

# Prototipagem Rápida: a escolha da tecnologia PR mais adequada à estratégia para o desenvolvimento de produtos.

**Enedina Antomil Pelaez Capuano**  
Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC  
e-mail: enedina@fatecsp.br ou capu@osite.com.br  
**Marly Monteiro de Carvalho**  
Eng. de Produção da Escola Politécnica da USP

**Resumo:** Este trabalho, tem como objetivo principal, avaliar a Prototipagem Rápida - PR segundo critérios de tempo, custo, qualidade e flexibilidade. Como objetivo específico pretende-se avaliar duas tecnologias de PR, quais sejam: Modelamento por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling – FDM) e Estereolitografia (Stereolitography).

**Palavras-chave:** Prototipagem Rápida, Modelagem por Deposição a Fusão – FDM, Estereolitografia.

***Abstract:** A comparative analysis applicable to Rapid Prototyping is introduced. This analysis is based on four criteria, for instance: cost, time, quality and flexibility. Two technology are presented; the first one is the Fused Deposition Modeling – FDM, and the second one Stereolitography.*

***Key-words:** Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling – FDM, Stereolitography.*

## 1. Introdução

Frente ao atual cenário mundial, tem se tornado essencial à sobrevivência das empresas, de um modo geral, a diferenciação de seus produtos. Garantir a rápida concepção de um novo produto, com qualidade, custo final reduzido, privilegiando a capacidade de gerar peças, componentes ou qualquer produto com características técnicas e ou tecnológicas inovadoras, sua rápida comercialização pode ser determinante e estratégico.

Essa realidade, levou a procura de novos caminhos que viabilizassem a conquista de mercado. Dentre os caminhos apresentados, cada vez mais se destaca no setor de projetos, a tecnologia de Prototipagem Rápida.

A Prototipagem Rápida, é uma tecnologia que vem emergindo desde a última década, trazendo contribuições importantes, nesse sentido, mormente, devido a sua capacidade de reduzir ainda mais o tempo e o custo do projeto o que acaba por garantir sua rápida concepção, produção, lançamento e comercialização, tornando-se uma das estratégias a ser utilizada por empresas que pretendam vencer esse desafio.

Este trabalho, tem como objetivo principal, avaliar a PR segundo critérios de tempo, custo e flexibilidade. Como objetivo específico pretende-se avaliar duas tecnologias de PR, quais sejam: Modelamento por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling – FDM) e Estereolitografia (Stereolitography).

Tal objetivo deverá ser atingido através da comparação de dois Protótipos Rápidos construídos com tecnologias PR distintas, porém oriundos de um mesmo projeto elaborado com a utilização do software AutoCAD.

## 2. Prototipagem Rápida: Revisão Teórica

A PR é uma categoria tecnológica, decorrente da união de uma série de tecnologias de construção de sólidos, que emergiu na última década, cujo objetivo é a produção de protótipos, moldes, modelos ou mesmo peças, partindo da elaboração do projeto tridimensional gerado através de um software CAD (“Computer Aided Design”).

Essa tecnologia tem suas origens baseadas em duas técnicas: a topografia e a fotoescultura.

Por volta de 1890, Blather desenvolveu um método para a construção de moldes para mapas de relevo topográfico. O método consiste em imprimir em uma série de discos de cera, as linhas do contorno topográfico (curvas de nível), das cartas topográficas, que informam a inclinação do terreno, ou seja, a variação planialtimétrica.

Vários outros métodos foram propostos, como em 1940, foi proposto por Perera um método similar ao método de Blather, que através do corte e empilhamento de folhas de papelão formando um mapa tridimensional do terreno. Mais tarde Zang (1964) e Gaskin (1973), fizeram o refinamento desse método. Perera (1940) apud Beaman (1997).

Já em 1972, Matsubara da Mitsubishi Motors, propôs um processo fotográfico. Através de uma resina de fotopolímero, recoberta por polímeros refratários (como pó de grafite ou areia), que eram espalhados formando uma camada. Uma luz era então projetada sobre uma região da camada, provocando o seu endurecimento. As partes não sensibilizadas, eram retiradas mais tarde, com a utilização de um solvente.

