

ANÁLISE DIMENSIONAL DA FABRICAÇÃO DE PEÇAS MINIATURIZADAS POR IMPRESSÃO 3D

Gean V. Salmoria, gsalmoria@cimject.ufsc.br¹
Manoella R. Cardenuto, manoella@cimject.ufsc.br¹
Priscila Klauss, pklauss@cimject.ufsc.br¹
Carlos H. Ahrens, cha@cimject.ufsc.br¹

¹CIMJECT – Depto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina –UFSC, Caixa Postal 476
Florianópolis - SC – Brasil, CEP 88040-900

Resumo: O desenvolvimento de novos e a adaptação de processos existentes para a fabricação de componentes miniaturizados passam por aspectos como a modificação de máquinas e ferramentas, otimização de processos, melhorias na exatidão e precisão e até a fabricação de geometrias diferenciadas. A micro-vácuoformagem (hot-embossing), a abrasão a laser e a micro-moldagem por injeção são métodos de fabricação aplicáveis para uma grande diversidade de geometrias e de materiais poliméricos. As técnicas de prototipagem e fabricação rápida auxiliam o desenvolvimento de novos produtos em um curto prazo de tempo com redução de custos, permitindo a criação de objetos de até décimos de milímetros com exatidão na ordem de micrometros. O processo de impressão 3D com resina fotocurável é um método de prototipagem rápida recente no mercado que vem crescendo cada vez mais. Buscando analisar quão preciso e/ou exato é o processo para impressão 3D de modelos miniaturizados e qual a tolerância dimensional, foi realizado uma análise sobre exatidão e precisão nas dimensões de peças produzidas pela impressora EDEN 250 da Objet. Observando os estudos qualitativos percebemos que a EDEN 250 imprime satisfatoriamente peças pequenas principalmente com formatos arredondados. Peças que possuem cantos “vivos” apresentam limitações no que diz respeito à precisão e exatidão dos cantos. A resina de impressão FullCure® 720 é uma resina de qualidade mediana, pois apresenta alta absorção de umidade e sensibilidade ao calor. As amostras estudadas foram classificadas de acordo com a norma NBR 6158, como peças IT11 (tolerância máxima de $\pm 60 \mu\text{m}$).

Palavras-chave: Prototipagem Rápida, Impressão 3D, Miniaturização, Exatidão e Precisão.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente parte da indústria de fabricação de componentes plásticos vem sofrendo grande mudança, evidenciando uma tendência à miniaturização de dispositivos e sistemas (Batalha, 2008). A consolidação do mercado de miniaturização é demonstrada pelo crescimento global previsto entre os anos de 2004 (12 bilhões de dólares) até 2009 (25 bilhões de dólares). Muitas vezes a principal dificuldade na miniaturização de componentes e peças está relacionada com a limitação na exatidão e precisão dos processos de fabricação. O desenvolvimento de novos e a adaptação de processos existentes para a fabricação de componentes miniaturizados passam por aspectos como a modificação de máquinas e ferramentas, otimização de processos, melhorias na exatidão e precisão e até a fabricação de geometrias diferenciadas (Heckele, 2003 e Piotter, 2004). Os métodos de miniaturização e micro-fabricação de componentes poliméricos são uma alternativa de baixo custo para tecnologia de micro sistemas eletromecânicos (MEMS) (Brown 1980 e Zhou, 1999). A micro-vácuoformagem (hot-embossing), a abrasão a laser e a micro-moldagem por injeção são métodos de fabricação aplicáveis para uma grande diversidade de geometrias e de materiais poliméricos.

As técnicas de prototipagem e fabricação rápida, como a estereolitografia (SL), a sinterização seletiva a laser (SLS) e a impressão tridimensional (3DP) auxiliam o desenvolvimento de novos produtos em um curto prazo de tempo com redução de custos (Jacobs, 1992 e 1996). Estas técnicas permitem a criação de objetos na faixa de centenas até décimos de milímetros com exatidão na ordem de micrometros. A máquina EDEN 250 da Objet é uma impressora 3D que proporcionada à criação de modelos com camadas de até 0,016 mm e paredes de 0,6 mm (Objet, 2008). Buscando analisar quão preciso e exato é o processo para impressão de modelos miniaturizados e qual a tolerância dimensional (norma ISO 286-2, 1988), foi realizado uma análise sobre as dimensões de peças produzidas pela impressora EDEN 250 da Objet com base em metodologia desenvolvida para análise dimensional de peças produzidas por SL (estereolitografia) no laboratório CIMJECT do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (Salmoria, 2008).

