

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE OS ERROS DIMENSIONAIS NO FRESAMENTO DE MATERIAL POLIMÉRICO PARA MOLDES-PROTÓTIPO

## **Milton Luiz Polli**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM/DAMEC/NUFER, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: polli@utfpr.edu.br.

## **Neri Volpato**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM/DAMEC/NUFER, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: nvolpato@utfpr.edu.br.

## **Joel Rodriguez de Amorim**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, DAMEC/NUFER, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: joelamorim@utfpr.edu.br.

## **Neville Paulo Chimenez Franzini**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, DAMEC, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: npcfranzini@hotmail.com.

***Resumo.** A fabricação de insertos de materiais poliméricos para moldes-protótipo tem requerido um estudo mais criterioso sobre o processo de usinagem por fresamento destas resinas. Uma situação particular desta área, é a necessidade de usinar e montar, dentro de uma certa tolerância, as partes de um inserto (denominadas de posições) que foram separadas para possibilitar a usinagem por fresamento. Neste trabalho é pesquisada, de forma experimental, a influência dos parâmetros de corte sobre os erros dimensionais no fresamento de contorno de uma resina polimérica. O objetivo é estudar as possíveis causas desses erros, e assim, poder prever o seu comportamento de modo que os posições e os seus alojamentos possam ser fresados e montados, minimizando-se a necessidade de uma etapa de ajuste manual. Os experimentos foram realizados com a resina comercial Ren Shape 5166 e uma fresa de aço rápido de topo reto. Foi analisada a influência da profundidade de corte axial, velocidade de corte, avanço e direção de corte sobre os erros dimensionais. Os estudos mostram que, para a faixa de tolerância de interesse, a excentricidade da fresa montada no porta ferramenta e a sua deflexão devem ser consideradas no processo de usinagem.*

***Palavras-chave:** fresamento, resinas poliméricas, erros dimensionais.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O emprego de moldes-protótipo fabricados por fresamento em resinas poliméricas, tem ajudado na obtenção de protótipos funcionais que são utilizados no desenvolvimento de novos produtos<sup>(1,2)</sup>. Com este tipo de molde é possível injetar uma quantidade pequena de protótipos para serem utilizados em ensaios de engenharia ou testes funcionais<sup>(3)</sup>. Todavia, alguns detalhes como cantos retos, canais pouco espessos e profundos entre outros não são possíveis de serem fresados diretamente nos insertos. Em moldes metálicos detalhes como estes são geralmente obtidos com o emprego dos processos de eletroerosão (a fio ou penetração)<sup>(4)</sup>. No entanto, como as resinas

poliméricas são materiais que não conduzem corrente elétrica o uso desta tecnologia não se faz possível.

Uma forma de se obter estas regiões em insertos fabricados em resinas é dividindo-as em outras mais simples, de maneira que possam ser fresadas como postigos. Deste modo, os postigos são fresados em um centro de usinagem e em seguida montados em alojamentos nos insertos obtendo-se, assim, as regiões que não eram possíveis anteriormente<sup>(5)</sup>. O formato dos postigos é recortado do modelo 3D dos insertos no CAD (*Computer Aided Design*) e são utilizados para a geração dos alojamentos através de operações booleanas. Como os alojamentos são criados com as mesmas dimensões dos postigos, se faz necessário um leve ajuste manual para que haja a montagem entre os dois. Porém, no trabalho realizado por Amorim e Volpato<sup>(5)</sup>, foi verificado que estas dimensões não eram exatamente iguais após a usinagem, ficando os postigos maiores do que os alojamentos. Este fato indica a ocorrência de erros dimensionais durante o fresamento das paredes de um ou de outro, tornando as dimensões dos postigos maiores e dos alojamentos menores do que o original no CAD.

