

## MODELOS DE FATIAMENTO ADAPTATIVO EM PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Neri Volpato, [nvolpato@utfpr.edu.br](mailto:nvolpato@utfpr.edu.br)  
José Aguiomar Foggianto, [foggianto@utfpr.edu.br](mailto:foggianto@utfpr.edu.br)  
Marcos Vinicius Alves de Lima, [marcos.lima@tecpronbrazil.com](mailto:marcos.lima@tecpronbrazil.com)

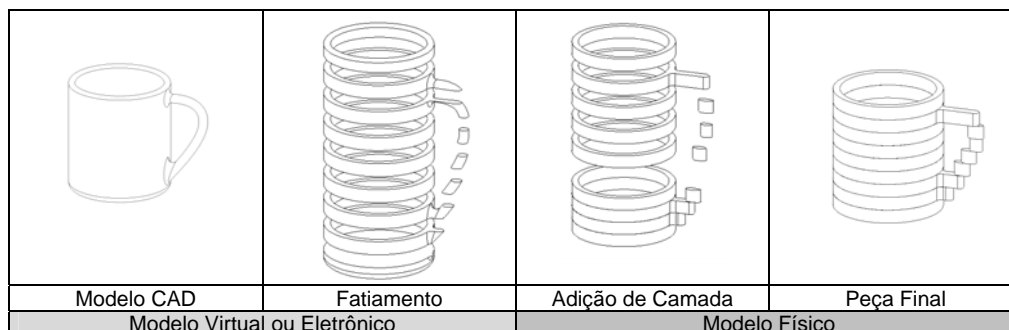
UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)/PPGEM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais)/NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental). Av. 7 de Setembro, 3165,. Curitiba – PR

**Resumo:** As tecnologias de Prototipagem Rápida (Rapid Prototyping-RP) se baseiam no princípio da manufatura por camadas. As informações geométricas das camadas são obtidas através do fatiamento de um modelo CAD 3D, por um programa de planejamento de processo, gerando assim perfis 2D (fatias) que, sobrepostos, compõem o protótipo. Normalmente, a espessura das camadas é constante, tendo-se assim o denominado fatiamento uniforme do modelo. No entanto, é possível realizar um fatiamento com espessura variável que represente um refinamento em regiões com maior complexidade geométrica ou com grandes variações entre os perfis 2D, dando origem ao método denominado de fatiamento adaptativo. O presente estudo apresenta as diversas teorias encontradas na literatura para identificação das regiões que necessitam do refinamento das camadas. O objetivo final deste estudo é a implementação do fatiamento adaptativo no sistema de planejamento de processo para RP, denominado de RP<sup>3</sup> (Rapid Prototyping Process Planning). Este sistema vem sendo desenvolvido para pesquisar o planejamento de processo de várias tecnologias de PR. Em um estudo preliminar, foi identificado que, através da alteração das configurações padrões do programa proprietário da tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), foco do estudo, é possível variar a espessura entre as camadas de uma mesma peça. Do levantamento bibliográfico, um método de fatiamento adaptativo foi identificado e uma proposta de implementação é apresentada levando em consideração as limitações do processo FDM. Espera-se com isso poder diminuir o tempo de produção de algumas peças mantendo ou melhorando a precisão geométrica e dimensional.

**Palavras-chave:** Prototipagem Rápida, FDM, fatiamento adaptativo, planejamento de processo.

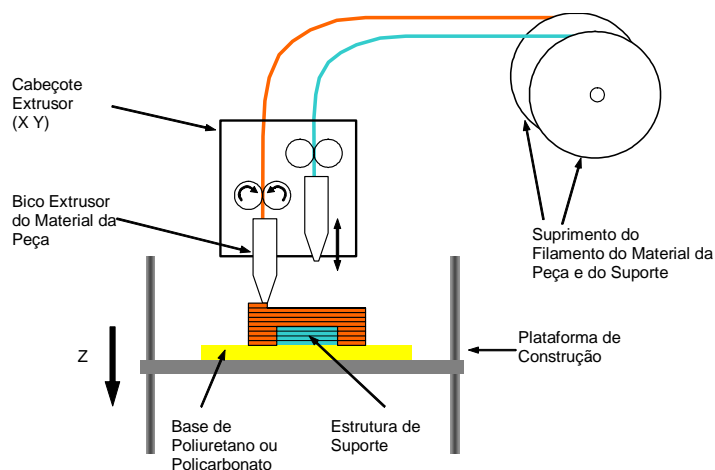
### 1. INTRODUÇÃO

A Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP) é um processo de fabricação que se baseia no princípio da manufatura por camadas. As informações geométricas das camadas são obtidas através do fatiamento de um modelo CAD 3D, geralmente no formato STL (*STereoLithography*), por um programa de planejamento de processo, gerando assim perfis 2D (fatias) que, sobrepostos, compõem o protótipo como mostrado na Fig. (1).



**Figura 1. Princípio de manufatura por camada – principais estágios (Adaptado de Volpato *et al.*, 2005).**

Uma das tecnologias de RP do mercado é o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*). Neste, um cabeçote extrusor realiza a deposição dos filamentos de material termoplástico ABS (*Acrylonitrile-Butadiene-Styrene*) compondo camadas paralelas ao longo do eixo Z. Para cada camada, o sistema de planejamento de processo proprietário gera as coordenadas (X, Y) pelas quais o bico extrusor percorre para deposição dos filamentos fundidos, como mostrado na Fig. (2).



