet Modeling*), por ser uma das representantes das tecnologias por jato de tinta e cujos equipamentos possuem um preço mais acessível.

### 4. Estereolitografia (SLA)

Trata-se do primeiro processo de prototipagem rápida, sendo desenvolvido em 1986 pela 3D Systems (EFUNDA, 2006).

O processo baseia-se na polimerização de uma resina foto-sensível (acrílica, epóxi ou vinil) composta de monômeros, fotoiniciadores e aditivos, através de um feixe de laser ultra-violeta (BADOTTI, 2003). A máquina de SLA contém uma cuba, preenchida com a resina, no interior da qual há uma plataforma que se movimenta de cima para baixo. O computador envia para a plataforma a primeira fatia (camada) do modelo virtual a ser polimerizada. O controle numérico da máquina posiciona essa plataforma na superfície da resina e os espelhos galvanométricos direcionam o feixe de laser para a porção de resina correspondente a essa primeira camada. Quando essa camada é atingida pelo laser, os fotoiniciadores desencadeiam uma reação localizada que promove a formação de uma cadeia polimérica entre as moléculas do monômero dispersas na resina, ocorrendo a solidificação. Após a conclusão desse primeiro passo, a plataforma desce imergindo a primeira camada solidificada na resina líquida para que nova camada seja polimerizada sobre a primeira, e assim sucessivamente até a conclusão do modelo (ARTIS, 2006). Uma vez pronto, o modelo sólido é removido do banho de polímero líquido e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para ser submetido a uma cura completa (GORNI, 2003). A figura 2a ilustra o processo da estereolitografia.

### 5. Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)

A FDM se baseia na deposição, sobre uma plataforma, de camadas resultantes do aquecimento e amolecimento de filamentos (arames) do material plástico destinado à confecção do modelo. Simultaneamente, outros fios amolecidos vão formando suportes para as superfícies livremente suspensas do modelo, a fim de que elas possam ser construídas. Os arames destinados ao modelo são de ABS, elastômeros ou cera, enquanto os destinados aos

suportes são uma mistura de ABS e cal. A máquina para a FDM possui uma plataforma, revestida de uma espuma densa e flexível, que se movimenta no sentido vertical (eixo Z) e um cabeçote provido de dois bicos extrusores de arames aquecidos: um para alimentar as camadas do modelo e outro para a construção automática dos suportes. Esses arames ficam estocados dentro da máquina, em ambiente a vácuo aquecido, pois a umidade do material dentro do bico extrusor poderia causar formação de bolhas, que impediria a continuidade de sua deposição pelo bico. Os bicos extrusores, que na verdade, funcionam como uma resistência, são alimentados por esses filamentos através de duas guias giratórias ligadas a um motor, as quais vão transferindo para eles os arames estocados no rolo. O software da FDM é um misto CAD/CAM e não é integrado à máquina. Esta é conectada ao computador, com o sistema CAM, que monitora constantemente os comandos de construção. Para cada camada geram-se coordenadas ou caminhos pelos quais o bico extrusor vai depositando os fios fundidos. Ao final de cada camada a plataforma desce e o cabeçote inicia a deposição de mais material para a outra camada, repetindo a operação até a conclusão do modelo (ARTIS, 2006). As resinas termoplásticas adequadas a esse processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida (GORNÍ, 2003). A figura 2b ilustra o processo de modelagem por deposição de material fundido.

O processo não desperdiça material durante ou após a produção do protótipo, exigindo pouca necessidade de limpeza e permitindo sua instalação em ambientes não industriais (WOHLERS, 1993).

## 6. Modelagem por jato de tinta (MJM)

Nessa tecnologia, também conhecida como Thermojet, o mecanismo básico é um cabeçote, que se movimenta numa direção X, e uma plataforma, que se movimenta nas direções Y e Z, conforme o tamanho do objeto. O material termoplástico aquecido é expelido pelo cabeçote, através de 96 orifícios, que se abrem e se fecham enquanto ele executa um movimento repetitivo de vai-e-vem na direção X. Simultaneamente a plataforma se movimenta na direção Z, para criar uma nova camada. No caso de objetos maiores do que o cabeçote, a plataforma se movimenta também na direção Y, para permitir a construção do modelo. Essa técnica é muito empregada para obtenção de modelos pelo processo da cera perdida (ARTIS, 2006). A figura 2c ilustra o processo de modelagem por jato de tinta.