A precisão das operações de usinagem é afetada pela exatidão de posicionamento da ferramenta em relação à peça e pelas deformações estruturais relativas entre elas no ponto de contato. Estas são produzidas por cargas térmicas e sollicitações mecânicas durante o corte, e contribuem para o surgimento de desvios em relação às dimensões desejadas da peça, resultando em erros dimensionais<sup>(6)</sup>. Os erros dimensionais no fresamento de topo são decorrentes principalmente das deflexões de ferramenta devido à ação da força de usinagem<sup>(7,8)</sup>. As fresas de topo são geralmente a parte mais flexível no sistema da máquina-ferramenta, principalmente quando a sua relação comprimento-diâmetro ( $L/D$ ) é consideravelmente elevada<sup>(6)</sup>. Também são defletidas, mas em proporções menores, as fixações da fresa e da peça e a máquina-ferramenta<sup>(9)</sup>. A deflexão da ferramenta tem a propriedade de atenuar os efeitos da excentricidade entre o eixo geométrico da ferramenta e seu eixo de rotação. Esta faz com que durante a usinagem a espessura do cavaco não seja igual para todos dentes. E, desta forma, altera as forças e o perfil instantâneo das componentes da força de usinagem, podendo levar a problemas de quebra e desgaste excessivo da ferramenta, erros geométricos na peça e alterações no comportamento dinâmico do processo de corte e da máquina-ferramenta<sup>(7,8)</sup>.

A Figura 1 mostra o mecanismo de geração da superfície durante a usinagem com uma fresa de dentes retos. Segundo Smith e Tlustý<sup>(10)</sup>, a deflexão da fresa será proporcional à força de corte instantânea e a superfície usinada será formada pela soma das pequenas regiões usinadas, quando um dente encontra-se na posição A. Somente as deflexões da ferramenta neste instante serão impressas na superfície, pois para qualquer outro momento a deflexão ficará registrada na porção de material que será removida pelo dente seguinte, não afetando a superfície final. Quando a profundidade de corte radial ( $a_e$ ) é tal que somente o dente 1 está em contato com a peça no ponto A, como a espessura do cavaco é nula, não há força de corte e nem deflexão. Como consequência disto, não ocorre nenhum erro dimensional<sup>(10)</sup>. Entretanto, os erros de forma produzidos pelas fresas helicoidais são mais complexos. As componentes da força de usinagem não são constantes e variam com a rotação da fresa. Além disso, o ângulo de hélice dos dentes produz variação adicional da força de corte ao longo do eixo da fresa<sup>(11)</sup>.

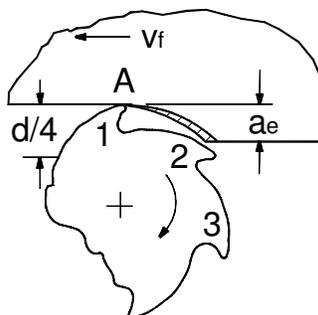


Figura 1. Geração da superfície no fresamento de topo com dentes retos<sup>(10)</sup>

No presente trabalho, é pesquisada a influência dos parâmetros de corte sobre os erros dimensionais no fresamento de contorno de resinas poliméricas através de experimentos. O objetivo deste estudo é encontrar as possíveis causas dos erros dimensionais, visando prever seu comportamento de modo que os postigos e os alojamentos possam ser fresados e montados, minimizando-se assim a necessidade de uma etapa de ajuste manual.

## 2. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em um Centro de Usinagem Cincinnati Milacron Arrow 500 e o material utilizado foi a resina polimérica comercial Ren Shape 5166. Nos ensaios foi empregada uma fresa de aço rápido de topo reto, com 12 mm de diâmetro, quatro dentes e hélice à direita. Esta foi fixada ao porta-ferramenta com um comprimento em balanço de 54 mm. Para a medição das dimensões do corpo de prova empregou-se o ULM (*Universal Length Measurement*) Zeiss 600. Para a medição do perfil das superfícies usinadas utilizou-se o rugosímetro Taylor Hobson Precision Surtronic 25. A medição do batimento radial da fresa foi feita utilizando-se um relógio apalpador com a ferramenta montada no eixo-árvore da máquina nas alturas de 5, 20 e 35mm em relação a sua extremidade.