Em 1974, DiMatteo verificou que essa mesma técnica, poderia ser empregada para reproduzir as superfícies de fabricação complexa, em função da operação da máquina. Deste modo, através da sobreposição de diversas camadas de folhas metálicas, recortadas e posteriormente unidas, produziu-se um molde em camadas. DIMATTEO (1976) apud BEAMAN (1997).

### 2.1 Fotoescultura

A fotoescultura nasceu no século XIX com a aspiração de criar réplicas exatas de peças tridimensionais, incluindo a forma humana.

Um estudioso de sucesso desta tecnologia foi Frenchman François Willème em 1860. Sua técnica consistia em colocar no centro de uma sala circular um objeto, e em torno dele posicionar 24 câmeras fotográficas, distribuídas igualmente e acioná-las simultaneamente. A silhueta de cada uma das fotos era utilizada depois por um artista, para esculpir cada um dos 1/24 da porção cilíndrica da Figura. BEAMAN (1997).

Para reduzir o trabalho da escultura, BAESE (1904), descreveu uma técnica que utilizava uma luz graduada para expor uma gelatina fotosensível, que se expande, proporcionalmente ao contato com a água. Anéis são então fixados sobre um suporte para fazer a réplica do objeto, método semelhante ao DiMatteo. Ver FIGURA 1.

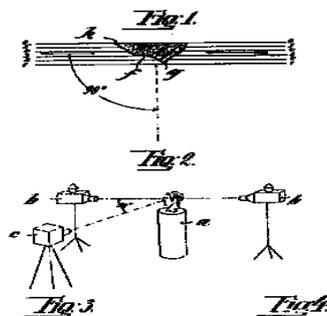


FIGURA 1: Método de Baese  
BEAMAN 1997

Várias outras pesquisas e técnicas foram desenvolvidas desde o final do séc. XIX até a atualidade.

Todas essas pesquisas, métodos e processos baseados nos conceitos de Topografia e Fotoescultura, acabaram por dar origem às técnicas hoje empregadas na PR. Porém, estas técnicas de PR só obtiveram êxito comercial a partir de 1988, quando a empresa 3D Systems passou a comercializar o primeiro equipamento de PR bem sucedido, SLA-1 “**StereoLithography Apparatus**”.

## 2.2 Construção do Protótipo

O processo que envolve a construção de um protótipo rápido pode ser

Segundo WOZNY (1997), o sistema de PR, envolve algumas fases de operação, que englobam o **projeto elaborado em um CAD 3D**, a **pré-operação** (preparação de dados geométricos, realizada anteriormente ao processamento na máquina SFF - Solid Freeform Fabrication), o processamento propriamente dito SFF e a **pós-operação**, ilustrados na FIGURA 2.

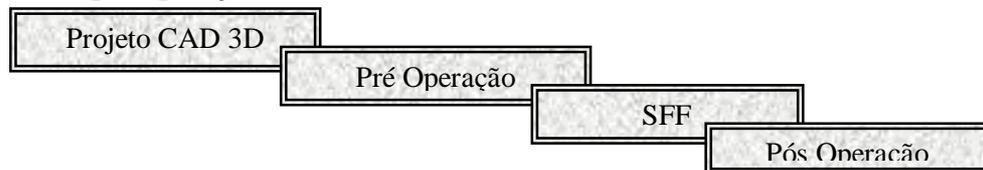


FIGURA 3: Fases de Operação  
Elaborado pela autora

Chamamos a fase de pré operação, àquela que precede o processamento SFF, cujo papel é atuar como uma ponte entre o projeto 3D realizado no CAD e o processamento propriamente dito, incluindo a preparação dos dados geométricos.

O desenvolvimento do projeto em um CAD 3D, visa a futura geração de um modelo físico (protótipo), idêntico ao modelado no CAD. Portanto, a geometria do modelo tridimensional deve ser rigorosamente precisa e minuciosamente descrita, disso dependerá a qualidade final do protótipo.

