

ESTUDOS DE PARÂMETROS DA TECNOLOGIA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA FDM PARA MELHORIAS NO PLANEJAMENTO DE PROCESSO

José Aguiomar Foggiatto, foggiatto@utfpr.edu.br
Neri Volpato, nvolpato@utfpr.edu.br
Marcos Vinicius Alves de Lima, marcosval@gmail.com
Gustavo von Zeska de França, gvzfranca@yahoo.com.br
Philip D'Estefani, pestefani@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)/Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica e de Materiais (PPGEM)/Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC)/Núcleo de Prototipagem e Ferramental Rápido (NUFER). Av. 7 de Setembro, 3165, Curitiba – PR

Resumo: As tecnologias de Prototipagem Rápida utilizam programas de planejamento de processo próprios que não permitem explorar todas as possibilidades para a construção dos modelos. No caso do processo FDM (Fused Deposition Modeling), alguns parâmetros são pré-estabelecidos, o que, em algumas situações, impede a inserção de valores mais adequados. Esta limitação motivou o desenvolvimento de um sistema de planejamento de processo denominado de RP³ (Rapid Prototyping Process Planning), pelo NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental Rápido), na UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). O objetivo deste trabalho é apresentar dois estudos com o equipamento FDM 2000 visando melhorias no módulo FDM do sistema RP³. O primeiro estudo investigou a contração do material no eixo Z e visando um algoritmo de correção dos erros nesta direção. No segundo estudo, foi feita uma análise da velocidade de trabalho do cabeçote extrusor do equipamento, com base em alterações de parâmetros de deposição, visando a implementação de um algoritmo estimador de tempo de fabricação. A metodologia utilizada nos estudos pode ser empregada para outros modelos de equipamentos FDM.

Palavras-chave: prototipagem rápida, planejamento de processo, precisão dimensional, tempo de fabricação

1. INTRODUÇÃO

O termo Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP) designa uma série de processos de fabricação que têm como princípio a deposição de sucessivas camadas planas de material. Sua utilização está se tornando crescente, tendo em vista que possibilita fabricar modelos físicos com geometrias complexas em tempos muito menores do que pelos processos tradicionais.

Dentre as várias tecnologias de RP, uma das mais utilizadas é a Modelagem por Fusão e Deposição (*Modeling Fused Deposition* - FDM). Esta consiste na deposição de material polimérico (ABS, PC, PPSF, entre outros), em estado semilíquido pelo bico extrusor de um cabeçote da máquina, com movimentação livre no plano XY. Depois que uma camada é extrudada, a plataforma sobre a qual está sendo fabricado o protótipo se desloca no eixo Z, de modo que a próxima camada seja extrudada sobre a anterior, e assim sucessivamente (Volpato, 2007). A Fig. (1) mostra o princípio de fabricação da tecnologia RP.

A partir dos modelos geométricos 3D obtidos em programas CAD (*Computer Aided Design*), é gerado um arquivo no formato STL, que servirá de entrada para o processo de RP. O modelo STL é fatiado ao longo do eixo Z e cada fatia é formada por um ou mais contornos fechados (*polylines*), que originarão as trajetórias descritas pelo bico extrusor, dando o formato da geometria desejada. Se o modelo possuir regiões suspensas, é necessária a deposição de suportes para sustentá-las (Fig. (2)). O suporte também é utilizado no início da manufatura para garantir a planicidade das primeiras camadas do protótipo. Na etapa de pós-processamento é feita a retirada destes suportes.

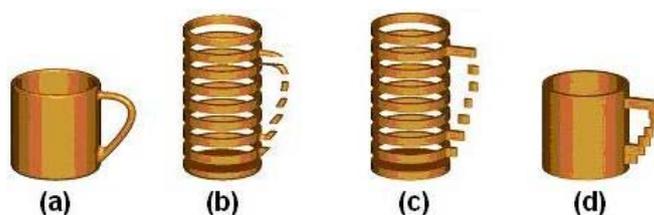


Figura 1. Princípio da fabricação por camada da Prototipagem Rápida: (a) modelo 3D, (b) “fatiamento”, (c) adição das camadas e (d) protótipo físico final.

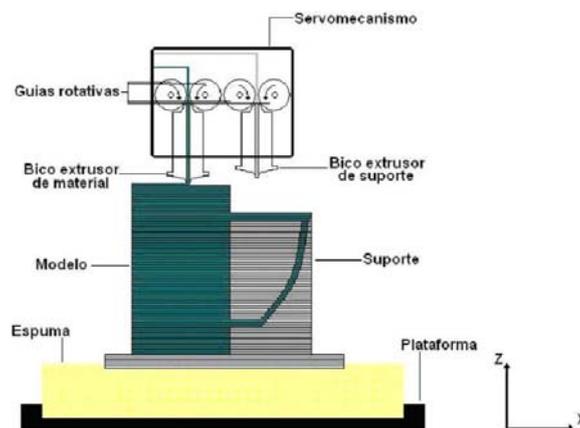


Figura 2. Esquema de funcionamento da tecnologia FDM.

A máquina de prototipagem recebe as informações para construir um modelo a partir de um programa de planejamento de processo, o qual calcula as estruturas de suporte e as trajetórias a serem percorridas depositando material.