O corpo de prova empregado nos ensaios foi a geometria de uma escada com quatro degraus, sendo a altura de cada igual a 5 mm. A base da escada possuía a altura de 20 mm. Deste modo foi possível variar a profundidade de corte axial ( $a_p$ ) de 5 a 40 mm. Sendo que para as profundidades de 5 a 20 mm a base não foi usinada, já para a faixa de 25 a 40 mm toda lateral do corpo de prova foi fresada. Essa geometria foi adotada para que se variasse a profundidade de corte ao longo da usinagem como representado na Figura 2. Foram realizados testes com cortes concordantes e discordantes. Nos ensaios, as duas laterais do corpo de prova eram usinadas nas mesmas condições de corte, de tal forma que o erro dimensional fosse duplicado. Para assegurar o valor da profundidade de corte radial ( $a_c$ ) eram realizados dois passes em cada lateral. Além da profundidade de corte axial ( $a_p$ ), variou-se durante os experimentos a velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço por dente ( $f_z$ ). Para a profundidade de corte radial ( $a_c$ ) foi empregado o valor de 0,2mm.

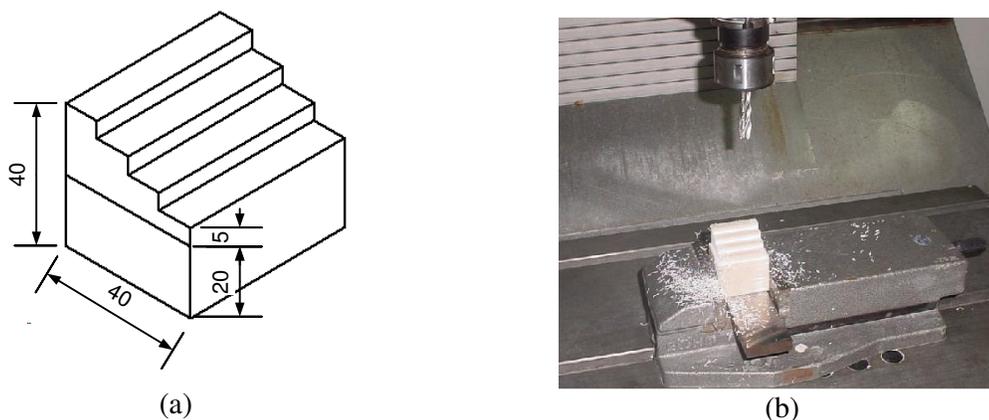


Figura 2. Croqui do corpo de prova (a) e montagem na máquina (b)

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos na medição do batimento radial da ferramenta posicionando o relógio apalpador em diferentes alturas em relação à extremidade da fresa.

Tabela 1 – Batimento radial medido ao longo do eixo da fresa

Altura do ponto de medição do batimento (mm)	5	20	35
Batimento radial ( $\mu\text{m}$ )	40	40	30

A Figura 3 mostra a média de 3 medidas dos erros dimensionais medidos à altura de 5 mm da base do corpo de prova em função da profundidade de corte axial para o corte concordante.