Os dados contidos nos arquivos CAD, não são compatíveis com o sistema PR. A fase de Pré Operação envolve a preparação dos dados geométricos, obtidos nos arquivos CAD, tornando-os adequados ao processo, através da alteração do formato inicial para o formato STL.

Ainda, de acordo com WOZNY (1997), a “tradução” dos formatos, consiste em transformar o modelo 3D CAD em vários triângulos, que irão definir as faces do modelo. Cada triângulo, define um único vetor normal, acompanhado pelas coordenadas X,Y e Z. Cada um dos três vértices que descrevem o triângulo, ou seja, o modelo sólido 3D CAD é decomposto em uma série de triângulos, que resultam em um modelo idêntico ao inicialmente proposto e apropriado ao sistema de PR.

O sistema SFF (Solid Freeform Fabrication), tem como função tornar possível a rápida fabricação de formas complexas tridimensionais modeladas diretamente no CAD, conforme mostra a FIGURA 3.



FIGURA 3: Fases envolvidas no processo SFF  
Elaborado pela autora

O processamento das informações contidas no arquivo STL, é feito inicialmente através da preparação do modelo, necessária às fases de planejamento de processo e controle da produção.

O modelo tridimensional gerado no CAD, agora já convertido para o formato (STL) compatível ao processo que irá gerar o modelo físico, deve ser submetido a uma série de ajustes necessários à preparação do modelo, a fim de gerar uma duplicata do modelo virtual proposto. Estes ajustes se referem a validação do modelo e correção do modelo, preparação do modelo e confecção de estrutura de suporte, quando necessário.

A preparação do modelo, inicia-se pela sua validação e correção, que consiste em executar a verificação dos dados de entrada no formato STL, necessária para certificação da ocorrência de alguma anomalia geométrica. A compensação é uma fase indispensável à obtenção de um protótipo idêntico ao modelo tridimensional projetado. A escolha da tecnologia de Prototipagem e do material que será trabalhado, torna possível a identificação antecipada de fenômenos físicos que podem ocorrer durante o processo, tais como retração, deformação, entre outros. Tais ocorrências são corrigidas por intermédio de sistemas que compensem essas modificações ou que as evitem, obtendo-se assim, um protótipo tal como foi pré-concebido. Por fim, podem ser geradas estruturas de suporte, que tem como finalidade dar sustentação a geometria da peça. Alguns sistemas de PR, tais como os das máquinas “3D Systems” e “Stratasys”, exigem uma estrutura de suporte, o que não acontece no sistema SLS por exemplo, que dispensa tais estruturas.

O planejamento do processo, gera trajetórias que servem de guia para o processo de adição de camadas do material que irá construir fisicamente o modelo, em uma máquina automatizada para esse fim. O modelo é decomposto em fatias (slicing), que representam um plano de seção transversal associada a uma espessura uniforme. Cada uma das fatias é varrida (scan), para que se possa determinar com exatidão o formato desejado. Cada fatia é composta por uma seção transversal do modelo e uma camada de forma complementar, com material a ser utilizada na estrutura de suporte, que é então depositada e fundida na camada anterior utilizando uma das técnicas de deposição e fusão disponíveis.

A fase seguinte, controle de geração do objeto, tem como função propiciar a fabricação do modelo físico através da emissão de sinais de controle. Estes sinais de controle, vão gerar trajetórias para monitorar ou guiar o processo de adição de material, para a construção física do modelo.

A última fase de preparação do modelo, compreende a cura se necessária, remoção de estrutura de suporte, quando existir, e limpeza da peça.

Todas as tecnologias de PR, se caracterizam pelo mesmo princípio de criação do protótipo (obtenção de cortes horizontais paralelos, da peça representada tridimensionalmente no CAD, que posteriormente, a partir da sua sobreposição, reconstituirá o modelo sólido). Porém, existem algumas diferenças tecnológicas entre os princípios de operação.