**Figura 2. Princípio de funcionamento da tecnologia FDM (Volpato *et al.*, 2005).**

Normalmente, o distanciamento entre as camadas (formada pelos perfis 2D obtidos na etapa de fatiamento), ou seja, a espessura da camada, é constante, tendo-se assim o denominado fatiamento uniforme do modelo. Este fatiamento não considera detalhes da geometria da peça que poderiam ser melhor reproduzidos com um refinamento da espessura localmente.

Os programas de planejamento de processo dos sistemas de RP comerciais não permitem um refinamento local das distâncias entre camadas em regiões com maior complexidade geométrica ou com grandes variações entre os perfis 2D. Estes sistemas só aplicam o fatiamento uniforme ao longo de todo o componente. Para se obter um refinamento na espessura de camada, é necessário utilizar uma espessura constante menor em toda a peça, mesmo esta possuindo regiões em que uma espessura maior atenderia os requisitos de acabamento. Assim, em alguns casos, tem-se protótipos com tempo de produção elevado ou com baixa precisão dimensional. No entanto, observa-se que algumas tecnologias de RP poderiam utilizar, em teoria, uma variação de espessura de camada ao longo da construção da peça. Em um estudo inicial com a tecnologia FDM, foco deste estudo, foi identificado que, através da alteração das configurações padrões do programa proprietário é possível variar as distâncias entre as camadas de maneira independente.

O presente estudo apresenta as diversas teorias encontradas na literatura para identificação das regiões que necessitam do refinamento das camadas, dando origem ao método denominado de fatiamento adaptativo. Para o presente estudo foram relacionados os modelos de fatiamento adaptativo utilizados para o formato STL e para o formato CAD.

A hipótese básica deste trabalho se baseia na suposição que é possível aumentar a precisão dimensional e melhorar o acabamento superficial no processo FDM, através do fatiamento adaptativo ao longo da peça. Esta opção poderá também resultar em uma redução no tempo de produção do protótipo. .

## 2. MÉTODOS DE FATIAMENTO ADAPTATIVO

Uma característica importante da tecnologia de RP é que, a fabricação de um componente independe da sua complexidade geométrica. A exatidão do objeto manufaturado é relacionada diretamente a espessuras de suas camadas, ou seja, quanto menor a espessura desta melhor a precisão geométrica do mesmo. Conforme mencionado anteriormente, na manufatura por camada, existe a possibilidade de dois tipos de fatiamento, o uniforme e o adaptativo (Fig. 3a e 3b) (Kulkarni e Dutta, 1996). O método uniforme ou convencional consiste na obtenção de camadas de espessuras constantes ao longo do eixo Z de construção do protótipo. No caso do fatiamento adaptativo, a espessura das camadas pode variar de acordo com a geometria da região da peça para que se diminua o desvio da geometria CAD.

De acordo com Kulkarni e Dutta (1996), o método adaptativo possui três vantagens em relação ao uniforme. Primeiro, a qualidade do acabamento superficial do protótipo é melhorada, em função da diminuição do efeito escada (Fig. 3b). Segundo, o tempo de construção do protótipo é reduzido, pois em regiões onde não se verifica o efeito escada é possível utilizar camadas mais espessas, diminuindo assim, o número de camadas necessárias na fabricação. Terceiro, o efeito escada é amenizado possibilitando também uma melhor precisão geométrica e dimensional no protótipo fabricado.

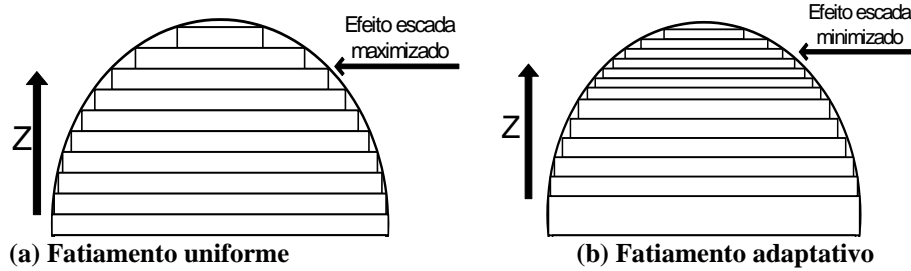


Figura 3. Representação esquemática dos tipos de fatiamento.

### 2.1. Métodos de Fatiamento Adaptativo Baseado em Modelo STL

Para Dolenc e Makela (1994), o problema da manufatura por camada é obter um protótipo com uma boa precisão geométrica e com um bom acabamento superficial. Para abordar tal problema, os autores desenvolveram um método que identifica quais regiões é necessário o fatiamento adaptativo. O método desenvolvido se aplica ao modelo CAD 3D, no formato STL. O formato STL aproxima as superfícies do modelo utilizando planos triangulares, criando uma representação facetada da geometria da peça (Kulkarni e Dutta, 1996) (Fig. 4).

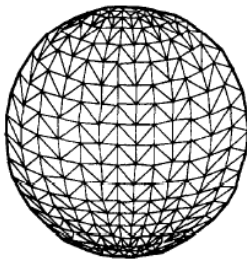


Figura 4. Modelo em STL de uma esfera (Kulkarni e Dutta, 1996).