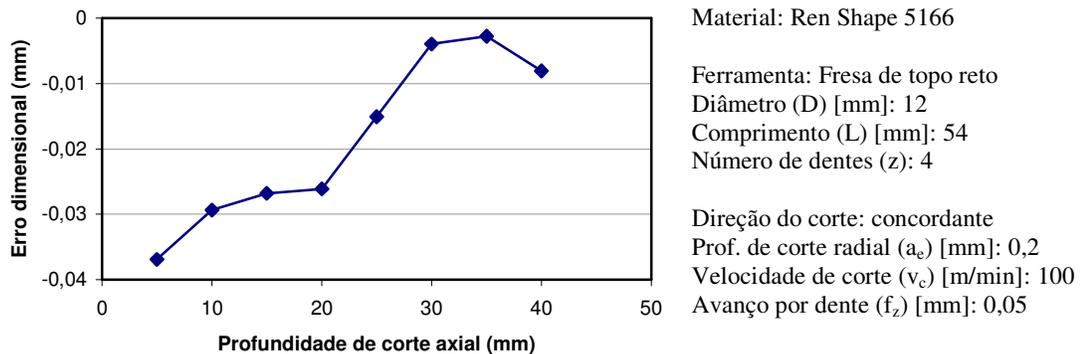


Figura 3. Erro dimensional em função da profundidade de corte axial

Levando-se em consideração que o erro dimensional é igual a diferença entre o valor medido e a medida nominal, valores negativos para o erro dimensional significam retirada excessiva de material, enquanto que valores positivos indicam dimensão resultante maior que a programada. Observa-se no gráfico da Figura 3 que ocorreu maior retirada de material que o programado. Isto se deve principalmente ao efeito da excentricidade (batimento radial de  $40 \mu\text{m}$ ). À medida que se aumenta a profundidade de corte axial o erro dimensional diminui até o valor de  $a_p = 35 \text{ mm}$ . Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da deflexão causado pelos maiores esforços na ferramenta que tendem a afastá-la do corpo de prova reduzindo o efeito da excentricidade. Porém, o comportamento da curva se altera havendo um ligeiro aumento da retirada de material para  $a_p = 40 \text{ mm}$ . Isto pode ser atribuído ao fato de que, em função da geometria do corpo de prova, a medição da dimensão para esta profundidade de corte se deu mais próxima da região de saída da ferramenta da peça, onde ocorre uma diminuição da força de usinagem.

A Figura 4 mostra os erros dimensionais medidos para as alturas de 5 e de 20 mm da base do corpo de prova em função da profundidade de corte axial para o corte concordante. Comparando-se as curvas, nota-se que foi retirado mais material na altura de 20 mm, resultando em maior erro dimensional, uma vez que as deflexões diminuem à medida que o ponto de medição se afasta da extremidade da fresa, reduzindo o efeito de atenuação sobre a excentricidade.

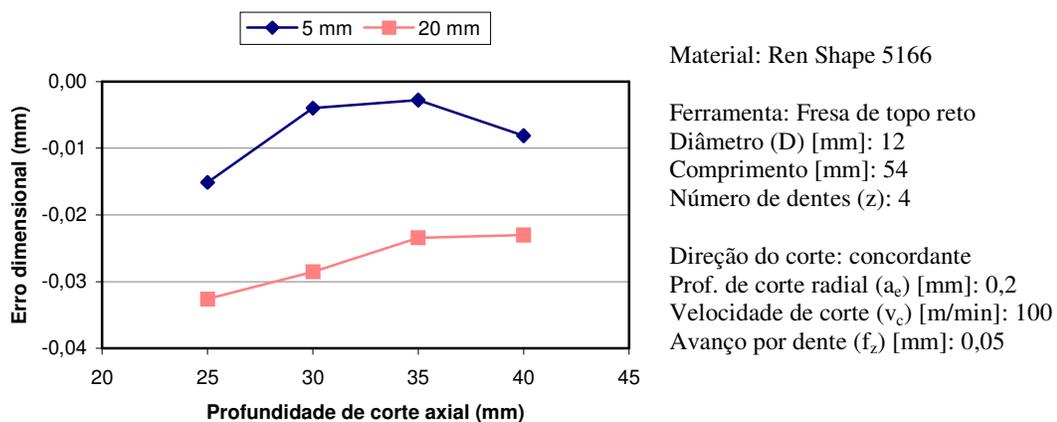


Figura 4. Erro dimensional em função da profundidade de corte axial para o corte concordante.

A Figura 5 mostra os erros dimensionais em função da profundidade de corte axial para o corte discordante. A influência da profundidade de corte axial é menor para esta direção, e os valores são

ligeiramente menores que os encontrados no corte concordante. Esperava-se que para o corte discordante houvesse tendência da ferramenta retirar mais material em comparação com o concordante<sup>(6)</sup>, porém isso não foi comprovado para faixa de valores empregada nos ensaios.