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Prototipagem Rápida por Impressão 3D

A prototipagem rápida por Impressão 3D é um processo semelhante à impressão em impressoras comuns onde um cabeçote jorra a tinta sobre o papel. Nos equipamentos de impressão tri-dimensional o modelo é feito em um CAD e em seguida transportado para o arquivo da máquina onde é fatiado, processo semelhante para qualquer tipo de equipamento de prototipagem rápida. Em seguida um cabeçote contendo resina ou aglutinante (dependendo do processo), jorra o respectivo material na bandeja do equipamento construindo assim o protótipo.

Atualmente no mercado existem três companhias que produzem equipamentos para prototipagem rápida por impressão 3D. A Z Corporation, a Objet e a 3D Systems.

As impressoras 3D da Z Corporation utilizam uma tecnologia de pó-aglutinante. Primeiramente, a impressora espalha uma camada fina de pó, em seguida, o cabeçote imprime um aglutinante em cima da camada de pó que acabou de ser depositada. Em seguida, um pistão cai sobre o material, fazendo uma prensagem na camada deixando a superfície lisa e pronta para receber a camada seguinte, e assim o processo é repetido. Uma vez que a peça é terminada, está cercada e suportada pelo pó que não foi utilizado, que é retirado e utilizado novamente na produção de outra peça.

Já a Objet e a 3D Systems utilizam em seu processo resinas líquidas fotossensíveis a radiação UV o que torna os protótipos mais detalhados, precisos.

2.2. 3D Printing Objet – EDEN 25

A Objet Geometrics foi à primeira companhia a trabalhar, com sucesso, com polímeros fotocuráveis. Em 2000 o desenvolvimento da tecnologia Polyjet permitiu a produção rápida de protótipos de variados tamanhos, modelos complexos e de alta qualidade.

O princípio de funcionamento da máquina baseia-se no seguinte: a partir de um CAS é feito o projeto 3D do modelo a ser confeccionado. Esse projeto é então convertido para o arquivo da máquina que pode ser STL ou SLC (este último para o mercado de jóias), onde é “fatiado” em camadas. Oito “cabeças” depositam simultaneamente quantidades idênticas do polímero fotossensível (resinas de construção e suporte) na bandeja a cada passagem ao longo do eixo X, formando assim uma camada fina de resina. Os bulbos UV localizados

Quando a primeira camada já está devidamente curada a bandeja se movimenta para baixo ao longo do eixo Z e dá-se início a construção de uma nova camada; esse processo ocorre sucessivamente até que o modelo esteja pronto. Nesse processo o modelo já sai da máquina pronto sem necessidade de pós-cura. O processo para eliminação do suporte é bem simples, somente com uma escova ou jato de água a resina é dissolvida deixando a peça pronta e sem rebarbas (Salmoria, 2007). A Figura (1) mostra o esquema de funcionamento do equipamento.

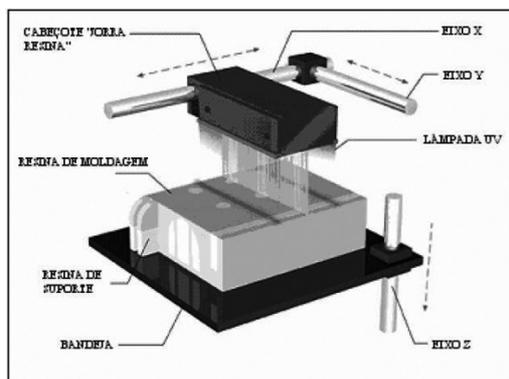


Figura 1. Esquema de funcionamento de impressão 3D da EDEN 250.

Vantagens:

- Qualidade elevada: camadas com 0.016 mm de espessura asseguram modelos lisos e altamente detalhados;
- Altamente exatos: as propriedades das resinas permitem paredes e detalhes finos com aproximadamente 0.6mm dependendo da geometria do modelo;
- Limpo: fácil remoção do suporte, apenas com uso de água;
- Rápido: não requer de processo de pós-cura;
- Versátil: a variedade de resinas permite modelos com propriedades e cores diferenciadas.
- É possível uma produção de várias peças ao mesmo tempo diminuindo o custo e o tempo de produção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Estudo Qualitativo

Para a realização dos estudos sobre a qualidade de peças miniaturizadas fabricadas por impressão 3D foi inicialmente projetada em sistema CAD uma peça (112 x 60 x 3 mm) como mostra a Fig. (2). Esta peça apresenta furos passantes com formas geométricas variadas (quadrado, círculo, triângulo equilátero e estrela de quatro pontas). Os furos foram feitos apresentando dimensões (arestas do quadrado, diâmetro do círculo, arestas do triângulo e altura e largura da estrela) variando de 500 μ m até 10 mm. Na fabricação das peças foi utilizada uma impressora 3D EDEN 250 e a resina FullCure® 720, a qual consiste em uma resina a base de epóxi e acrílico, fornecida pela própria fabricante do equipamento (Objet).

