



MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO FRESAMENTO EXTERNO DE MUNHÕES DE VIRABREQUIM

Rolf Bertrand Schroeter, Prof. Dr. Eng.

Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88010-970, rolf@lmp.ufsc.br

Angelo Marcos Gil Boeira, Eng. Mec.

Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88010-970, angelo@lmp.ufsc.br

Joel Martins Crichigno Filho, Dr. –Ing.

Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88010-970, crichigno@lmp.ufsc.br

Resumo. *O fresamento externo é um processo de usinagem com ferramenta de geometria definida empregado na fabricação de virabrequins e comandos de válvulas. Uma das aplicações do fresamento externo é a usinagem de superfícies cilíndricas, bem como perfis de revolução. A ferramenta apresenta-se na forma de disco, onde várias pastilhas são montadas em sua periferia em diferentes posições angulares com mesmo raio de afastamento em relação ao centro do disco de fresar. A velocidade de corte é composta pelas velocidades de rotação da peça e da ferramenta, sendo a velocidade de rotação da ferramenta muito maior que a da peça. Através da aplicação de modelos matemáticos e simulações, equaciona-se neste trabalho a cinemática do processo e o cálculo da espessura de cavaco teórico.*

Palavras-chave: *fresamento externo, usinagem, virabrequim, modelagem, simulação.*

1. INTRODUÇÃO

O virabrequim é um dos principais componentes constituintes de um motor de automóvel. Nos motores de combustão interna, a energia calorífica produzida pela queima de combustível na câmara de combustão é convertida em movimento de translação do pistão. Este movimento de translação é transmitido ao virabrequim, por meio da biela, e transformado em movimento de rotação. Por tratar-se de um componente de grande responsabilidade, o processo de fabricação deste componente apresenta várias etapas, desde furação até aplicação de processos especiais como torno-brochamento e fresamento externo.

O fresamento externo é aplicado na usinagem dos munhões do virabrequim. Esta operação torna-se complexa, pois consiste de uma usinagem fora de centro, onde o centro de usinagem da peça não coincide com o seu centro de giro. A complexidade desta operação está justamente no controle necessário para manter uma distância constante entre o centro de usinagem da peça e o centro da ferramenta.

O presente trabalho tem por objetivo um estudo mais aprofundado do fresamento externo por meio da modelagem e simulação da espessura de cavaco indeformado a partir da cinemática do processo.

A aplicação de ferramentas de simulação e de modelagem no estudo deste processo é justificada porque este tipo de fresamento é chave dentro da cadeia de fabricação de virabrequins, sendo uma das operações de usinagem mais importantes na fabricação dos munhões. Neste processo há um grande número de gumes atuantes, o que faz o mesmo apresentar um certo grau de complexidade tanto no seu entendimento quanto na sua operação. Para um trabalho prático, seriam então necessários muitos ensaios, o que o inviabilizaria técnica e financeiramente e demandaria muito tempo para a sua execução. Outro fator de motivação é que cada vez mais vem sendo dada ênfase à área de modelagem e simulação de processos de usinagem.

Com este estudo será possível um melhor entendimento do processo de fresamento externo de munhões e a partir dele, ser feitas propostas de otimização que propiciem um maior domínio do processo para que se alcance um melhor desempenho e uma maior vida das ferramentas.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Definição e características construtivas do virabrequim

O virabrequim é feito de aço forjado, aço fundido ou ferro fundido nodular, maleável ou cinzento, sendo constituído das seguintes partes principais:

- Mancais centrais (apoios);
- Mancais extremos (munhões);
- Contrapesos.

Além disso, os elementos são ligados por canais internos que têm por função transportar óleo lubrificante para os mancais.

2.2. Operações de usinagem dedicadas na fabricação do virabrequim

A usinagem do virabrequim é um procedimento complexo empregando vários processos. Alguns desses são dedicados, tendo aplicação específica para uma determinada operação, como é o caso do objeto de estudo deste trabalho: o fresamento externo do diâmetro dos munhões.

2.3. O fresamento externo

O fresamento externo é caracterizado pela rotação lenta do virabrequim ao redor da linha de centro do mancal principal, criando desta maneira um avanço de corte circular sobre o seu raio, enquanto a velocidade de corte requerida é proporcionada pela rotação do disco de fresar.

Para a usinagem dos munhões, o disco de corte segue o movimento excêntrico, enquanto fresa o seu diâmetro em um movimento linear, como mostrado esquematicamente na Fig. (1).

O avanço e a velocidade de corte são ajustados pela respectiva posição do munhão para obter a profundidade de corte correta, bem como uma força de corte balanceada. Dependendo da zona de contato, a velocidade de corte, em combinação com um avanço adequado, culmina em um tempo de usinagem extremamente curto (Sandvik-Coromant, sd).