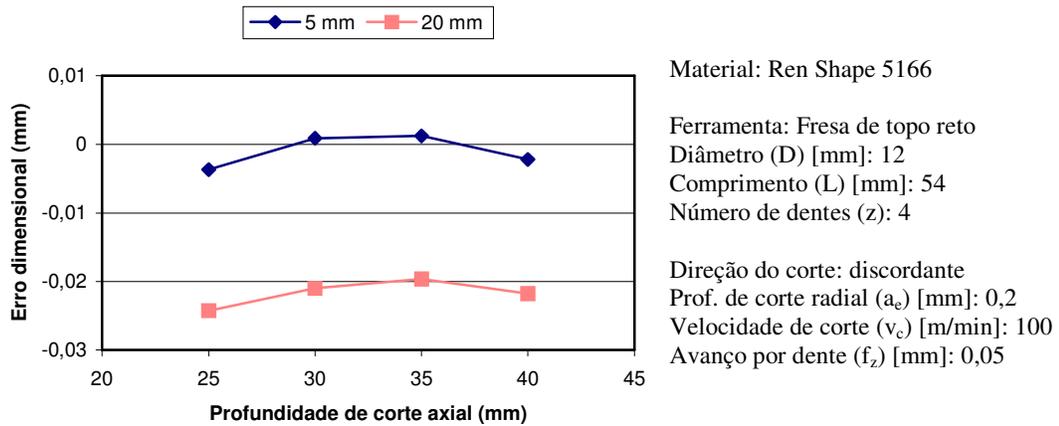


Figura 5. Erro dimensional em função da profundidade de corte axial para o corte discordante.

A Figura 6 mostra os erros dimensionais encontrados nos ensaios para a velocidade de corte de 150 m/min para o corte concordante.

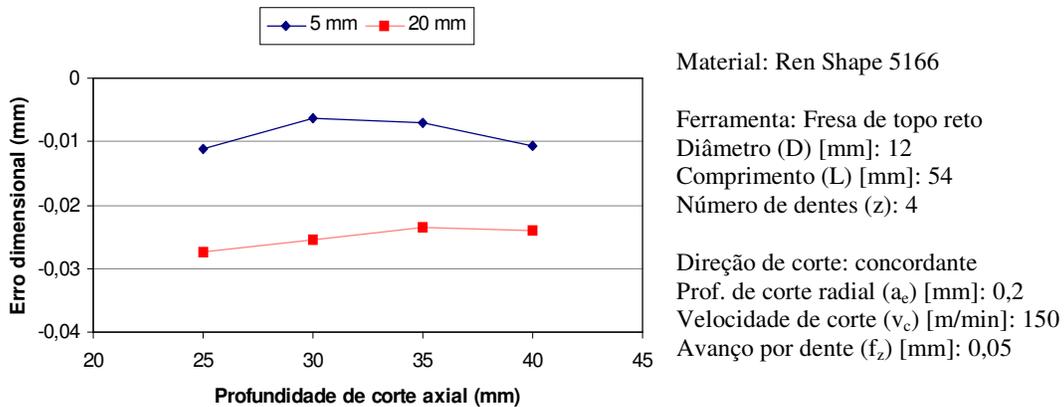


Figura 6. Erro dimensional em função da profundidade de corte axial para  $v_c = 150$  m/min.

A Figura 7 mostra os erros dimensionais encontrados nos ensaios para a velocidade de corte de 200 m/min.