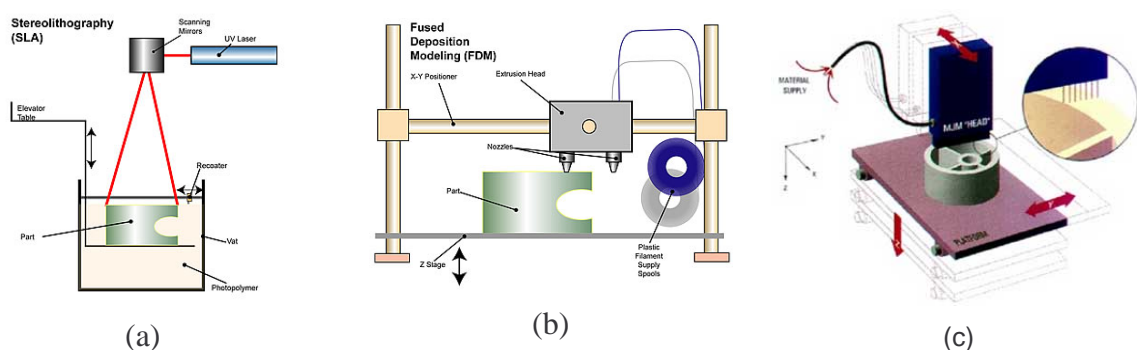


Figura 2 - Os processos de estereolitografia (a), modelagem por deposição de material fundido (b) e modelagem por jato de tinta (c)

Fonte: PADT (2006) e Artis (2006)

## 7. Comparação das tecnologias de prototipagem rápida

Na comparação das tecnologias de prototipagem foi utilizado um relatório de *benchmark*

entre impressoras 3D preparado pela T.A. Grimm Associates (GRIMM, 2003). Na análise comparativa dois critérios foram considerados: custo e tempo. Em relação ao critério custo, avaliam-se os requisitos despesa de aquisição do equipamento, despesa operacional anual, processamento anual dos protótipos, taxa horária para operação do equipamento e custo médio de um protótipo; e em relação ao critério tempo avaliam-se os requisitos tempo médio de construção de um protótipo e tempo médio total de processamento. O critério qualidade, apesar de tratado no estudo de Grimm (2003), não será abordado na presente pesquisa por fugir ao seu escopo.

Para fornecer dados relevantes em um vasto tipo de peças, a pesquisa de Grimm (2003) analisou três diferentes protótipos: a tampa de um celular (um protótipo relativamente pequeno, com um grande número de detalhes e com uma parede fina), uma ventoinha (um pouco maior que o anterior, tanto em volume quanto em tamanho, e cujas lâminas possuem uma forma complexa) e a base de um *track ball* (um protótipo de maior massa e com um perfil detalhado). Os protótipos foram fabricados por usuários dessa tecnologia e não por fabricantes dos sistemas. Cada protótipo foi concebido individualmente a partir dos equipamentos testados, com parâmetros adequados para o conceito, forma e aplicação do mesmo. Durante o processo, todos os parâmetros de tempo e custo foram medidos, desde a abertura do arquivo em formato STL até que o protótipo estivesse pronto para uso ou venda.

A **despesa de aquisição** reflete o investimento no sistema de prototipagem usado, incluindo os equipamentos de apoio, mas não considerando qualquer equipamento opcional. A figura 3 mostra a comparação entre esses requisitos.

A **despesa operacional anual** combina a despesa de aquisição com as despesas contínuas, tais como contratos anuais de manutenção, mão de obra e peças de reposição para serviços de rotina e materiais de consumo. Na figura 4 pode-se verificar a despesa operacional anual para cada tecnologia.