A exigência de qualidade dos protótipos vem aumentando cada vez mais, já que estes, em alguns casos, também podem ser utilizados como produtos finais. Sendo assim, existe uma crescente preocupação na obtenção de peças com mesmo nível de qualidade e precisão dimensional de produção em série, na chamada manufatura rápida. Outra aplicação é no desenvolvimento de moldes-protótipo, tratada em Foggiatto (2005), conhecida como Ferramental Rápido (FR). Os moldes-protótipo permitem gerar uma pequena quantidade de peças com o mesmo material e processo em que será produzida. É de fundamental importância para a produção do molde-protótipo que se tenha uma precisão dimensional próxima a do processo tradicionais de confecção de moldes. De acordo com Lima *et al.* (2005), o conhecimento da precisão dimensional nas principais direções de fabricação (X, Y e Z), torna-se importante para a obtenção de um componente com qualidade dimensional.

O tempo de fabricação é também considerado um fator importante no processo de RP, pois o mesmo, está diretamente associado com o custo do protótipo. Segundo Han *et al.* (2003), as tecnologias RP são utilizadas para reduzir o custo de fabricação e de projeto, mas o processo pode ser longo devido a complexidade da peça. Isto é particularmente relevante para o processo FDM, que é considerado um dos mais lentos, devido possuir um único bico para preencher toda a área das camadas da peça. O tempo de manufatura é dependente da velocidade de trabalho do cabeçote. Atualmente, é utilizado o estimador de tempo do programa proprietário da tecnologia FDM, o *Insight V3.3*, da *Stratays*, mas, de acordo com a experiência do NUFER, este apresenta erros percentuais variáveis, que são mais expressivos quando as dimensões do modelo são maiores.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo determinar o fator de contração do material utilizado na tecnologia FDM 2000 no eixo Z e também estudar as variações da velocidade de trabalho do seu cabeçote, visando definir um algoritmo estimador de tempo. Os resultados destes estudos serão implementados no programa de planejamento de processo denominado RP³ (*Rapid Prototyping Process Planning*), em desenvolvimento no Núcleo de Prototipagem e Ferramental Rápido (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) (Souza *et al.* 2004). O RP³ visa aumentar a flexibilidade no planejamento de processo da tecnologia FDM, quando comparado ao permitido pelo programa proprietário da *Stratays*, e atuar também em outras tecnologias de RP.

2. ESTUDO DO FATOR DE CONTRAÇÃO NA DIREÇÃO DE ADIÇÃO DAS CAMADAS

O coeficiente de contração do material da peça é caracterizado como uma variação dimensional diretamente proporcional ao valor da dimensão e a variação da temperatura do mesmo. Alguns estudos anteriores abordaram a análise dimensional de protótipos e direcionaram esforços na análise do comportamento quanto a contração. No estudo realizado por Volpato *et al.* (2004) foi verificado a tolerância dimensional linear nas direções de fabricação no processo

de RP. Neste foi proposta uma geometria com dimensões máximas de 40 mm nas direções X, Y e Z, encontrando-se como resultados uma variação dimensional negativa de aproximadamente 0,18mm para as direções X e Y, e positiva, de aproximadamente 0,25mm, na direção Z. No entanto, de forma estranha, observa-se que o valor padrão do fator de contração no eixo Z aplicado pelo programa *Insight V3.3* é de 0% na direção do eixo Z, ou seja, um fator de 1,0000. Este sistema não permitindo a indicação de um valor menor que 1, somente acima deste.

No estudo realizado por Lima *et al.* (2005), foi analisada a contração para as direções X e Y, objetivando a verificação do fator de contração aplicado pelo programa proprietário da máquina FDM 2000. Os resultados demonstraram que os valores de contração utilizados pelo programa proprietário (1,007 para as duas direções) são um pouco diferentes dos valores encontrados experimentalmente (1,00827 na direção X e 1,00847 na direção Y).

Analisando-se o erro dimensional em peças obtidas por RP, pode-se considerar três formas principais de erro. O erro devido à contração do modelo, o erro devido ao fatiamento, e o erro do processo que pode ser caracterizado como um erro aleatório. O erro devido ao fatiamento ocorre quando uma região da peça fica posicionada entre duas fatias, sendo então suprimida. Este erro pode chegar até o valor de aproximadamente uma espessura de camada. Este erro pode ser tratado com fatiamento adaptativo e tratamento de picos (Sabourin *et al.* 1996). Para a análise de contração no eixo Z, pode-se retirar a parcela do erro de fatiamento simplesmente definindo-se uma dimensão do componente em Z que seja um múltiplo da espessura de camada utilizada. O erro aleatório não se tem controle, pois é dependente de uma série de componentes do sistema. A seguir são apresentados os estudos realizados para se analisar a contração do material no eixo Z.

2.1 Metodologia

Para o estudo do fator de contração na direção de fabricação Z, foram definidas algumas geometrias mais adequadas ao processo de medição, conforme mostradas na Fig. (3). Estas foram modeladas no sistema de CAD-3D SolidEdge. Com o objetivo de retirar do processo o erro de fatiamento, as alturas das colunas das peças foram definidas pelo múltiplo da espessura a ser utilizada (0,254 neste caso). A geometria 1, tem altura total de 394 camadas (100,076mm), possuindo um total de 20 colunas, cada qual com valores de alturas diferentes (variação entre as colunas de aproximadamente 5mm). Como em estudos dimensionais anteriores houve um resultado na direção Z diferente das direções em X e Y, especialmente para as dimensões pequenas, resolveu-se analisar em detalhes o comportamento dimensional nesta faixa de até 10mm. Desta forma, outras duas geometrias foram testadas. A geometria 2 tem 40 camadas (10,160mm) e variação entre colunas de 5 camadas, portanto possuindo 8 colunas. A geometria 3 tem um total de 10 camadas (2,540mm) e variação de 2 camadas, num total de 5 colunas.