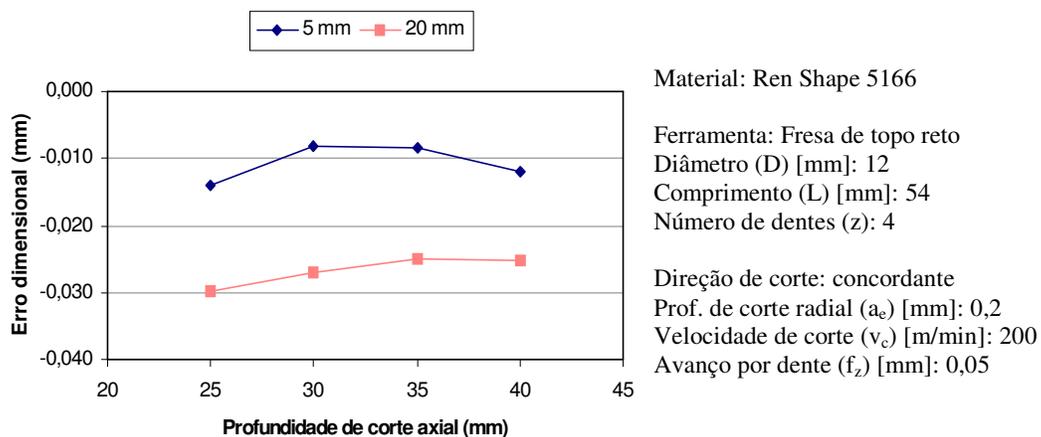


Figura 7. Erro dimensional em função da profundidade de corte axial para  $v_c = 200$  m/min.

As curvas dos gráficos das Figuras 6 e 7 apresentam um comportamento similar e valores muito próximos para as velocidades de corte analisadas, indicando que este parâmetro possui pequena influência sobre os erros dimensionais. Com o aumento da velocidade de corte crescem as forças de desbalanceamento que podem causar corte excessivo de material. Por outro lado diminuem os esforços de corte devido ao aumento da temperatura, incorrendo em menor deflexão da fresa.

A Figura 8 mostra o perfil da superfície usinada com  $v_c = 150$  m/min e  $f_z = 0,05$  mm/dente. O perfil deveria mostrar as marcas de avanço referentes à passagem de cada dente. Entretanto, a distância entre as marcas verificadas no perfil correspondem principalmente ao avanço por volta devido à excentricidade da fresa. Com isso, o dente mais excêntrico está cortando mais que os outros, retirando a marca dos dentes anteriores.

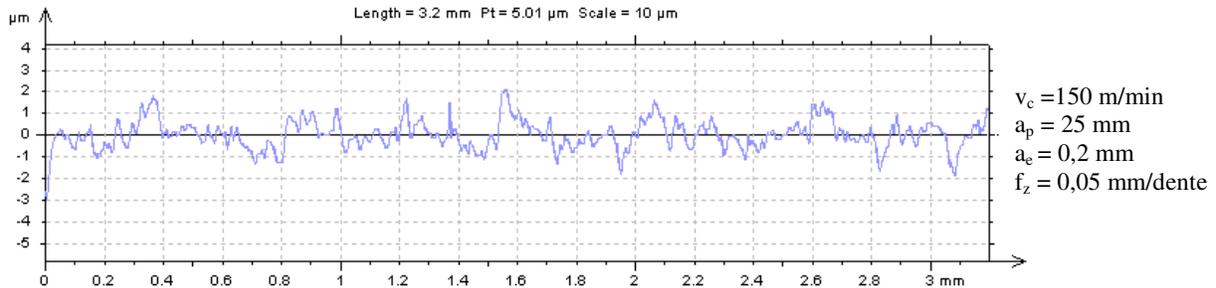


Figura 8. Perfil de uma superfície fresada

O gráfico da Figura 9 mostra a influência do avanço sobre os erros dimensionais para altura de 5 mm. Observa-se que houve menor retirada de material que o programado para todos os valores de avanço. Isto é explicado pelo fato de que quando se aumenta o avanço, aumentam-se os esforços sobre a fresa resultando em maior deflexão. Desta forma, a deflexão ultrapassa o valor do batimento radial, fazendo com que a ferramenta retire menos material da superfície usinada que o programado.