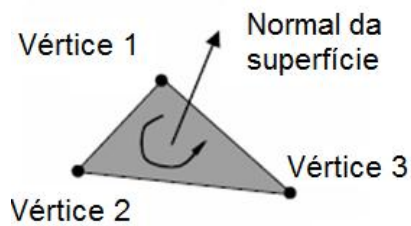


Figura 5. Composição de um triângulo do formato STL (Volpato *et al.*, 2005).

Cada triângulo gerado no modelo em STL é composto pelas coordenadas X, Y e Z para 3 vértices e uma superfície com vetor normal apontado para fora do modelo (Fig. 5).

Na proposta dos autores Dolenc e Makela (1994), o modelo facetado é fatiado iniciando na sua base até o seu topo. Para a determinação do desvio da geometria, altura de crista, denominada de  $c$ , é utilizada então o desvio máximo permitido  $C$ , sendo especificado pelo usuário. De acordo com a superfície sendo fatiada a variável  $c$  determinará quando será necessário o fatiamento adaptativo. Tendo-se uma primeira fatia, a altura  $l$  da próxima camada pode ser estimada utilizando o ângulo da normal obtida da faceta (do triângulo STL) no ponto  $P$ , referente ao plano horizontal. Este ponto  $P$  é gerado pela intersecção do plano que fatia a peça horizontalmente com a faceta gerada pelo STL (Fig. 6).

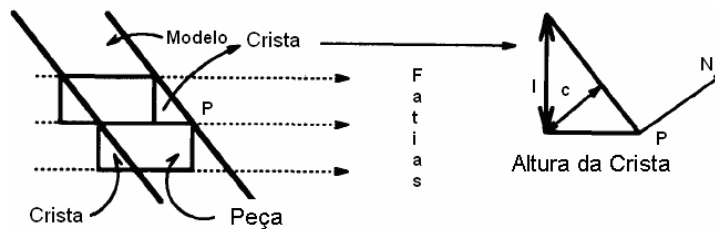


Figura 6. Efeito escada e o desvio da geometria  $c$  (Dolenc e Makela, 1994).

Considerando que  $N=(N_x, N_y, N_z)$  é o versor normal da faceta mais próxima, então  $C=cN$  deve satisfazer condição apresentada na Eq. (1).

$$\|C\|_2 = c \leq C_{\text{máx}} \quad (1)$$

Sendo que o  $C$  é a espessura de camada do processo,  $c$  a altura de crista dada pela normal do triângulo pertencente ao modelo facetado e  $C_{\text{máx}}$  a máxima espessura de camada admissível pelo processo. Desde que  $C_{\text{máx}}$  seja dado, os cálculos são simplificados como mostrado na Eq. (2).

$$l = C_{\text{máx}} / N_z \quad (2)$$

Sendo que  $l$  é a altura de camada e  $N_z$  a normal em z da face do triângulo. Com  $N_z \neq 0$ , pois de outra maneira teríamos  $l = \infty$ . A espessura estimada a ser escolhida ao longo de uma fatia, ou seja, analisando-se todos os triângulos que interceptam com o plano de fatiamento sendo considerado é o mínimo de  $\{L_{\text{máx}}, \min \{l\}\}$  determinado ao longo de

todo o contorno da fatia. Valores menores que  $l_{\min}$  podem ser descartados com ressalvas, e  $l$  pode ser determinado por  $l_{\min}$ .

Deve-se tomar cuidado quando a superfície externa muda sua inclinação abruptamente, como na Fig. (7). Neste caso, o modelo proposto deve identificar esta mudança abrupta e a espessura deve ser recomputada a partir dos dados obtidos da fatia  $i+1$ , resultando na espessura  $h$ , ao invés de  $H$ , onde  $h < H$ . Assim, é criada uma camada  $h$  entre as duas camadas já existentes, possibilitando a intersecção da superfície antes da mudança do ângulo da normal da mesma. Este procedimento pode evitar a degeneração do contorno da geometria, o tornando mais suave.

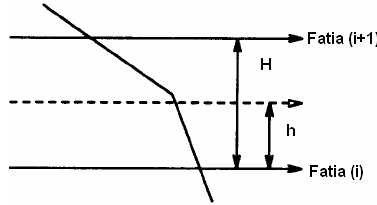


Figura 7. Recuo no fatiamento adaptativo (Dolenc e Makela, 1994).

Utilizando como base o método de Dolenc e Makela (1994), Sabourin *et al.* (1996) desenvolveram uma teoria para implementar melhorias no fatiamento adaptativo. Este método diferencia do anterior por realizar fatiamento analisando em duas direções de cima para baixo e de baixo para cima. Com isso o modelo evita o problema da perda de regiões paralelas à base, encontrado no modelo original de Dolenc e Makela (1994). Segundo Sabourin *et al.* (1996), o modelo é inicialmente fatiado de maneira uniforme na espessura máxima permitida pelo programa ou processo. A partir deste pré-fatiamento são geradas subdivisões em cada camada, possibilitando uma maior precisão do fatiamento adaptativo e evitando a perda de geometrias.