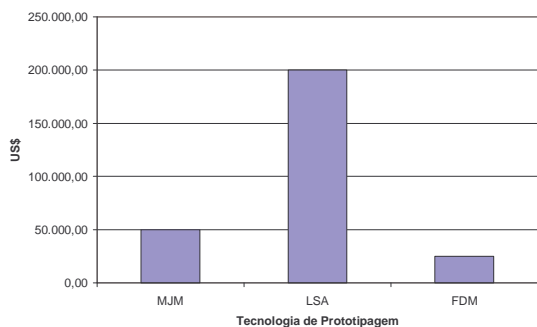


Figura 3 – Despesa de aquisição com equipamentos

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

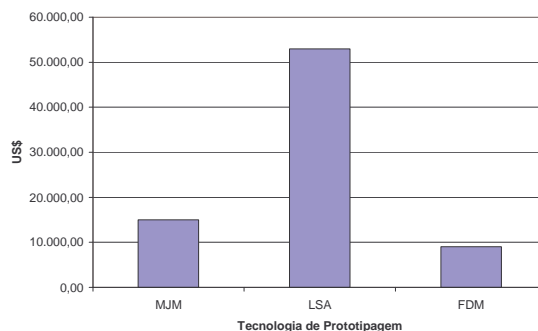


Figura 4 – Despesa operacional anual

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

Para determinar o **processamento anual dos protótipos** e as horas de máquinas associadas, os tempos de construção são considerados para duas peças típicas, como a média das dimensões de largura, comprimento, altura e volume dessas peças. A pesquisa assumiu que as máquinas rodam em 25 a 50% de sua capacidade e que a máquina seria usada nove horas por dia, cinco dias por semana e 50 dias por ano, com uma taxa de utilização de 60% (para cobrir tempos de reparos, manutenção e ineficiências na programação). A figura 5 ilustra a comparação deste requisito entre as tecnologias de prototipagem.

O **custo da hora de utilização do equipamento** foi medida a partir das horas operacionais

anuais e das despesas anuais, como mostra a figura 6. Para cada sistema, os fatores mais significativos que afetam a taxa horária foram o processamento anual, o custo do sistema e as despesas com manutenção.

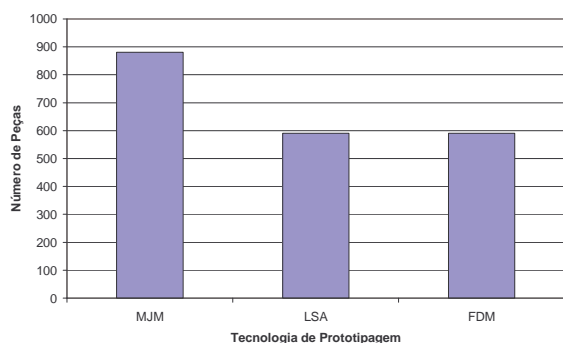


Figura 5 – Processamento anual de protótipos

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

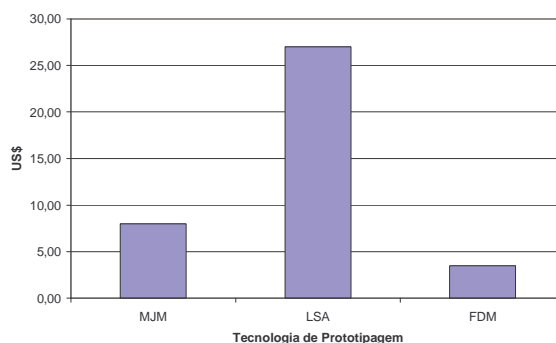


Figura 6 – Custo horário de utilização do equipamento

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

Utilizando a taxa horária de cada máquina, o tempo de produção, o custo do material e as despesas com mão de obra, o **custo de um protótipo** foi calculado para cada equipamento e uma média foi determinada. O custo médio da peça inclui despesas de mão de obra a uma taxa de US\$ 35,00/hora para todas as operações que necessitam de intervenção humana. O custo do protótipo foi considerado como uma medida de viabilidade na avaliação de um sistema e é mostrado na figura 7.