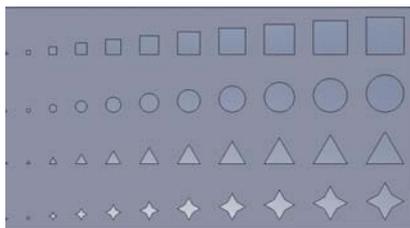


Figura 2. Desenho do modelo, gerado em SolidWorks®.

A análise qualitativa da qualidade das geometrias inseridas na peça foi realizada por avaliação de imagens obtidas por microscopia ótica em um microscópio Leica DMLM.

3.2. Estudo Quantitativo

Após análise das condições citadas acima foi decidido prosseguir um estudo detalhado para análise da precisão e/ou exatidão de protótipos impressos nos formatos circular, com 1,5 mm de diâmetro, e quadrangular, com laterais de 1,5 mm. Levando em consideração que os furos quadrangulares de 1 mm não possuem formato razoável para realização dos estudos, a escolha do valor de 1,5 mm para as dimensões a serem estudadas se deve ao fato de que as mesmas possibilitam um campo de visão total de amostras devido ao mínimo aumento possível do equipamento.

As geometrias na forma de triângulo e de estrela foram descartadas devido à má construção de suas respectivas formas, resultando em um considerável empecilho para realização das medições.

Para o estudo foram construídos quatro corpos de prova com dimensões de 48 x 25,5 x 3 mm cada um com 25 furos passantes no formato circular e 25 no quadrangular, e quatro corpos de prova com dimensões de 74 x 36,5 x 4,5 mm com 25 pinos de cada formato (circular e quadrangular), totalizando 100 amostras de cada (furos circulares, furos quadrangulares, pinos circulares e pinos quadrangulares), como mostra a Fig. (3). Os corpos de prova têm 3 mm de espessura no caso dos furos e 3 mm de altura no caso dos pinos.

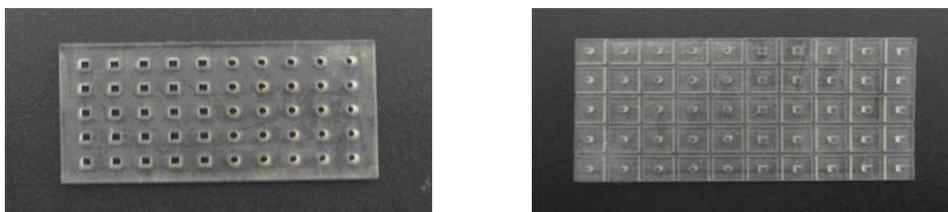


Figura 3. Imagens obtidas com câmera digital dos corpos de prova: (a) Corpo de prova com furos. (b) Corpo de prova com pinos.

As medidas dos pinos foram todas realizadas com um micrometro Mitutoyo Digimatic modelo MDC-25PJ. Os furos passantes foram dimensionados a partir de imagens geradas em um MO Leica – DMLM com aumento de 5x e analisadas no software de imagens Adobe Photoshop CS3. Nos furos e pinos circulares foram realizadas quatro medidas do diâmetro feitas de 45 em 45°. Nos furos e pinos quadrangulares foram feitas duas medidas de laterais e uma de cada diagonal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Estudo Qualitativo

Na fabricação de furos com dimensões de 0,5 mm a impressora 3D apresentou dificuldades para construir as geometrias projetadas no modelo CAD. O equipamento não fabrica os furos com os formatos triangular e estrelado na dimensão de 0,5 mm. Apenas os furos na forma de círculo e o quadrado foram impressos. Porém o furo com formato de quadrado, não foi impresso de forma satisfatória, tendo o formato aproximado de um círculo.

Os furos com geometria circular, quadrada, triangular e de estrela com dimensões de 1 mm foram impressos, porem todos apresentaram aspecto de uma geometria circular/oval. Os furos com dimensões de 2 mm apresentam aspecto das geometrias projetadas no modelo CAD.

A Figura (5) apresentada as imagens de furos com dimensões de 1 e 2 mm nas dimensões quadrangular e triangular.