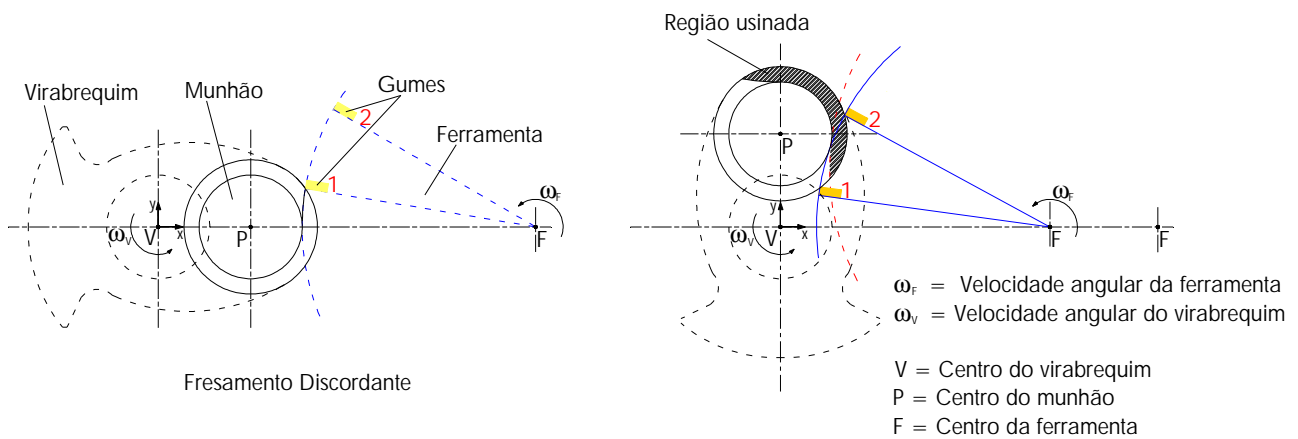


Figura 1. Representação esquemática do processo de fresamento externo discordante do munhão de virabrequim.

Na Fig. (2) pode ser vista a operação de fresamento externo, com dois discos de fresa atuando simultaneamente na usinagem dos munhões de um virabrequim.

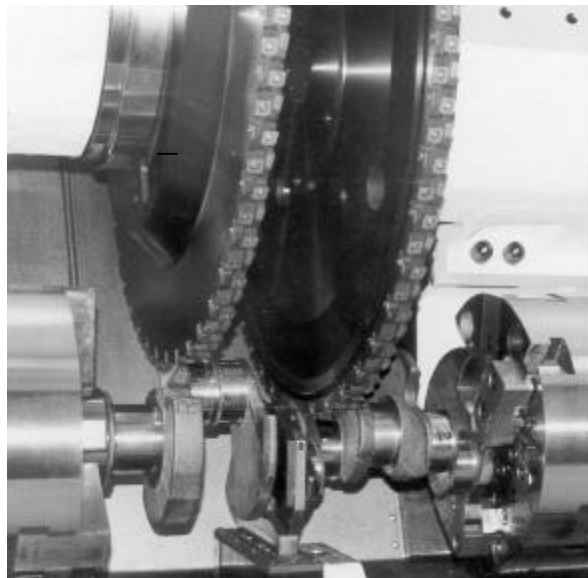


Figura 2. Fresamento externo de virabrequim (Boehringer, 2001).

2.4. Embasamento teórico sobre o processo de corte

Como descrito anteriormente, esse processo é complexo pelo fato de empregar várias ferramentas de corte, ou seja, vários gumes que trabalham em condições diferentes de engajamento. Para otimizar os resultados de trabalho de toda a ferramenta deve-se levar em conta o trabalho de cada gume em ação. Por isso é necessário um embasamento teórico do processo de corte através do conhecimento do mecanismo de formação de cavaco em cada gume da ferramenta.

O mecanismo de formação do cavaco para um gume da ferramenta pode ser descrito da seguinte forma: quando a ferramenta de corte (gume) começa penetrar na peça, o material da mesma é deformado elástica e plasticamente. Após atingir o limite máximo de cisalhamento, o material começa a escoar sobre a face da cunha de corte da ferramenta, formando assim o cavaco, como mostra a Fig. (3) (König, 1997).

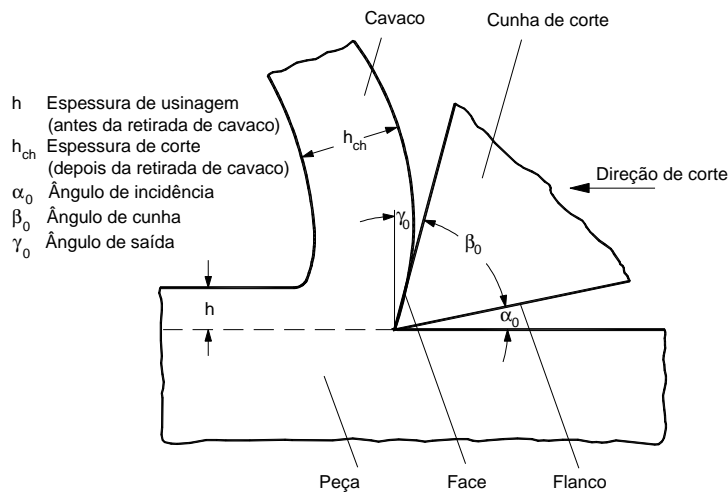


Figura 3. Representação esquemática da formação do cavaco (König, 1997).