Sabourin *et al.* (1996) apresentam uma teoria na qual a partir das normais do ponto  $P$ , obtidas na base e no topo da camada, é possível estipular um número máximo de subdivisões desta camada com uma espessura constante. Este número máximo é dado por  $\alpha_{slab}$  como mostrado na Eq. (3).

$$\alpha_{slab} = \text{int} \left( \frac{L_{\max}}{C_{\max}} \max \{ n_{z \text{ base}}, n_{z \text{ topo}} \} \right),$$

$$\alpha_{slab} \in [1, \alpha_{\max}], \alpha_{\max} = \text{int} \left( \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \right) \quad (3)$$

Onde  $n_{z \text{ base}}$  e  $n_{z \text{ topo}}$  (equivalentes ao  $N_z$  utilizado por Dolenc e Makela, 1994), são obtidos a partir da normal  $N$ , componentes do ponto  $P$  entre a base e o topo de uma camada específica. Sendo que se obtém a altura máxima destas subcamadas  $l$  através da Eq. 4.

$$l = L_{\max} / \alpha_{slab} \quad (4)$$

Partindo desta teoria de subdivisão das camadas, Sabourin *et al.* (1997) apresentam um método alternativo de fabricação de uma peça que possibilita uma manufatura com um tempo reduzido, mantendo-se a qualidade superficial da peça. Este novo método consiste em dividir o modelo em duas partes básicas. A primeira é interna, onde a máxima altura de camada  $L$ , determinada pelo equipamento é aplicada e a outra é externa, onde se aplica um refinamento das camadas, compostas por subdivisões da altura interna. Nesta proposta as alturas das camadas externas,  $l$ , são proporcionais à altura máxima da camada interna (Fig. 8).

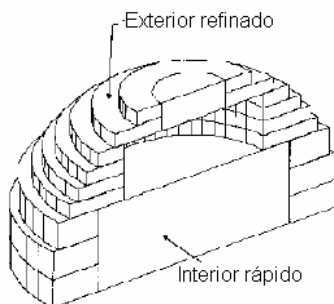


Figura 8. Manufatura com interior rápido e exterior refinado (Sabourin *et al.*, 1997).

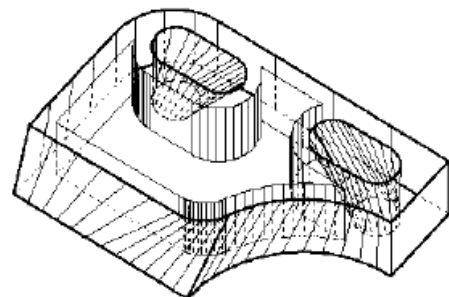


Figura 9. Duas camadas adjacentes subdivididas em contornos externos e internos (Sabourin *et al.*, 1997).

Neste método, o modelo 3D é fatiado utilizando-se a máxima espessura de camada permitida pelo processo. A partir disto gera-se dois perfis 2D, sendo um interno e outro externo. Para gerar o perfil interno é realizada a projeção de dois perfis externos de duas camadas adjacentes, fazendo-se então a intersecção dos mesmos. Assim, uma área comum é obtida e utilizada para a realização do offset interno da peça, com isso os contornos ficam divididos em externo e interno, como mostrado na Fig. (9).

Após a divisão dos contornos estes são preenchidos individualmente. Sendo que a parte externa é preenchida primeira, de maneira refinada, e depois a interna em uma só camada com a espessura máxima permitida pelo equipamento.

Já no estudo realizado por Tyberg e Bohn (1998 e 1999) foi analisado que quando existe a produção de mais de uma peça ao mesmo tempo, o potencial econômico do tempo no fatiamento adaptativo é reduzido. Como se pode notar na Fig. (10), onde são mostradas duas geometrias distintas sendo ambas produzidas com a aplicação do fatiamento adaptativo. Sendo que na geometria esférica, onde é necessário o fatiamento adaptativo foi reduzido o efeito escada, porém no cubo existe pouca necessidade da utilização do fatiamento adaptativo por possuir uma geometria relativamente simples.

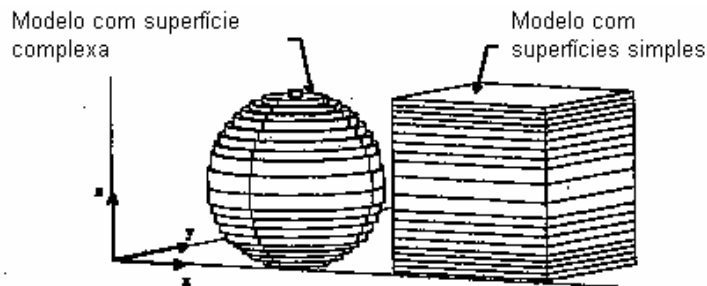


Figura 10. Fatiamento adaptativo em ambas as geometrias realizadas (Tyberg e Bohn, 1998).

Para evitar o desperdício de tempo, com a utilização de camadas refinadas, em geometrias relativamente simples, foi proposta a utilização do fatiamento adaptativo local. Este método consegue gerar geometrias com configurações de fatiamento independentes entre si. Para realizar esta tarefa os modelos em CAD são transformados em STL e posteriormente fatiados em camadas uniformes usando a espessura máxima permitida pelo equipamento utilizado (definidas pelos autores de laje). Os contornos resultantes pertencem às fatias do topo ( $U1$  referente à peça 1 e  $U2$  referente à peça 2) e da base ( $L1$  e  $L2$ ) da laje, que são analisados de maneira isolada das demais camadas (Fig. 11). Neste estágio, todas as lajes secundárias possuem espessura constante. Finalmente, cada laje secundaria é dividida independentemente (peça isolada), se necessário, em um número distinto de camadas mais finas de acordo com a configuração estabelecida pelo fatiamento adaptativo, obtendo-se um fatiamento adaptativo otimizado para o caso de mais de uma peça (Fig. 12) (Tyberg e Bohn, 1998, Tyberg e Bohn, 1999). O método utilizado para a realização individual do fatiamento adaptativo foi o mesmo utilizado por Dolenc e Makela (1996).