### **3. Aspectos Metodológicos**

Neste trabalho, comparamos duas tecnologias de PR, quais sejam: Estereolitografia e FDM.

A metodologia utilizada pode ser descrita em três fases. Na primeira fase foram selecionados os critérios para comparação das duas tecnologias de PR: custo, tempo, qualidade e flexibilidade. Na segunda, para eliminação do vies na análise comparativa, confeccionamos um modelo tridimensional utilizando CAD- *Computer Aided Design* - 3D CAD, como única base de dados para a realização dos protótipos.

Nosso modelo foi gerado com o software AutoCad e representa uma torneira com designe diferenciado, conforme FIGURA 4. Foi construído um Protótipo Rápido com tecnologia FDM, através da empresa Sysgraph e um outro com Estereolitografia, através da empresa Robtec. Optou-se por essa forma geométrica a fim de possibilitar a averiguação das dificuldades para a construção da peça.

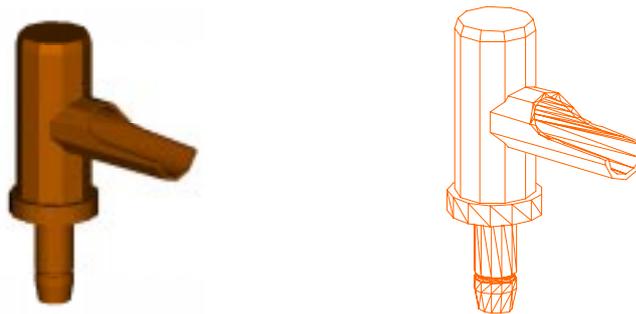


Figura 4 – Modelo 3D CAD (à esquerda modelo renderizado, à direita modelo wireframe)

Fonte: Elaborada pela autora

Na confecção do modelo, primamos pela precisão geométrica. O modelo criado, foi a única fonte de dados, consultada na construção do protótipo. Depois de confeccionado o modelo, foi feita uma revisão, que resultou na melhoria de algumas características de design e na correção de alguns erros. Todo esse procedimento, garantiu que não houvesse a necessidade de retrabalho do modelo 3D.

A terceira e última fase foi a confecção dos protótipos rápidos. O primeiro processo utilizado foi a Estereolitografia, que utiliza uma resina líquida para confecção do protótipo. O processo desenvolve-se da seguinte forma: a câmara de construção do protótipo é dotada de uma plataforma, que inicialmente é coberta por uma fina camada de resina (aproximadamente 0,15 mm). O equipamento já possui as informações relativas a geometria da primeira camada a ser sensibilizada e incide sobre a superfície da resina uma fonte laser que descreve com precisão essa geometria e endurece somente essa área e a região relativa a estrutura de suporte. A plataforma abaixa, e uma nova camada de resina é depositada para a formação da próxima fatia. Esse ciclo se repete até que o protótipo seja completamente confeccionado.

Em seguida foi construído o protótipo rápido através da tecnologia FDM, que utiliza como material o ABS e cujo processo pode ser descrito da seguinte maneira:

Após a verificação da geometria da primeira camada e estrutura de suporte é feita a deposição do material (ABS) fundido através de um bico extrusor, sobre uma plataforma, e assim sucessivamente é feita a sobreposição das camadas, até a completa construção do protótipo.

Com os dois protótipos já construídos, passamos a experimentação. Ver Figura 5.



(a) Protótipo FDM Executado pela empresa Sysgraph



(b) Protótipo SLA - Estereolitografia Executado pela empresa Robtec

Figura 5: Protótipos Rápidos  
Elaborado pela Autora

## 4. Análise dos resultados

Conforme comentado anteriormente, os protótipos foram avaliados segundo quatro critérios: custo, tempo, qualidade e flexibilidade. Os principais resultados obtidos serão apresentados a seguir:

### 4.1 Qualidade

Os critérios estabelecidos para determinar o nível de qualidade, estão atrelados às seguintes características específicas: estanqueidade, fidelidade geométrica e aparência.