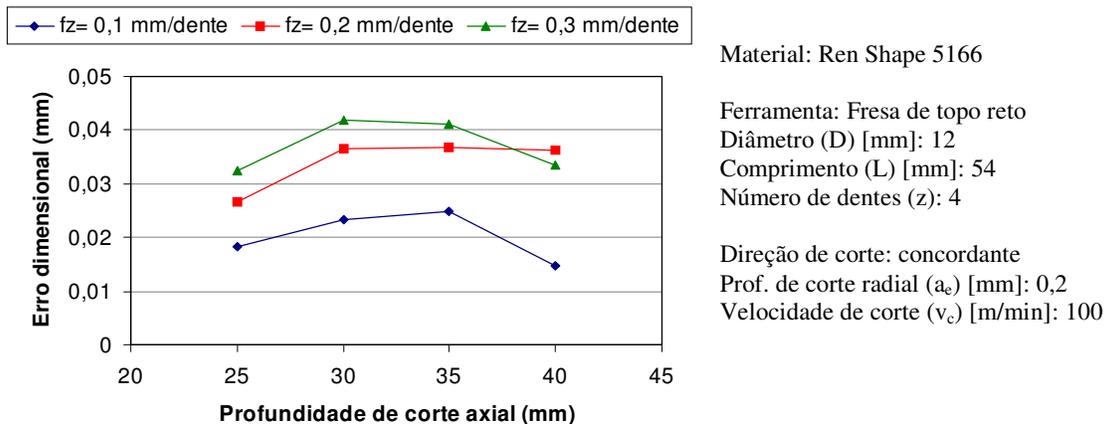


Figura 9. Erro dimensional em função do avanço para a altura de 5mm

O gráfico da Figura 10 mostra a influência do avanço sobre os erros dimensionais para altura de 20 mm. As curvas apresentam comportamento similar, porém para os menores avanços a deflexão da ferramenta ainda não compensa completamente a excentricidade, e as dimensões encontradas nestas condições são menores que as nominais. Já para o maior avanço, ocorre o inverso, resultando em maior retirada de material que o programado, o que se torna mais evidente à medida que se eleva a profundidade de corte axial.

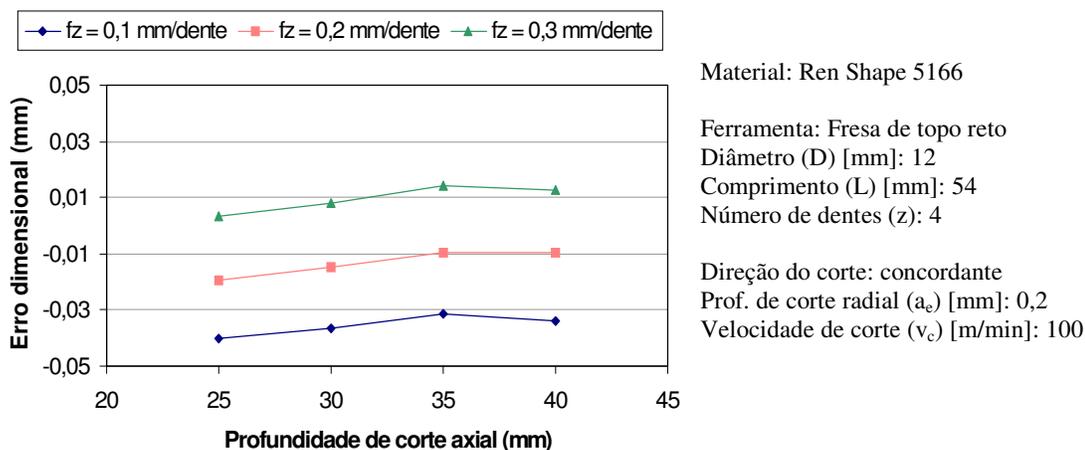


Figura 10. Erro dimensional em função do avanço para a altura de 20mm

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível verificar que nas condições de menores esforços de corte ocorre uma maior retirada de material devido à excentricidade da fresa. À medida que se aumentou a força de usinagem durante os ensaios, a deflexão da fresa atenuou os efeitos da excentricidade diminuindo o erro dimensional. Pôde ser verificado que este efeito foi mais significativo nas regiões próximas à extremidade da fresa. Para os maiores avanços a deflexão da fresa ultrapassou os valores de batimento radial, resultando em dimensão menor que o programado.