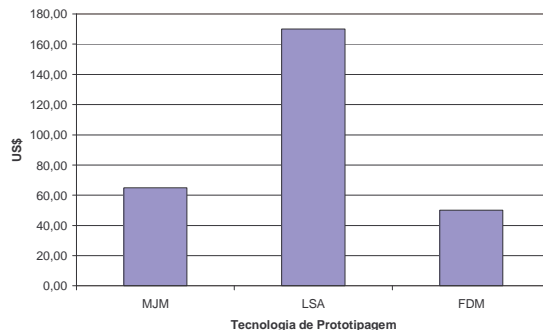


Figura 7 – Custo médio de um protótipo

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

O **tempo médio para construção dos protótipos** considera apenas o tempo que cada equipamento precisou para construir a peça, não considerando o tempo para preparação dos dados, preparação da máquina e operações de pós-processamento. O tempo de construção geralmente é citado como uma medida de desempenho do sistema e é mostrado na figura 8. O **tempo médio total de processamento do protótipo**, dado pela figura 9, considera todos esses tempos, desde a preparação da máquina até o final das operações de pós-processamento.

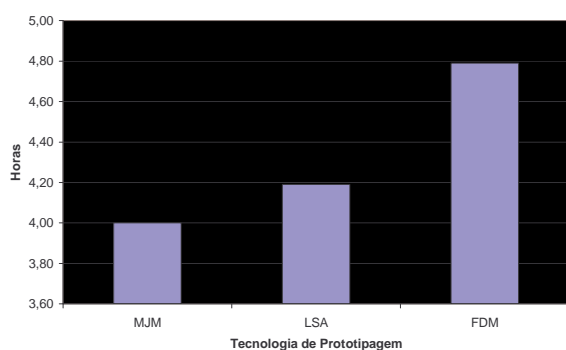


Figura 8 – Tempo médio de construção

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

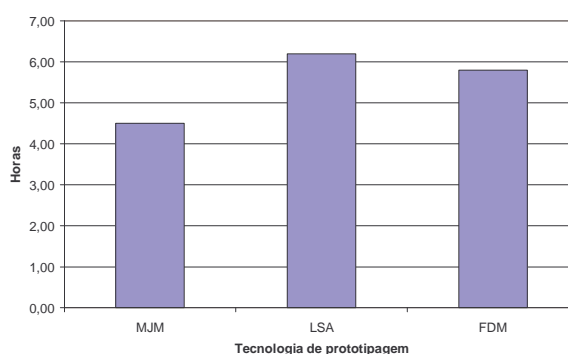


Figura 9 – Tempo médio total de processamento

Fonte: Adaptado de Grimm (2003)

## 7. Análise dos Dados

A análise dos dados apresentados acima permite uma comparação entre cada uma das tecnologias estudadas. Para uma melhor visualização desta comparação entre os critérios analisados foi elaborado o quadro 1.

Critérios	Requisitos	Tecnologias de Prototipagem		
		SLA	FDM	MJM
Custo	Despesa de aquisição do equipamento	☞	☑	☞
	Despesa operacional anual	☞	☑	☞
	Processamento anual dos protótipos	☑	☑	☞
	Taxa horária para operação do equipamento	☞	☑	☞
	Custo médio de um protótipo	☞	☑	☞
Tempo	Tempo médio de construção de um protótipo	☞	☞	☑
	Tempo médio total de processamento	☞	☞	☑
<b>Avaliação Final</b>		<b>15</b>	<b>9375</b>	<b>2025</b>

Quadro 1 – Comparação entre tecnologias de prototipagem

Para tornar esta análise quantitativa e evitar falhas na interpretação de cada requisito, optou-se por dar um valor cinco ao símbolo ☑, que significa que o método é mais vantajoso que os demais no requisito analisado, um valor três ao símbolo ☞, que significa que o método tem uma vantagem intermediária, e um valor um ao símbolo ☞, que significa que o método é menos vantajoso que os demais. Desse modo, a tecnologia que apresentasse o maior índice de avaliação final, dado pela multiplicação do valor de cada símbolo, poderia ser considerada a de maior custo benefício. Adotando-se esta forma de avaliação, conclui-se que a tecnologia de maior custo benefício, dentre as três analisadas, foi a FDM. Esta tecnologia é menos vantajosa que a MJM apenas em relação ao tempo médio de processamento e a pior escolha em se tratando do tempo médio de construção de um protótipo. Nos demais requisitos analisados, a tecnologia FDM é melhor que a SLA e que a MJM. Além disso, pelo fato de seu baixo ruído e pouco desperdício, o equipamento empregado para esta tecnologia pode ser instalado em ambientes não industriais, permitindo seu uso para fins educacionais e de pesquisa no âmbito das universidades brasileiras. Entretanto, no caso de aplicações industriais, muitas vezes o tamanho do protótipo a ser gerado, os tipos de resinas adequadas e a qualidade do acabamento da superfície podem ser critérios qualificadores na escolha da tecnologia de prototipagem rápida a ser empregada. Nestes casos, apenas a análise dos critérios de custo e tempo podem