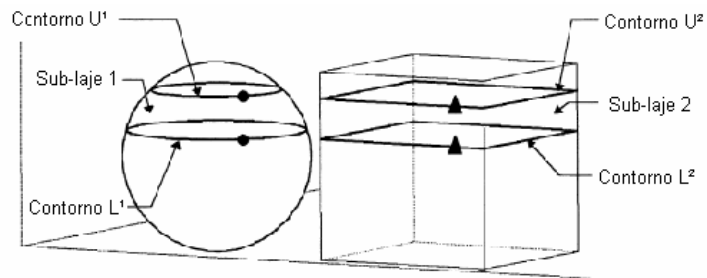


Figura 11. Fatiamento das geometrias em lajes (Tyberg e Bohn,1998).

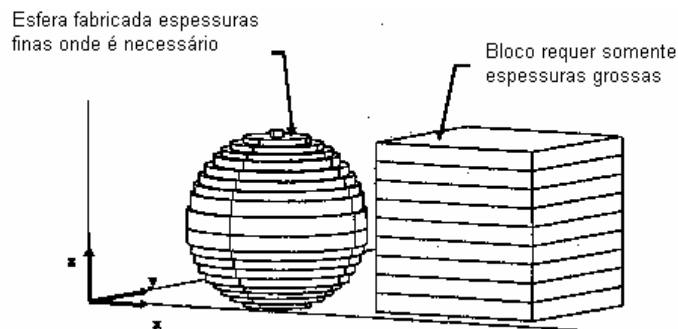


Figura 12. Fatiamento adaptativo individual por peça (Tyberg e Bohn, 1998).

## 2.2. Método de Fatiamento Adaptativo Baseado em Modelo CAD

O método para a detecção do fatiamento adaptativo baseado diretamente no modelo CAD foi denominado de fatiamento adaptativo direto, pois não possui uma etapa de conversão para outro formato específico (Chen *et al.*, 2001).

Segundo Kulkarni e Dutta (1996), a partir de um modelo CAD é possível obter o contorno da peça. Através do perfil da geometria a curvatura desta é obtida. Através do fatiamento desta superfície, fatias  $S$  e  $D$  do ponto  $P$  é obtido, assim sendo criado um plano tangente à curvatura  $T$ , possuindo uma direção  $xt$ . Considera-se qualquer curva contida na superfície que está tangente à direção  $xt$  no ponto  $P$ . Após, é gerado um plano normal a esta curvatura e ao plano  $T$  conseqüentemente. Gera-se então o plano  $L$ , que contém a normal  $N$  da curvatura. Finalmente, realizando a intersecção do plano  $L$  com a superfície obtêm-se a secção normal  $Ns$  e a curvatura da secção normal é exatamente a curvatura normal da superfície (Fig. 13).

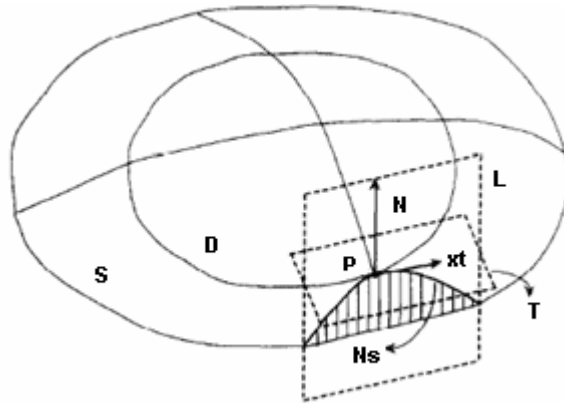


Figura 13. Curvatura normal da superfície (Kurkani e Dutta, 1996).

Após a obtenção da normal é possível então a aproximação da secção normal com um círculo (Fig. 14). Este procedimento ocorre para simplificar o perfil obtido para a medição da máxima camada permitida. Inicialmente, a aproximação circular é determinada partindo-se do ponto  $P$  na superfície. Considera-se que  $N$  é vetor normal feita horizontalmente do ponto  $P$ , sendo  $\rho$  o raio da curvatura no ponto  $P$ ,  $\delta$  é o desvio da geometria permitido (Fig. 14).

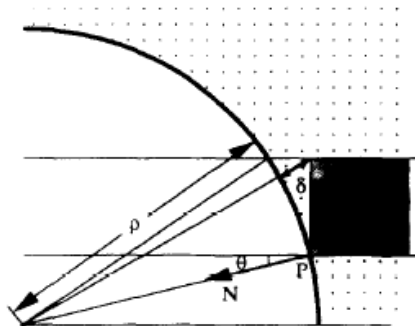


Figura 14. Determinação do desvio da geometria permitido (Kurkani e Dutta, 1996).