Por último foi desenvolvida uma geometria para a comparação entre o coeficiente adotado atualmente pelo *Insight* e o obtido experimentalmente, denominada geometria 4. Diferentemente das outras, esta têm valores de altura não múltiplos dos valores da altura de camadas. Para comparar a situação atual do sistema *Insight* e uma geometria escalada, esta geometria teve que ser fabricada de duas formas distintas. A primeira da maneira original e a segunda foi remodelada no sistema CAD de forma que as alturas originais foram alteradas para as alturas escaladas. Foi garantido que as alturas de colunas escaladas tivessem o número de camadas calculadas. Esta solução foi adotada, pois não houve tempo hábil de implementar o fator de contração no sistema RP³.

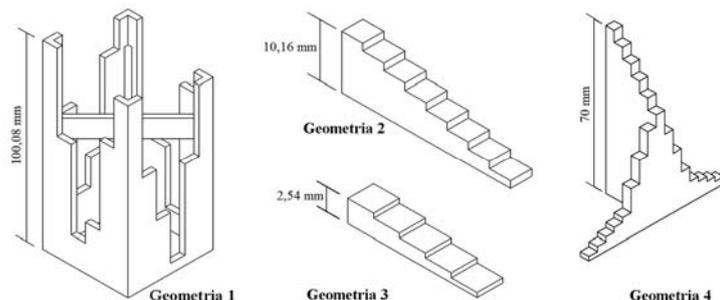


Figura 3. Geometrias utilizadas no estudo.

Todos os protótipos foram fabricados em uma máquina FDM 2000 (*Stratasys Inc.*) em ABS P-400, com parâmetros padrão (*default*), ou seja, com altura da camada de 0,254mm e largura do filamento (*raster*) de 0,505mm. Como mencionado anteriormente, o valor padrão do fator de contração no eixo Z do *Insight V3.3* é de 1,0 na direção do eixo Z.

Foram fabricados dois protótipos da geometria 1 e nestes foram realizadas cinco medições de cada coluna com um paquímetro digital de resolução 0,01mm da *Mitutoyo*. Foram fabricados cinco modelos das geometrias 2 e 3, para cada modelo foram realizadas 5 medições de cada coluna.

Para a determinação do coeficiente de contração os erros foram obtidos pela diferença entre a média do valor real medido e o nominal. As médias dos erros de cada altura de coluna foram plotadas em um gráfico e uma reta foi ajustada a estes pontos, obtendo-se a forma da Eq. (1).

$$E = A * h + B \tag{1}$$

onde A e B são constantes a serem determinadas, E é o erro total e h é a altura do protótipo (colunas). Desta equação da reta, o valor do fator de contração (C) é obtido através a Eq. (2).

$$C = 1/(1+A) \tag{2}$$

Os pontos médios dos erros para as geometrias 1, 2 e 3 foram plotados e as respectivas retas foram ajustadas. Obteve-se assim um comportamento no eixo de fabricação Z mais refinado para as pequenas dimensões (até ~10mm) e um mais geral, acima desta. A Fig. (4), na seção de resultados, mostra estes dois gráficos.

Uma vez obtido o coeficiente de contração, a geometria 4 foi fabricada das duas formas descritas anteriormente. Foram fabricados dois protótipos desta geometria e foram realizadas 3 medições de cada altura de coluna.

2.2 Resultados e Discussões

A Tab. (1) fornece os resultados das medições para cada altura de coluna da geometria 1 e os respectivos erros. Cabe lembrar que este erro desconsidera a parcela referente ao fatiamento. A Fig. (4) mostra os gráficos dos erros em função da altura nominal e as respectivas retas ajustadas. Como pode ser observado, foi possível encontrar fatores distintos para as duas faixas, ou seja, o fator de contração C_1 para as dimensões menores (faixa de 0-10,0mm), que ficou em 0,9902, e o C_2 , que ficou em 1,0032 para as demais alturas. O resultado de C_1 sugere que estaria havendo um comportamento de dilatação em dimensões menores, o que é fisicamente impossível. É provável que o equipamento apresente alguma anomalia nesta faixa. Mesmo assim, para efeito de comparação com o erro obtido pelo sistema atual foram adotados estes dois coeficientes para se obter a geometria 4 remodelada.

Tabela 1. Resultados obtidos para a Geometria 1.

Coluna	Valor Nominal (mm)	Média (mm)	Erro (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coluna	Valor Nominal (mm)	Média (mm)	Erro (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	5,08	5,26	0,18	0,0216	11	55,12	55,32	0,20	0,0189
2	10,16	10,51	0,34	0,0443	12	60,20	60,28	0,08	0,0222
3	14,99	15,26	0,27	0,0183	13	65,02	65,17	0,15	0,0412
4	20,06	20,35	0,29	0,0294	14	70,10	70,20	0,10	0,0374
5	25,15	25,37	0,22	0,0250	15	74,93	75,06	0,13	0,0206
6	29,97	30,25	0,28	0,0427	16	80,01	80,15	0,14	0,0330
7	35,05	35,28	0,23	0,0330	17	85,09	85,15	0,06	0,0222
8	40,13	40,38	0,25	0,0483	18	90,17	90,11	-0,06	0,0480
9	44,96	45,18	0,22	0,0510	19	94,99	95,00	0,01	0,0377
10	50,04	50,21	0,17	0,0150	20	100,08	100,11	0,03	0,0216