Foram feitos alguns testes para comprovar essas características.

Teste de estanqueidade: fizemos a simulação do uso dos protótipos através do acoplamento da bica a uma fonte de água corrente e constante. Os protótipos permaneceram em funcionamento por 2 horas. Durante esse período nenhum dos protótipos apresentou vazamento, o que nos permite afirmar que todos foram aprovados no que se refere a estanqueidade. Além desse teste, antes da construção dos protótipos, foram executadas fotos microscópicas de amostras confeccionadas com técnicas FDM, Estereolitografia, que também confirmam este resultado, pois comprovam que a superfície analisa não é porosa o que garante estanqueidade.

Teste de Fidelidade geométrica: visa verificar a caracterização de falhas geométricas e dimensionais na comparação do projeto ao protótipo.

Nestes ensaios, fizemos uso dos equipamentos de metrologia necessários para constataremos falhas dimensionais e geométricas.

Foram identificadas algumas distorções dimensionais muito pequenas nos PR, possivelmente devido a espessura das camadas de construção dos protótipos. Estas falhas foram desconsideradas, por estarem dentro da tolerância prevista. No que se refere a geometria foi possível verificar que os dois protótipos tem suas características preservadas.

Teste de aparência: como critério para avaliação da aparência final dos protótipos, não foi estabelecido nenhum teste específico. Este quesito foi avaliado somente pela observação crítica de cada um dos protótipos. Na observação dos protótipos, pudemos verificar que os construídos com tecnologia PR, possuem uma aparência final muito satisfatória, pelo fato de terem sido construídos em bloco único e por tanto não existirem emendas de peças. Outro fato observado, se refere a opacidade apresentada no protótipo FDM, enquanto que o protótipo confeccionado em Estereolitografia é translúcido, o que lhe dá uma maior leveza aparente, além da possibilidade de visualização de detalhes internos do protótipo.

### 4.2 Tempo

Quanto ao tempo, colocamos os valores consumidos na fabricação de cada um dos protótipos, no diagrama abaixo, de onde podemos concluir que a tecnologia Estereolitografia se mostrou mais vantajosa, como mostra a FIGURA 6.

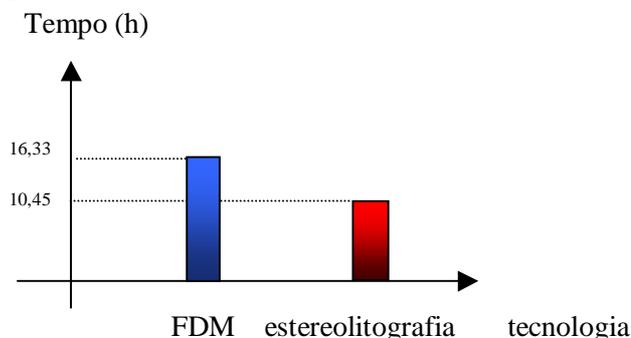


Figura 6: Diagrama tempo/ tecnologia de fabricação do Protótipo

Fonte: Elaborada pela autora

### 4.3 Custos

Os custos relativos a confecção dos protótipos rápidos foram distintos como facilmente se pode verificar na FIGURA 7.

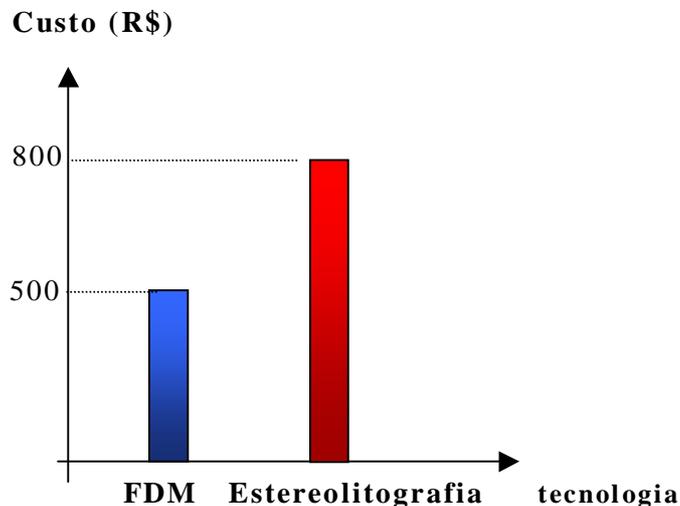


Figura 7: Diagrama custo / tecnologia de fabricação do Protótipo  
Fonte: Elaborada pela autora