## 3. MÉTODOS DE CONTROLE DE PICOS E VALES ASSOCIADOS AO FATIAMENTO ADAPTATIVO

No estudo realizado por Dolenc e Makela (1994), foi proposto um método para controlar o problema de picos e vales através da utilização do fatiamento adaptativo. Desta forma, é possível reproduzir geometrias que possuam uma altura inferior à altura de fatiamento utilizada. Considerando um modelo, assumindo que este seja fatiado com uma precisão infinita e seja realizado da base até o topo, temos uma camada  $S_i$  com um contorno  $C(S_i)$ . Se o contorno adjacente a este se resumir a um ponto ou, se o número de contornos reduzir, então este será considerado degenerativo. Com isto, teremos a camada  $S_i$  e a próxima camada com o contorno degenerativo  $S_{i+1}$  que é descartada, pois é realizado um novo fatiamento com uma altura de camada menor (Fig. 15).

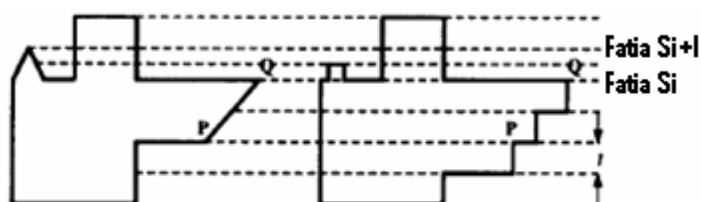


Figura 15. Refinamento de camada em picos (Dolenc e Makela, 1994).



Porém, segundo Dolenc e Makela (1994), esta teoria apresenta um problema prático quando não é possível detectar o pico, uma vez que a camada não possui um contorno degenerativo, como mostrado na Fig. (16), embora tal caso não aconteça com tanta frequência.

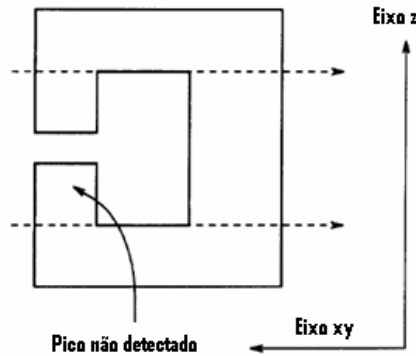


Figura 16. Picos não detectáveis (Dolenc e Makela, 1994).

Em outro estudo realizado por Zhou *et al.* (2004) o controle de picos foi realizado através do comparativo dos números de contornos. Se o número de contornos variar de uma camada para outra então será detectado um pico. Através da detecção de um pico é realizado um fatiamento refinado nesta região.

Outro caso de desvio de geometria é caso de áreas planas. Primeiramente, as áreas planas são classificadas em áreas positivas e negativas, dependendo da direção de suas normais (Fig. 17).

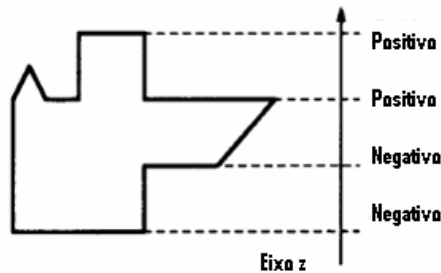


Figura 17. Separação das áreas em negativas e positivas segundo suas normais (Dolenc e Makela, 1994).

A notação  $F^+$  e  $F^-$  denotam áreas planas positivas e negativas respectivamente, que estão localizadas entre uma camada e a outra. Para exemplificar a proposta, foi considerada uma área plana negativa  $Fj^-$ , que necessita ser manufaturada precisamente (Fig. 18a). Para isto é necessário que se coloque uma camada intermediária entre ela e a próxima camada a ser fatiada. A camada  $Fj^-$  será desconsiderada, ficando apenas o contorno  $C$  na camada (Fig. 18b).

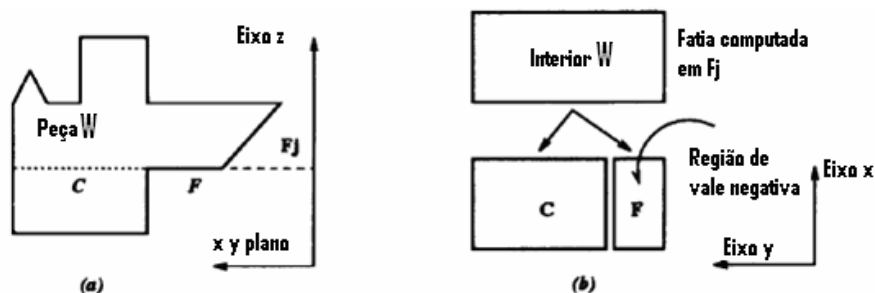


Figura 18. Contornos; (a) vista lateral de uma peça W e uma fatia em Fj, (b) vista topo do contorno Fj, dividido em duas partes (Dolenc e Makela, 1994).

#### 4. ESTUDO DE CASO PRELIMINAR

Considerado que a tecnologia FDM 2000 comercializada pela empresa Stratsys, Inc. EUA, somente trabalha com o fatiamento uniforme e não se tinha a informação se o controle permitiria enviar uma peça para a máquina com espessura de camada variável, um estudo preliminar foi realizado para verificar a possibilidade de se fabricar um componente com espessura de camada variável. A princípio, não há nenhum impedimento tecnológico no processo FDM para a variação da espessura das camadas durante a construção do protótipo. Abre-se assim, a oportunidade de se utilizar uma

metodologia de fatiamento adaptativo no processo FDM e, conseqüentemente, melhorar a qualidade (acabamento superficial) do protótipo, além de uma redução do tempo de processo.