A partir disto, verificou-se que existe a possibilidade de que uma escolha adequada dos parâmetros de usinagem possa reduzir os erros dimensionais. Contudo, outros estudos mais aprofundados ainda precisam ser realizados, para que em uma etapa futura seja possível compensar estes erros diretamente no programa CNC.

#### 5. REFERÊNCIAS

1. YANG, M.Y.; RYU, S.G. Development of a composite suitable for Rapid Prototype machining. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 113, p. 280-284, 2001.
2. LANZ, R. W.; MELKOTE, S. N.; MAHESH, A. K. Machinability of rapid tooling composite board. **Journal of Material Processing Technology**, n.576, p. 1-4, 2002.
3. HILTON, P. D.; JACOBS, P. F. **Rapid tooling: Technologies and industrial applications**. 1. ed. London: Editora Marcel Dekker, Inc, 2000, 269 p.
4. ROSATO, D. V.; ROSATO, D. V., ROSATO, M. G. **Injection mold handbook**. 3. ed. London: Kluwer Academic Publishers, 2000, 1457 p.
5. AMORIM, J. R.; VOLPATO, N. Um estudo visando ampliar o campo de aplicação do ferramental rápido usinado. In: **III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005**, Joinville-SC. Anais do III COBEF, 2005.
6. ALTINTAS, Yusuf. **Manufacturing automation**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 288 p.
7. ARMAREGO, E. J. A.; DESHPANDE, N. P. Computerized End-Milling Force Predictions with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections. **Annals of the CIRP**, v. 40, n. 1, p. 25-29, 1991.
8. YANG, M. Y.; CHOI, J. G. A Tool Deflection Compensation System for End Milling Accuracy Improvement. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 120, n. 2, p. 222-229, 1998.

9. FENG, H. Y.; MENQ, C. H. A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 118, n. 4, p. 461-469, 1996.
10. SMITH, S.; TLUSTY, J. An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process. **Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME**, v. 113, n. 2, p. 169-175, 1991.
11. BUDAK, E.; ALTINTAS, Y. Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 34, n. 7, p. 907-918, 1994.

## **THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON DIMENSIONAL ERROR IN THE MACHINING OF POLYMERIC MATERIAL FOR PROTOTYPE TOOLING**

### **Milton Luiz Polli**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM/DAMEC/NUFER, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: polli@utfpr.edu.br.

### **Neri Volpato**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM/DAMEC/NUFER, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: nvolpato@utfpr.edu.br.

### **Joel Rodriguez de Amorim**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, DAMEC/NUFER, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: joelamorim@utfpr.edu.br.

### **Neville Paulo Chimenez Franzini**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, DAMEC, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: npcfranzini@hotmail.com.

**Abstract.** *The machining of polymeric inserts for prototype tooling is requiring a better understanding about the milling process of these materials. One particular requirement of the area is the need to machine and assemble, observing a tolerance range, some parts of the insert (small inserts) which have been divided in order to allow milling. In this work, an experimental study is carried out seeking to identify the cutting parameters influence on dimensional errors of polymeric resin side milling. The goal is to study the possible cause of these errors and then try to predict their behavior in order to minimized latter hand work. The commercial resin Ren Shape 5166 has been machined with a high speed steel end mill. It was analyzed the influence of depth of cut, cutting speed and cut direction on dimensional errors. The study shows that, in the tolerance range of interest, the tool eccentric assembly and deflection need to be considered in the machining process.*

**Keywords.** *milling, polymeric resins, dimensional errors*