### 4.4 Flexibilidade

Após observar todo o processo produtivo utilizado na geração dos protótipos rápidos, no que se refere a flexibilidade pode-se afirmar que a utilização das tecnologias PR, são igualmente flexíveis, pois permitem a geração de protótipos distintos até de forma simultânea.

Assim, com base neste experimento, é possível afirmar que as tecnologias de prototipagem rápida alvo do nosso estudo, tem alta qualidade e são flexíveis; porém quanto ao custo e tempo há diferenças, quanto mais rápido é o processo mais caro ele se torna. Essa diferença de tempo entre as duas tecnologias estudadas, neste caso específico, não seria o fator primordial na escolha entre uma ou outra tecnologia, porém quando o fator tempo é estratégico dentro do contexto do projeto, essa diferença entre os tempos pode ser relevante e acabar por determinar que tecnologia será mais adequada. Quanto ao custo essa relação também é válida.

Portanto, ao desenvolver um projeto que fará uso da tecnologia PR, torna-se estratégica a escolha da tecnologia mais adequada.

## 5. Conclusões

A PR pode se tornar estratégica quando empregada de maneira adequada. O uso desta ou daquela tecnologia de prototipagem é que dará a escolha, um caráter estratégico. Ou seja, não basta utilizar-se da tecnologia PR, mas sim avaliar qual tecnologia será mais eficiente para o produto específico. Observando a experimentação feita com as tecnologias de estereolitografia e FDM, por exemplo, embora sejam pequenas as diferenças existem e fica claro que: quando o ganho de tempo é o ponto estratégico do projeto, a tecnologia mais adequada seria a estereolitografia, por outro lado quando o fator estratégico for o custo deve-se adotar a tecnologia FDM. Já no que se refere à Flexibilidade e Qualidade dos Protótipos Rápidos, é possível afirmar que ambas tecnologias possuem alta qualidade e flexibilidade, com sutis diferenças entre si que também deverão ser consideradas no momento da escolha. Portanto, o essencial é

determinar previamente que características são consideradas estratégicas para o projeto específico e então, fazer a escolha criteriosa da tecnologia PR que mais se adapta a ele.

## **6. Referências Bibliográficas**

- BEAMAN, J.J.**, Historical Perspective, JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, Setembro/1997.
- BOHN, J. H.**, "File Format Requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow," International Conference on Manufacturing Automation, University of Hong Kong, April 28-30, 1997, vol. 2, pp. 878-883.
- BROWN R. L.**, Needs, Goals, and Objectives, JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, Setembro/1997.
- CADesign**, Projetos de moldes ficam mais baratos, Revista CADesign, ano 4, nº 38, São Paulo, 1998, pp. 30.
- CASES CADWARE**, Volkswagen desenvolve veículos em tempo recorde, Revista Cadware, ano 1, nº 30, São Paulo, 1997, pp. 44-45.
- MACLEAN S., COLLERAN B.**, Canadian team develops new process that builds on RP benefits, RAPID PROTOTYPING PART III, novembro de 1997.
- Máquinas e Metais**, Com a Prototipagem Rápida, da concepção à comercialização de um produto é um pulo, novembro/97, pp.46-53.
- 6ª European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing**, Abstracts, University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, abril/1997.
- University of Hong Kong**, Rapid prototyping, Hong Kong, China, 1994.
- WEISS, L. E.**, Processes Overview, JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, Setembro/1997.
- WOZNY, M. J.**, CAD and Interfaces, JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, Setembro/1997.