O equipamento FDM 2000 possibilita o uso de três tipos de bicos calibrados no cabeçote extrusor, cada qual proporciona duas ou mais espessuras diferentes para o filamento, como referido na Tab. (1).

**Tabela 1. Tipos de bicos para o equipamento FDM 2000.**

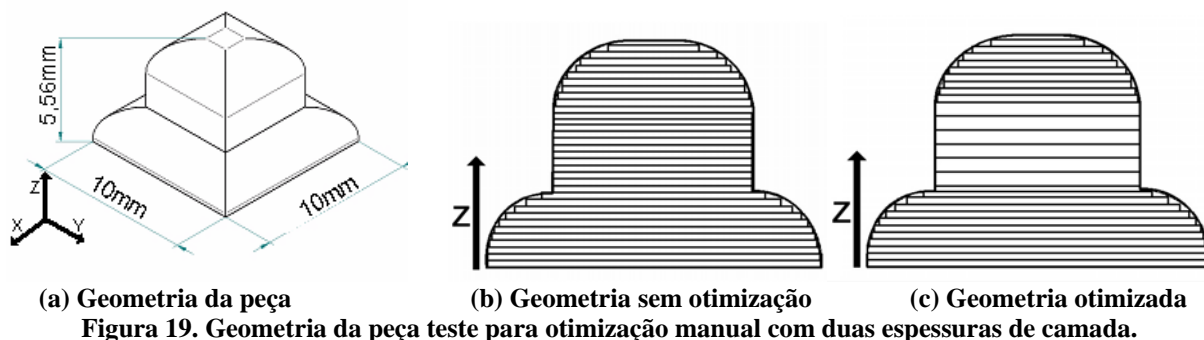
Espessura do filamento (mm)	Tipos de Bico		
	T10	T12	T16
0,178	0,178	0,254	
0,254	0,254	0,305	
--	--	0,356	

Após a etapa de planejamento do processo, realizado por um programa proprietário da Stratasys, denominado Insight, um arquivo SML (*Stratasys Modeling Language*), no formato texto, é gerado. Este arquivo contém todas as informações necessárias para controlar a máquina, tais como espessura de camada, velocidade de alimentação do filamento, velocidade de deslocamento linear do cabeçote e coordenadas da trajetória do cabeçote.

Como a troca do bico calibrado não é automática, a peça tem que ser construída do início ao fim com o mesmo bico. Esta consideração é importante quando se pensa em fatiamento adaptativo, pois no caso da FDM, somente as espessuras definidas para cada bico poderiam ser alocadas numa peça. Estes valores foram estabelecidos pelos fabricantes, e certamente, outros valores dentro destas faixas poderiam ser empregados desde que todos os demais parâmetros de controle do processo fossem definidos experimentalmente, o que seria bastante trabalhoso. Neste estudo somente as espessuras pré-definidas foram analisadas.

#### 4.1. Metodologia do Estudo de Caso

Para este estudo preliminar, foi planejada uma geometria de forma a facilitar a aplicação do fatiamento adaptativo (Fig. 19a). Esta geometria é simples e pequena, e favorecer a visualização do efeito escada nas regiões arredondadas da base e topo. O corpo central não muda, possuindo perfis com contornos similares entre si. A altura total foi definida como múltiplo das alturas de camadas existentes no processo FDM. A mesma foi modelada no CAD 3D SolidEdge, com uma base de 10mm e altura de 5,56mm, e exportada no formato STL.



**Figura 19. Geometria da peça teste para otimização manual com duas espessuras de camada.**

O bico T12 foi utilizado para o teste, podendo depositar, segundo a Tab. (1), camadas de 0,178mm e 0,254mm. A geometria foi então processada com estas duas espessuras de camadas, gerando-se dois arquivos SML. Conhecendo-se a linguagem SML, foi possível então mesclar manualmente um dos arquivos com a informação do outro. Obteve-se então a região central com uma espessura de 0,254mm e as demais regiões com a espessura de 0,178mm (Fig. 19b e c). Este arquivo SML foi então enviado para a máquina FDM 2000. Adicionalmente, para comparação, uma outra peça com o fatiamento uniforme de 0,178mm foi fabricada.

#### 4.2. Resultados e Discussão Sobre o Estudo de Caso

As duas peças fabricadas são mostradas na Fig. (20). O tempo de fabricação da geometria com o fatiamento uniforme foi de 10 minutos e 20 segundos. Já na peça onde foi aplicado o fatiamento adaptativo, o tempo obtido foi de 9 minutos e 51 segundos. Isto levou a uma redução de cerca de 4,67% no tempo de fabricação. Esta redução foi devido ao menor número de camadas a serem fabricadas, como pode ser observado esquematicamente na Fig. (20).





Figura 20. As duas peças fabricadas pelo equipamento FDM.