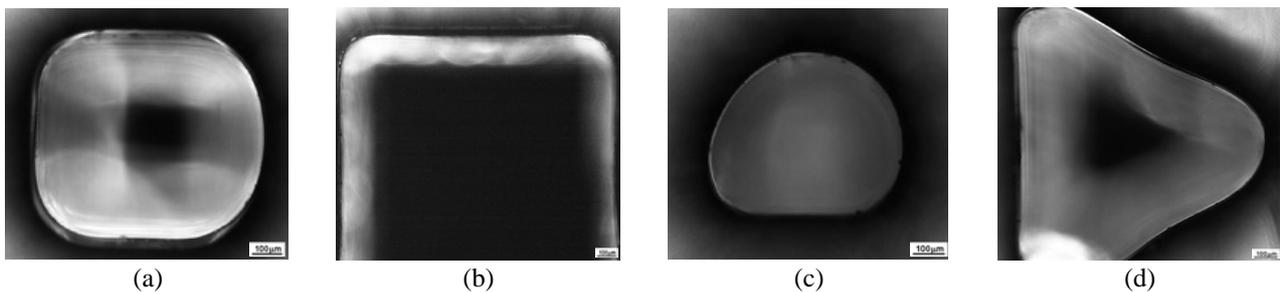


Figura 4. Imagens obtidas por microscopia ótica dos furos: (a) Quadrado com 1 mm. (b) Quadrado com 2 mm. (c) Triângulo com 1 mm. (d) Triângulo com 2 mm.

A Figura (6) mostra as imagens de furos com dimensões de 10 mm. Nas formas que apresentam cantos (quadrado, triângulo e estrela de quatro pontas) o encontro das arestas mostra significativo arredondamento mesmo nos furos com dimensões de 10 mm.

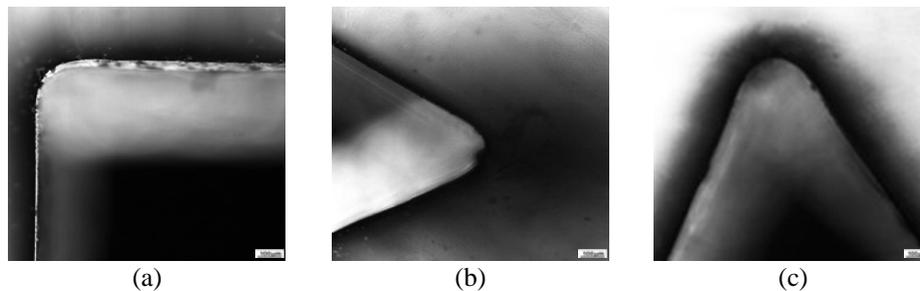


Figura 5. Imagens obtidas por microscopia ótica dos furos: (a) Quadrado com 10 mm. (b) Triângulo com 10 mm. (c) Estrela com 10 mm.

4.2. Estudo Quantitativo

As duas geometrias feitas por impressão 3D tiveram comportamento semelhante quanto a precisão e exatidão conforme é mostrado nas Tab. (1) e (2). Como falado anteriormente as dimensões foram projetados para terem 1,5 mm. De acordo com a medida da lateral a diagonal teórica do quadrado seria de 2,121 mm.

No caso dos furos, de acordo com a Tab. (1), as médias circulares ficaram fora do projeto cerca de 0,2 a 1,13 % abaixo do valor real. As médias das laterais variaram de 1,5 a 1,8 % acima do valor da dimensão do projeto e as médias das diagonais variaram 8,5 a 9,8 % abaixo do valor esperado.

Tabela 1. Resultados das Medições dos Furos Passantes.

Furos Passantes		Circular		
		Diâmetro	Lateral	Diagonal
Corpo de Prova 1	Média (mm)	1,483	1,524	1,939
	Desvio Padrão	0,012383	0,032195	0,024277
Corpo de Prova 2	Média (mm)	1,495	1,522	1,927
	Desvio Padrão	0,016123	0,020444	0,017414
Corpo de Prova 3	Média (mm)	1,488	1,523	1,915
	Desvio Padrão	0,028583	0,021456	0,018909
Corpo de Prova 4	Média (mm)	1,497	1,527	1,913
	Desvio Padrão	0,013390	0,023041	0,016946

No caso dos pinos, como mostra a Tab. (2), os pinos circulares variam da medida do projeto de 0,86 a 1,53 % acima do valor. As laterais divergiram de 3,46 a 4,13 % a acima do valor projetado, e as diagonais variaram de 6,6 % abaixo do a valor à 5,23 % acima.