não ser suficientes para determinar a escolha da tecnologia a ser adotada.

## 8. Conclusões

Em função das análises realizadas o presente artigo mostrou que, com base nos requisitos avaliados, a tecnologia FDM é a que apresenta o melhor custo benefício, apresentando ainda a vantagem de poder ser instalada em ambientes não industriais, tais como os laboratórios de desenvolvimento de produtos das universidades brasileiras, muito embora o tamanho do protótipo possa ser uma limitante do processo.

## Referências

**ARTIS.** *Tecnologias de prototipagem - estereolitografia SLA*. Clínica de Odontologia Integrada Artis, Brasília/DF. Disponível em: <http://www.artis.com.br>. Acesso em: 25 de maio de 2006.

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

**CHOI, S. H. e CHAN, A. M. M.** *A virtual prototyping system for rapid product development*. Computer-Aided Design, No. 36, p. 401-412, 2004.

**EFUNDA.** *Rapid Prototyping: An Overview*. Efunda Engineering Fundamentals. Disponível em [http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/intro.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm). Acesso em 25 de maio de 2006.

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

**GONDAK, Maurício de Oliveira; GONDAK, Rogério de Oliveira; ZLUHAN, Gilberto Paulo.** *Otimização do desenvolvimento de produto através da Prototipagem Rápida na obtenção de ferramental e protótipos em curto espaço de tempo*. 5º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Curitiba, 2005.

**GORNI, Antonio Augusto.** *Introdução à prototipagem rápida e seus processos*. Antonio Gorni On Line. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>. Acesso em 25 de maio de 2006.

**GRIMM, Todd.** *Rapid prototyping benchmark: 3D printers*. T. A. Grimm Associates Inc. Outubro, 2003. Disponível em: <http://www.tagrimm.com/benchmark>. Acesso em 26 de maio de 2006.

**MODEEN, Thomas.** *CADCAMing. The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture*. Automation in Construction, No. 14, p. 215-224, 2005.

**NETTO, A. C. S.; OGLIARI, A.; BEAL, V. E.; AHRENS, C. H.** *Prototipagem rápida: uma ferramenta de projeto para a redução do tempo de desenvolvimento e melhoria da qualidade dos produtos*. 4º Congresso Brasileiro de Desenvolvimento de Produtos, Gramado, 2003.

**PALM, William.** *Rapid Prototyping Primer. The learning factory*. Disponível em: <http://www.mne.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm>, 1998. Acesso em 17/05/2006.

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

**STRATASYS.** *Dimension 3D Printers - Dimension BST*. Última revisão do site em 2005. Disponível em: <http://www.dimensionprinting.com/printers/printing-bst.shtml>. Acesso em 26 de maio de 2006.

**WOHLERS, Terry T.** *Rapid Prototyping Systems*. Proceedings of the First European Rapid Prototyping Convention, Junho, Paris, França, 1993. Disponível em: <http://www.wohlersassociates.com/overview.html>. Acesso em 19 de maio de 2006.

**ZCORP.** *Products - ZPrinter 310 Plus*. Z Corporation. Disponível em: <http://www.zcorp.com/products/printersdetail.asp?ID=1>. Acesso em 26 de maio de 2006a.

**ZCORP.** *The World's Fastest 3D Printer Just Got Faster. Introducing the ZPrinter® 310 Plus. Faster. Sharper. Smoother*. Z Corporation. Disponível em: <http://www.zcorp.com/products/310PlusOverview.pdf>. Acesso em 26 de maio de 2006b.