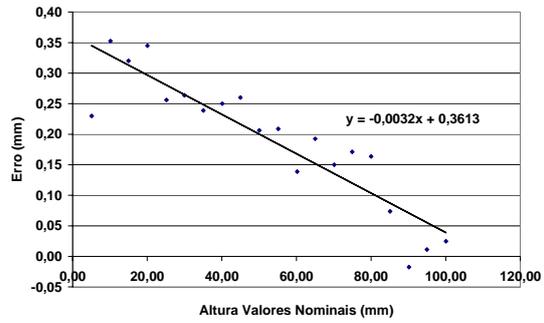
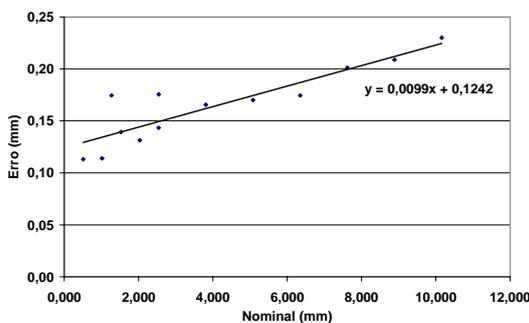


Figura 4. Resultados dos erros (a) das geometrias 2 e 3 e (b) da geometria 1.

A Tab (2) apresenta os resultados da geometria 4 processada das duas formas (original e remodelada). Nesta tabela, a coluna referente ao erro de fatiamento corresponde a diferença entre a altura da camada resultante do fatiamento e o valor da altura de coluna escalada (nominal aplicado-se a escala correspondente). O erro total se refere a diferença entre o valor medido e o nominal. Já o erro denominado de dimensional, é o erro total menos a parcela de erro referente ao fatiamento. A Fig. (5) apresenta os gráficos dos erros totais para as duas peças.

Dois pontos chamam a atenção em relação aos resultados da geometria 4 original. Primeiro, apesar do *Insight* informar ao usuário que o fator de contração no eixo Z utilizado é 1,0000, os resultados da Fig. (5a) não demonstram uma inclinação típica de uma peça que sofreu contração (ver Fig. 4b). Isto leva a crer que apesar de não informar, o sistema está compensando a contração internamente. O outro ponto que chama a atenção é o fato do erro de fatiamento do *Insight* para a geometria 4 original não apresentar somente valores negativos, como esperado e também observado no caso da geometria 4 remodelada (Tab. 2). Este erro oscila entre positivo e negativo. Isto implica que o *Insight* está aplicando algum tipo de correção interna, também não transparente ao usuário.

Comparando-se os erros totais das duas geometrias, pode-se observar que a faixa de variação dimensional para a peça original está em torno de 0,25mm (Fig. 5a), ou seja, uma espessura de camada. No entanto esta está localizada sempre no campo positivo do erro. Então, assumindo que o *Insight* corrige a contração do material, o erro da Fig. (5a) representa, em grande parte, um erro sistemático do processo. Já para a peça remodelada, esta faixa foi um pouco menor, mas se localizando mais próxima do valor de erro zero. Isto significa que a contração aplicada na peça remodelada corrigiu o fator contração do material e parece ter alterado um pouco do erro sistemático. Não há uma explicação para esta redução, uma vez que a alteração da geometria somente visava a compensação da contração do material.

Tabela 2. Valores de erro encontrados na geometria 4 remodelada e original.

Valor Nominal (mm)	Medição (mm)		Erro Fatiamento (mm)		Erro Dimensional (mm)		Erro Total (mm)	
	Remodelada	Original	Remodelada	Original	Remodelada	Original	Remodelada	Original
1,00	0,97	1,21	-0,228	0,016	0,20	0,20	-0,03	0,21
2,00	1,98	2,17	-0,202	0,032	0,18	0,13	-0,02	0,17
3,00	2,99	3,25	-0,177	0,048	0,16	0,20	-0,01	0,25
4,00	3,99	4,17	-0,151	0,064	0,14	0,10	-0,01	0,17
5,00	5,01	5,22	-0,125	0,080	0,14	0,14	0,01	0,22
6,00	6,02	6,27	-0,099	0,096	0,12	0,17	0,02	0,27
7,00	7,03	7,07	-0,073	-0,142	0,11	0,22	0,03	0,07
8,00	8,07	8,09	-0,048	-0,126	0,11	0,22	0,07	0,09
9,00	9,08	9,07	-0,022	-0,110	0,10	0,18	0,08	0,07
10,00	9,91	10,17	-0,250	-0,094	0,16	0,26	-0,09	0,17
15,00	14,97	15,19	-0,062	-0,014	0,03	0,21	-0,03	0,19
20,00	20,01	20,31	-0,252	0,066	0,27	0,24	0,01	0,31
25,00	25,11	25,09	-0,188	-0,108	0,30	0,20	0,11	0,09
30,00	29,96	30,19	-0,124	-0,028	0,08	0,21	-0,04	0,19
35,00	35,05	35,26	-0,060	0,052	0,11	0,21	0,05	0,26
40,00	40,08	40,07	-0,250	-0,122	0,33	0,19	0,08	0,07
45,00	45,15	45,25	-0,186	-0,042	0,33	0,29	0,15	0,25
50,00	50,00	50,29	-0,122	0,038	0,12	0,25	0,00	0,29
55,00	55,09	55,09	-0,058	-0,136	0,14	0,23	0,09	0,09
60,00	60,13	60,23	-0,248	-0,056	0,37	0,28	0,13	0,23
65,00	65,11	65,25	-0,184	0,024	0,29	0,23	0,11	0,25
70,00	69,97	70,25	-0,120	0,104	0,09	0,15	-0,03	0,25