A variação das medidas das diagonais se deve ao fato de as amostras impressas no formato quadrangular sempre apresentarem os cantos arredondados como mostrado na sessão 3.2, por isso ocorre uma perda mais acentuada no valor da medida comparado com a dimensão real do projeto.

Tabela 2. Resultados das Medições dos Pinos.

Pinos		Circular		
		Diâmetro	Lateral	Diagonal
Corpo de Prova 1	Média (mm)	1,513	1,562	2,001
	Desvio Padrão	0,017202	0,030316	0,034433
Corpo de Prova 2	Média (mm)	1,518	1,552	2,010
	Desvio Padrão	0,022647	0,036751	0,036498
Corpo de Prova 3	Média (mm)	1,519	1,554	1,981
	Desvio Padrão	0,021990	0,036026	0,152309
Corpo de Prova 4	Média (mm)	1,523	1,562	2,010
	Desvio Padrão	0,022723	0,035619	0,063927

5. CONCLUSÕES

Observando os estudos qualitativos percebemos que a EDEN 250 imprime satisfatoriamente peças pequenas principalmente com formatos arredondados. Peças que possuem cantos “vivos” deixam a desejar no que diz respeito à precisão e exatidão dos cantos.

Mesmo em peças maiores, com 100 mm, por exemplo, a resolução dos cantos não é satisfatória. A resina de impressão FullCure® 720 é uma boa resina de trabalho, porém possui alta absorção de umidade e é sensível ao calor.

Se classificarmos as amostras de acordo com a norma NBR 6158, podemos incluí-las como peças precisas classificando-a como IT11 (tolerância máxima de $\pm 0,06$ mm).

De acordo com os experimentos os quatro corpos de prova com furos passantes, tanto no caso circular quanto no caso quadrangular, tiveram variações dimensionais abaixo da tolerância permitida, o que demonstrando uma ótima confiabilidade no processo de impressão.

Nos experimentos utilizando corpos de prova com pinos, tanto quadrangulares quanto circulares, a maioria das amostras teve variações dimensionais abaixo do máximo permitido. Apenas nos corpos de prova 1 (um) e 4 (quatro) dos pinos quadrangulares os valores excederam a tolerância permitida em 0,002 mm. O que mostra que a confiabilidade da impressão de pinos quadrangulares é de apenas 50 %.

No caso das diagonais das amostras quadrangulares, para os furos e os pinos, todas ficaram excessivamente acima da tolerância máxima permitida chegando até a 9,8 % a menos do tamanho nominal, isso se deve ao fato mencionado acima sobre o arredondamento dos cantos “vivos”.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho e agradecem FAPESC, CAPES, CNPq e FINEP pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Batalha, G.; Cerveira, R.; Silva, F.; “Simulação de processos de microfabricação: influencia efeito de escala” http://www.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF_041011365.pdf. Acesso em 15/12/2008.
- Brown, R. L. E. “Design and manufacture of plastic parts” New york: Wiley Interscience, 1980. 203 p.
- Frazier, B.; Friedrich, C.; Warrington, R. O.; “The Miniaturization Technologies: Past, Present, and Future”, 1994, pp 1460 – 1465.
- Heckele, M.; Schomburg, W. K. “Review on micro molding of thermoplastic polymers” Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, pp. R1-R14.
- Jacobs, P.F., Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 1992.
- Jacobs, P. F.; “Stereolithography and other RP&M Technologies”. Society of Manufacture Engineers, 1996, ASME PRESS, New York – USA.
- Nexus Market Analysis for MEMS and Microsystems III 2005 – 2009. 4M Network of Excellence: An instrument for integration of European Research in Multi-Material Micro Manufacture.
- Objet. Disponível em: <http://www.2objet.com>. Acesso em 25/04/2008.
- Piotter, V.; Mueller, K.; Plewa, K.; Ruprecht, R.; Hausset, J. “Performance and simulation of thermoplastic micro injection molding”, Microsystem Technologies, 2004, pp. 387-390.
- Salmoria, G.V.; Cardenuto, M. R.; Ahrens, C. H. “Prototipagem rápida por impressão 3D com resinas fotocuráveis: uma análise sobre as tecnologias disponíveis no mercado nacional”, CBPOL, 2007. Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros.
- Salmoria, G. V.; Ahrens, Carlos Henrique; Lafratta, Fernando; Biava, Matheus Maragno; Ferreira, Pedro Zanetti. “Rapid Manufacturing and Rapid Tooling of Polymer Micro Parts Using Stereolithography”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Brasil, 2008.
- Zhou, J. G.; Herscovici, D.; Chen, C. C. “Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts” International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, pp. 363 – 379.