Através dos testes práticos, foi possível constatar que o equipamento FDM 2000 rodando com *Insight* aceita modificações no arquivo SML, possibilitando assim o fatiamento adaptativo, dentro das restrições das espessuras permitidas pelos bicos. Com isso, foram obtidas otimizações no tempo e no acabamento superficial do protótipo. O bico T12 foi utilizado, possibilitando a produção com até duas camadas de espessuras distintas. Para estudos futuros, serão realizadas otimizações com bicos que possibilitem uma maior variação de espessuras, como o T16. Há ainda a possibilidade de se definir espessuras entre os limites informados pelo fabricante.

É importante ressaltar que este estudo preliminar realizado foi uma implementação manual do fatiamento adaptativo, porém objetiva-se uma implementação de automática do modelo no sistema de planejamento RP<sup>3</sup>.

## 5. DISCUSSÃO

No presente trabalho, foram analisados diversos trabalhos que apresentam métodos de fatiamento adaptativo e possíveis melhorias nos mesmos. Observou-se que o método utilizado por Dolenc e Makela (1994) serviu como base para os demais autores para a identificação das regiões que necessitam do fatiamento adaptativo. Este método utiliza modelos 3D no formato STL, sendo a base do algoritmo a utilização das normais dos triângulos. Com este é possível detectar regiões que necessitem do fatiamento adaptativo de maneira simplificada. Algumas melhorias foram propostas em diversos estudos subsequentes, como por exemplo, o de gerar um preenchimento interno com espessura de camada maior e da superfície mais refinada para se ganhar tempo e melhorar o acabamento superficial. Outro estudo propôs uma melhoria no caso de se fabricar mais de uma peça por vez na máquina, com o fatiamento por componente. Apesar de ser possível a implementação do fatiamento adaptativo direto no modelo nativo CAD, até o momento, a maioria dos processos comerciais utilizam o formato STL, pela simplicidade e confiabilidade na transferência de dados geométricos.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo preliminar realizado mostrou que o equipamento FDM 2000 disponível aceita a fabricação de um modelo com diferentes espessuras de camada. Este resultado motivou a continuidade dos estudos dos vários modelos existentes com o objetivo de identificar um, ou combinações destes, para implementação de maneira automática no sistema RP<sup>3</sup>. Como o sistema RP<sup>3</sup> é genérico, este modelo a ser implementado poderá ser utilizado em outras tecnologias de RP.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen X., Wang C., Ye X., Xiao Y., Huang S., 2001 “Direct slicing from poweshape models for rapid prototyping”, *Advanced Manufacturing Technologic*, No.17, pp. 543-547.

Dolenc A. and Makela, I., “Slicing procedures for layer manufacturing techniques”, *Computer Aided Design*, Vol. 26, No. 2, pp.119-126.

Dolenc, A. and Makela, I., 1996, “Rapid Prototyping from a computer scientist’s point of view”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 18-25.

Kulkarni, P. and Dutta, B., 1996, “An accurate slicing procedure for layered manufacturing”, *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 683-697.

Sabourin, E., Houser, S.A. and Bohn, J.H., 1996, “Adaptive slicing using stepwise uniform refinement”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 20-6.

Sabourin, E., Houser, S.A. and Bohn, J.H., 1997, “Accurate exterior, fast interior layered manufacturing”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3 No. 2, pp. 44-52.

Tyberg, J. and Bohn, H., 1999, “FDM systems and local adaptive slicing”, *Materials and Design*, Vol. 20, pp. 77-82.

Tyberg, J. and Bohn, H., 1998, “Local adaptive slicing”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 3, pp. 118–127.

Volpato, N., Oliveira, J. S. A. de, and Souza, T. R., 2005, “A Process Planning Applicative for Rapid Prototyping Technology”, *Annals of the 18th International Congress of Mechanical Engineering COBEM*, November, Ouro Preto, Brazil. CD-ROM.

Zhou M.Y., Xi J.T. and Yan J.Q., 2004, “Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping”, *Advanced Manufacturing Technologic*, No. 23, pp. 20-27.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

### ADPATIVE SLICING MODELS IN RAPID PROTOTYPING PROCESS

Neri Volpato, [nvolpato@utfpr.edu.br](mailto:nvolpato@utfpr.edu.br)

José Aguiomar Foggiatto, [foggiatto@utfpr.edu.br](mailto:foggiatto@utfpr.edu.br)

Marcos Vinicius Alves de Lima, [marcos.lima@tecpronbrazil.com](mailto:marcos.lima@tecpronbrazil.com)

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

**Abstract:** *The Rapid Prototyping (RP) technologies are based in the layer manufacturing principle. The geometric information of each layer are obtained slicing a 3D CAD model via a process planning system. Normally, the layer thickness is constant during the process, using an uniform slicing model. However, it is possible to slice a CAD model with a variable layer thickness. In this case, a more refined slicing can be carried out in regions containing complex geometries or where there is some considerable variation between 2D contours obtained during slicing. This slicing model is known as adpative slicing. This work presents a review of some adaptive slicing models found in the literature. The main objective of this research is to implement a adaptive slicing model in the Rapid Prototyping Process Planning (RP<sup>3</sup>) system. This system has been developed to study the process planning for different RP technologies. In a preliminar study, it was observed that it was possible to build a part in the Fused Deposition Modeling (FDM) process with variable layer thickness. From the literature review it was identified an adaptive slicing model and an implementation was proposed considering the FDM process limitations. With this model, it is expected to reduce the build time while keeping or improving geometric and dimensional accuracy.*

**Keywords:** *Rapid Prototyping, FDM, Adaptive Slicing, Process Planning.*