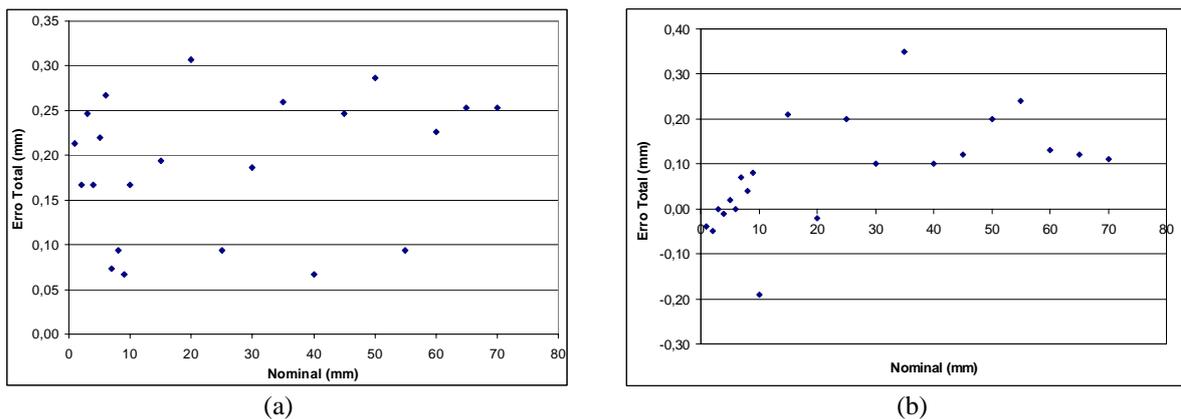


Figura 5. Erro total na geometria 4 (a) original e (b) remodelada (aplicando a escala experimental).

3. ESTUDO DA VELOCIDADE DE TRABALHO DO CABEÇOTE

A manufatura de cada camada na tecnologia FDM é feita em duas etapas: primeiro é depositado o material do contorno, formado pelos perímetros internos e externos da geometria desejada. Depois ocorre o preenchimento das áreas interiores a estes perímetros através de várias linhas paralelas, numa trajetória denominada de *raster*. As linhas de *raster* possuem uma pequena conexão em suas extremidades que são chamadas de ligações. A Fig. (6) mostra a terminologia adotada neste trabalho. O filamento que irá preencher a camada é caracterizado por alguns parâmetros inter-relacionados, que influenciam a qualidade do protótipo e o tempo total de fabricação, sendo que alguns são

controlados pelo usuário da máquina. Por exemplo, quanto maior a largura do filamento que fará o preenchimento da camada, menor o tempo de deposição. Para determinar a largura do filamento em questão são levados em consideração a velocidade do cabeçote, a velocidade de extrusão do bico, a curvatura da trajetória e o tamanho do bico.

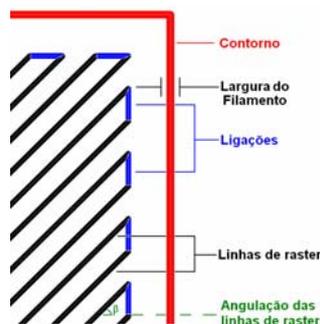


Figura 6. Terminologia adotada no estudo.

Segundo Han *et al.* (2002), a velocidade de trabalho do cabeçote cai durante a extrusão das ligações, e também, quanto mais agudo o ângulo formado entre a linha de *raster* e a ligação, maior será a queda de velocidade. Portanto, a cada ligação ocorre uma queda de velocidade que se refletirá no aumento de tempo de manufatura. O ângulo entre as linhas de *raster* e suas ligações é de difícil determinação, pois a sua orientação depende da geometria da camada e do ângulo das linhas de *raster* em relação ao eixo X, como se pode observar na Fig. (7). A largura do filamento também interfere na atividade do cabeçote, e é determinada pela combinação da velocidade de extrusão do filamento e a velocidade de trabalho do cabeçote. Quanto maior for a velocidade de extrusão, maior será o volume de material extrudado a cada unidade de comprimento percorrida pelo cabeçote, de modo que o filamento tende a se alargar.

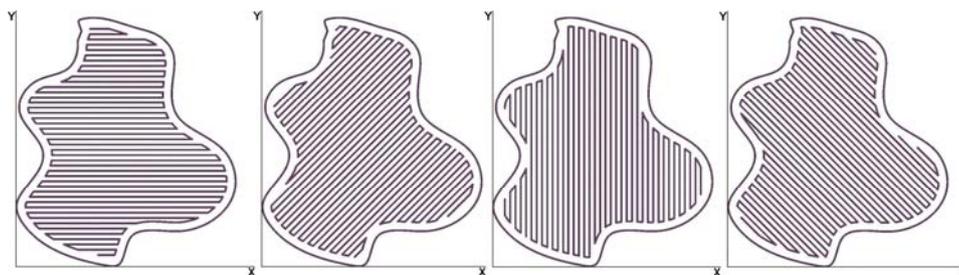


Figura 7. Variação dos comprimentos e das orientações das ligações conforme a geometria do contorno e o ângulo das linhas de *raster* em relação ao eixo X.

Além do ângulo das linhas de *raster* em relação ao eixo X e da largura do filamento, cada comprimento das várias partes que compõem a trajetória a ser extrudada influencia a velocidade de trabalho. Estes comprimentos não são um parâmetro de deposição, pois assim como as ligações, esses são consequência do ângulo das linhas de *raster* e da geometria da peça. O objetivo deste estudo é identificar as velocidades médias do cabeçote de deposição do equipamento FDM 2000 (inicialmente do material da peça ABS P-400) para o perímetro e *raster*. Quando encontradas estas velocidades de trabalho, estas irão compor o algoritmo estimador de tempo de fabricação da tecnologia FDM, a ser implementado no sistema RP³. Assim, será possível testar o algoritmo e comparar os resultados obtidos com o tempo real medido e os resultados do estimador de tempo disponível no programa proprietário.

3.1 Metodologia

Para a determinação das velocidades foi necessário realizar o estudo em duas etapas, a primeira para determinar a velocidade média durante a deposição de linhas de *raster* e a segunda etapa para determinar a velocidade média do cabeçote ao extrudar as ligações. Para tanto, foram propostas algumas peças de geometria simples, onde conhecendo-se as distâncias percorridas pelo cabeçote poderia-se medir os intervalos de tempo transcorridos a cada deposição.

Para o estudo puramente das linhas de *raster*, foram definidas uma peça chamadas de trilho, que, além do contorno, possui apenas uma linha de *raster* reta, portanto não havendo ligações (Fig. 8). Foram prototipadas 4 peças variando-se o ângulo de disposição em relação ao eixo X do equipamento, sendo este à 0°, 45°, 90°, 135°; e variando também as larguras do filamento para cada angulação: 0,305mm, 0,505mm e 0,705mm. Cada peça foi fabricada com 5 camadas de material e o tempo medido para cada camada. O tempo de deposição de cada linha de *raster* foi medido com um cronômetro (marca *Superatic*, resolução 0,1s) para cada camada e em seguida foi calculado o tempo médio. O comprimento percorrido pelo cabeçote extrusor, em cada linha de *raster*, é o mesmo para todas as camadas, e foi fornecido pelo programa *Insight*, arquivo SML (*Stratasys Modeling Language*). Com estes dados obteve-se a velocidade média do cabeçote ao depositar o *raster* pela aplicação da Eq. (3).



Figura 8. Trajetória da peça trilha à 0°.

$$Vel_{raster} = L_{raster} / T_{raster} \quad (3)$$

Onde Vel_{raster} , L_{raster} e T_{raster} são respectivamente a velocidade média do cabeçote ao depositar linha de raster (em mm/s), o comprimento da linha de raster e o tempo de deposição.

Para o estudo da velocidade média do cabeçote na deposição de ligações foi prototipada a peça lâmina, Fig. (9), também com 5 camadas e de geometria quadrada, com as mesmas configurações de preenchimento da peça trilha. Cada camada contém contorno, linhas de raster e ligações. O cálculo da velocidade média da deposição de ligações, $Vel_{ligações}$ (em mm/s), é análogo ao anterior e é dado pela Eq. (4).

$$Vel_{ligações} = L_{ligações} / T_{ligações} \quad (4)$$

O comprimento total de ligações ($L_{ligações}$) é a soma das distâncias das coordenadas correspondentes às ligações, fornecidas no arquivo SML. Contudo, o tempo transcorrido na deposição apenas das ligações, $T_{ligações}$, é medido de maneira indireta. Para isto, desconsiderando-se o tempo do contorno, toma-se o tempo para deposição da trajetória na camada (linhas de raster e ligações) e retira-se o tempo de raster (Eq. 5):

$$T_{ligações} = T_{trajetória} - T_{raster} \quad (5)$$

O tempo de deposição de toda a trajetória ($T_{trajetória}$) foi medido com um cronômetro e o tempo T_{raster} foi calculado pela Eq. (3). O comprimento total das linhas de raster (L_{raster}) é a soma das distâncias das coordenadas correspondentes às linhas de raster, também retiradas do arquivo SML. Com os valores de $L_{ligações}$ e de $T_{ligações}$ é possível calcular a velocidade $Vel_{ligações}$ pela Eq. (4). Outra forma de efetuar este cálculo é pela Eq. (6), resultante das equações (3), (4) e (5):

$$Vel_{ligações} = L_{ligações} / (T_{trajetória} - (L_{raster} / Vel_{raster})) \quad (6)$$

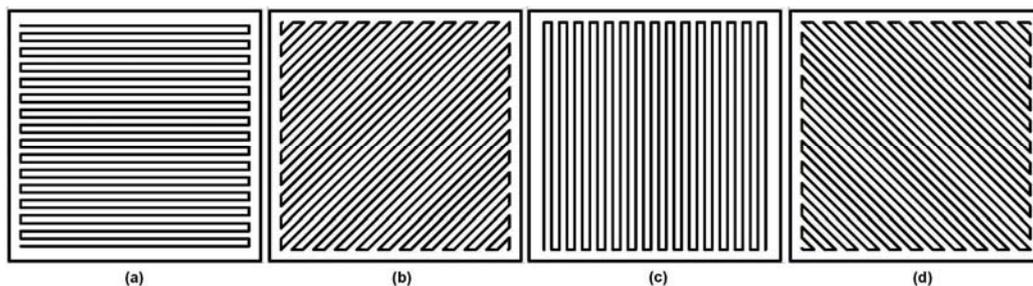


Figura 9. Peça Lâmina: (a) Linhas de raster a 0°, (b) a 45°, (c) a 90° e (d) a 135°.

Como o tempo decorrido para extrusão dos contornos não fez parte deste estudo e não pode ser negligenciado, foi adotada a velocidade média de linha de raster para o seu cálculo no algoritmo estimador de tempo.

Para compor o algoritmo estimador de tempo, é necessário também computar velocidades e tempos médios de outras funções desempenhadas pela máquina e pelo cabeçote, tais como: a escovação dos bicos extrusores, tarefas de purga de material antes de depositar as trajetórias, movimentos de reposicionamento do cabeçote (sem extrudar material) e movimentos de translação da plataforma de prototipagem ao longo do eixo Z. Estes tempos também foram medidos ao longo dos experimentos e foram considerados no algoritmo de cálculo do tempo implementado no sistema RP³.

3.2 Resultados e Discussões

A Tab. (3) fornece os resultados em relação as velocidades médias das linhas de *raster* obtidos com a peça trilho e das velocidades de ligações obtidos com a peça lâmina, para as diferentes larguras de filamento e ângulos de *raster*. Verificou-se que a velocidade de *raster* é praticamente constante para todos os parâmetros. No entanto, a velocidade média das ligações é sensível a estes dois parâmetros de deposição, além de ser consideravelmente menor que a velocidade de *raster*.

Tabela 3. Velocidades médias do cabeçote extrusor.

Parâmetros de Deposição		Peça Trilho		Peça Lâmina	
Largura do filamento (mm)	Ângulo da linha de raster	Velocidade média de linha de raster (mm/s)	Desvio padrão da velocidade de raster (mm/s)	Velocidade média de ligações (mm/s)	Desvio padrão da velocidade de ligações (mm/s)
0,305	0°	24,84	0,35	5,63	0,33
	45°	24,33	0,45	10,46	0,32
	90°	23,81	0,09	10,54	1,09
	135°	24,58	0,17	9,90	0,32
0,505	0°	24,41	0,16	8,70	0,32
	45°	24,23	0,19	12,83	0,49
	90°	24,17	0,2	10,43	0,53
	135°	24,3	0,25	12,44	0,51
0,705	0°	24,53	0,76	9,69	1,03
	45°	24,41	0,16	12,93	0,37
	90°	24,38	0,17	9,96	0,43
	135°	24,11	0,32	13,69	0,62

A diferença entre as velocidades das linhas de *raster* e das ligações pode estar associada a aceleração e desaceleração dos eixos do equipamento, bem como aos mecanismos de movimentação distintos na direções X e Y (número de polias e diferentes massas móveis). Como as ligações de *raster* têm comprimentos pequenos, pode não haver percurso suficiente para o cabeçote atingir sua velocidade máxima, resultando numa velocidade média de trabalho menor. Os gráficos (a) e (b) da Fig. (10) representam esquematicamente um possível comportamento da velocidade do cabeçote que pode estar ocorrendo ao extrudar uma linha de *raster* e uma ligação respectivamente (X corresponde ao comprimento da trajetória).

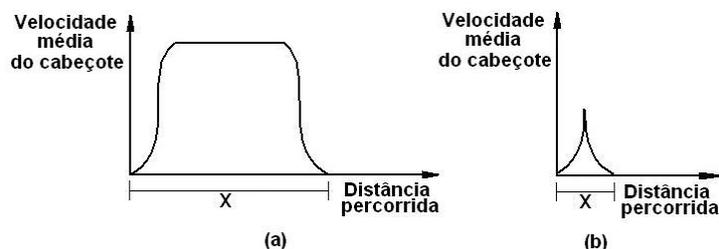


Figura 10. Comportamento da velocidade do cabeçote extrusor.

A variação entre as velocidades de ligações em função do ângulo das linhas de *raster* parece ser considerável na Tab. (3), mas, como a identificação da orientação de cada ligação depende da geometria da peça (Fig. 7), a sua consideração no cálculo do tempo tornar-se-ia bastante custosa computacionalmente. Desta forma, sugere-se uma simplificação para o algoritmo estimador de tempo através da utilização de um valor médio das velocidades obtidas para cada largura do filamento.

Utilizando-se os valores de velocidades de trabalho do cabeçote encontrados, foi desenvolvido e implementado no sistema RP³ um algoritmo para estimar o tempo de manufatura, considerando todas as funções desempenhadas pela máquina FDM 2000. Na seqüência foram feitas comparações entre os tempos estimados pelo sistema RP³, pelo programa *Insight V3.3* e o tempo real medido na máquina FDM. Foram utilizadas geometrias simples, 3 corpos cilíndricos (moedas) de tamanhos diferente (diâmetros de 25, 50 e 100mm), com os ângulos das linhas de *raster* utilizadas na metodologia desta pesquisa. Somente a largura do filamento de 0,705mm foi testada neste estudo. Os resultados estão na Tab. (4), e mostram que, a medida que o tamanho da peça aumenta, os erros percentuais do tempo calculado pelo sistema RP³ diminuem, se aproximando de zero, enquanto os erros percentuais do *Insight V3.3* aumentam.

Tabela 4. Erros percentuais obtidos nas estimativas de tempo.

Diâmetro (mm)	RP ³	Insight V3.3	RP ³	Insight V3.3	RP ³	Insight V3.3	RP ³	Insight V3.3
	<i>raster a 0°</i>		<i>raster a 45°</i>		<i>raster a 90°</i>		<i>raster a 135°</i>	
25	-4,52%	10,00%	-3,44%	10,63%	-4,69%	9,47%	-4,58%	9,86%
50	-3,71%	11,25%	-2,25%	11,54%	-7,69%	11,24%	-3,00%	11,80%
100	-1,67%	12,34%	-0,30%	12,32%	-3,49%	12,34%	-1,57%	12,10%

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou um entendimento mais aprofundado do comportamento da contração do material no processo FDM 2000 ao longo do eixo Z. Como demonstrado, foram encontrados de forma inesperada dois coeficientes diferentes para o material (faixa entre 0-10 e dimensões maiores), que devem estar refletindo algum comportamento anormal do processo para dimensões menores. Os estudos demonstram que o sistema *Insight* realiza algumas compensações internas, tanto da contração quanto do erro de fatiamento, que não estão transparente ao usuário. Este fato dificultou a análise dos resultados e uma possível busca de soluções para melhorar o erro dimensional do processo. Apesar da opção de testar os dois índice de contração ter alterado para melhor o perfil do erro do processo, não foi possível concluir sobre o efeito desta correção. O fato do algoritmo de compensação da contração do sistema RP³ não estar finalizado, impossibilitou a fabricação de uma geometria livre de qualquer tratamento desconhecido, como foi observado no caso do *Insight*, o que facilitaria a análise dos resultados. Os estudos continuarão assim que este algoritmo estiver implementado.

Como a velocidade de *raster* é pouco influenciada pelos parâmetros de deposição, o algoritmo estimador de tempo considerou a velocidade média de linhas de *raster* para todos os parâmetros citados neste estudo, determinada pela média dos doze valores encontrados, que é 24,34mm/s. No caso da velocidade de ligações, conforme mencionado, é mais aconselhável utilizar uma média para cada largura de filamento, pois a velocidade das ligações se mostrou sensível aos parâmetros de deposição. Os valores médios de velocidade de ligações para as larguras de 0,305; 0,505 e 0,705mm implementados no algoritmo estimador de tempo foram respectivamente 9,13; 11,10 e 11,57mm/s.

Embora as estimativas dos tempos de fabricação estimados com o sistema RP³ sejam sempre inferiores ao tempo medido na máquina, estes estão mais próximos deste tempo do que os tempos fornecidos pelo programa proprietário. Considerando que o algoritmo estimador de tempo é composto por várias parcelas de tempo, para se melhorar ainda mais o resultado do mesmo, um estudo posterior visando a ajustagem dos parâmetros pode ser realizado. No entanto, no estágio atual, o mesmo já pode ser utilizado na estimativa de tempo e em pesquisas futuras de otimização do processo da tecnologia FDM 2000. A metodologia utilizada para identificação das velocidades se mostrou adequada e pode ser utilizada para outros equipamentos da família FDM.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda equipe do NUFER (Chayene Souza, Daniel Coradini Schwarz, Davi Pereira Serafini e David Kretschek) e, em especial, ao pessoal de desenvolvimento do sistema RP³ (Felipe da Silva Ribeiro, Jean Filipe Kuhne, Ricardo Casagrande Faust e Ricardo Odorzky). Agradece também ao Departamento de Física da UTFPR, por disponibilizar equipamentos de medições de grandezas físicas, e a Fundação Araucária pela bolsa de PIBIC.

6. REFERÊNCIAS

- Foggiatto, J.A., março de 2005, “Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos”. Tese de doutorado (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- Han, W. Fafari, M. Danforth, S. C., Safari, A., 2002, “Tool Path-Based Deposition Planning In Fused deposition Processes” Journal of Manufacturing Science and Engineering, V. 124.
- Han, W., Fafari, M., Seyed, K., 2003, “Process speeding up via deposition planning in fused deposition-based layered manufacturing processes” Rapid Prototyping Journal, v.9, n.4, p.212-218.
- Lima, M.V.A., Zachi, F.D., Volpato, N., Foggiatto, J.A., 2005, Análise do fator de contração no processo FDM, X Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica do CEFET-PR.
- Sabourin, E., Houser, S.A. and Bøhn, J.H., 1996. “Adaptive slicing using stepwise uniform refinement”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 No. 4, pp. 20-26.
- Souza, T.R., Volpato, N., Oliveira, J.H.S.A., 2004, “Um Aplicativo para o Processamento de Geometria de Prototipagem Rápida”, XIX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE, UFPR, Curitiba-PR.
- Volpato, N., Foggiatto, J.A., Neto, I.M., 2004. “Uma Análise Dimensional e de Acabamento Superficial do Processo de Prototipagem Rápida FDM 2000”, Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, Belém-PA.

Volpato, N., 2007, "Os Principais Processos de Prototipagem Rápida". In: Edgar Blücher. Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações (Ed. Neri Volpato), São Paulo, 239 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDIES ON FDM RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY PARAMETERS FOR PROCESS PLANNING IMPROVEMENT

José Aguiomar Foggiatto, foggiatto@utfpr.edu.br

Neri Volpato, nvolpato@utfpr.edu.br

Marcos Vinicius Alves de Lima, marcosval@gmail.com

Gustavo von Zeska de França, gvzfranca@yahoo.com.br

Philip D'Estefani, pestefani@gmail.com

Federal University of Technology – Paraná (UTFPR)/PostGraduate Programme in Mechanical and Materials Engineering (PPGEM)/Department of Mechanical Engineering (DAMEC)/Prototyping and Tooling Group (NUFER).
Av. 7 de Setembro, 3165 - Curitiba – PR – Brazil.

Abstract: *The Rapid Prototyping (RP) technologies use proprietary process planning systems that do not allow exploring all the possibilities to build models. In the Fused Deposition Modeling (FDM) process some parameters are predefined, and sometimes, prevent more adequate values to be used. This limitation motivated the development of an in house software, called Rapid Prototyping Process Planning (RP³) system, by NUFER (Prototyping and Tooling Group), in the Federal University of Technology-Paraná (UTFPR) – Brazil. The objective of this paper is to present two studies with the FDM 2000 equipment which seek to improve the RP³ system. The first one investigated and determined the shrinkage factor in the Z axis, aiming to implement an error correction algorithm in the RP³ system. The second one was an analysis of the FDM extruder head speed when varying some deposition parameters. The results had been used to make a built time estimator algorithm. The methodology used in these studies can be applied to similar studies with other FDM models.*

Keywords: *Rapid Prototyping, Process Planning, Dimensional Accuracy, Building Time.*