Na interface ferramenta-peça-cavaco ocorrem fenômenos físicos e químicos em decorrência de solicitações térmicas e mecânicas relacionados às características do processo, à relação material da peça e da ferramenta e à geometria da ferramenta. Esses fenômenos influenciam em resultados de trabalho tais como a formação do cavaco, a integridade superficial da peça, o desgaste da ferramenta e outros.

As solicitações térmicas e mecânicas elevadas levam ao desgaste da ferramenta devido às condições de atrito na região de contato da ferramenta. De acordo com o estado da arte atual, distinguem-se várias causas influentes sobre o desgaste da ferramenta (König, 1997 e Stemmer 1993):

- Danificação do gume devido às solicitações mecânicas e térmicas excessivas;
- Abrasão mecânica;
- Adesão (cisalhamento de microsoldagem ou microcaldeamentos);
- Difusão;
- Oxidação.

Estes diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si.

O trabalho mecânico efetivo, empregado para a usinagem, é praticamente todo transformado em energia térmica, causando a elevação da sua temperatura, o que tem influência direta sobre os mecanismos de desgaste de difusão e oxidação, além de solicitações térmicas (choque térmico).

As solicitações mecânicas podem ser caracterizadas pelos esforços que ocorrem na cunha de corte durante a usinagem. A tensão máxima que atua em um determinado ponto na interface ferramenta/peça é a tensão crítica que determina as exigências para o material da ferramenta, sendo essencial o conhecimento da distribuição das tensões de compressão e de cisalhamento.

Desgastes como lascamento, fissuras transversais e longitudinais, deformações plásticas e remoção mecânica são influenciadas diretamente pelos esforços decorrentes do processo de usinagem.

2.5. Modelagem e simulação

2.5.1. Definição de simulação

A simulação consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas que, empregadas em computadores digitais, permitem imitar o funcionamento de praticamente qualquer tipo de operação ou processo (sistemas) do mundo real (Freitas, sd).

Segundo Schriber (1974) apud Freitas (sd), “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo”. Em uma definição mais completa, Pedgen (1991) apud Freitas (sd) define: “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Atualmente, entende-se simulação não só como um modelo, mas também como todo o método experimental que se segue, buscando:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas;
- Usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação (Freitas, sd).

2.5.2. Importância da simulação

A simulação de modelos permite inferir questões do tipo “O que aconteceria se?”. Talvez o principal apelo deste tipo de ferramenta seja que tais questões podem ser respondidas sem que os sistemas sob observação sofram qualquer perturbação, uma vez que os estudos são realizados num computador. Mais ainda, a simulação computacional permite que tais estudos sejam realizados sobre sistemas que ainda não existem, permitindo o desenvolvimento de projetos eficientes antes que qualquer construção ou mudança física tenha sido iniciada. Este estudo simulado permite economia de tempo e recursos no desenvolvimento de projetos, trazendo ganhos de produtividade e qualidade.

Normalmente costuma-se desenvolver e experimentar com modelos de simulação objetivando o encaminhamento de uma solução a um dado problema. As razões mais comuns para se experimentar com modelos simulados são as seguintes (Freitas, sd):

- Sistema modelado ainda não existe. Neste caso a simulação poderá ser usada para planejar o futuro sistema;
- Experimentar com o sistema real é dispendioso. O modelo poderá indicar a viabilidade ou não de implementação do sistema real, com custo muito menores;
- A experimentação com o sistema real é inapropriada. Quando é inviável a realização de testes com o sistema real.

2.5.3. Tipos de modelos

A modelagem de um sistema dependerá, fundamentalmente, do seu propósito e complexibilidade. Vários tipos de modelos podem ser empregados, tais como matemáticos, descritivos, estatísticos e tipo entrada e saída (Freitas sd).

Geralmente, a modelagem em usinagem visa a obtenção de uma boa performance do processo, de qualidade da peça e obtenção de alta produtividade e/ou baixos custos de produção através do projeto e controle da operação (Peng e van Luttervelt, 1999).

Modelos de operações de usinagem podem ser usados para:

- Projeto e planejamento de processos;
- Otimização de processos;
- Controle de processos;
- Simulação de processos;
- Projeto de equipamentos.

A Tabela (1) mostra como podem ser classificados os modelos, baseado nos parâmetros característicos de usinagem:

Tabela 1 – Tipo de modelo (Peng e van Luttervelt, 1999).

Tipo	Entrada
A	Resultado de usinagem
B	Condições de processo

De acordo com o aspecto das operações de usinagem, os modelos existentes podem ser classificados como mostra a Tab. (2).

A simulação dos resultados de trabalho ou condições do processo pode ser empregada visando determinar os níveis ótimos dos parâmetros de entrada para obter as exigências requeridas de fabricação do virabrequim, possibilitando a diminuição ou eliminação de ensaios. Além disso, uma correções do processo, em caso de desvios dos resultados, podem ser efetuadas mais rapidamente.

Mais do que nunca a simulação computacional tem sido empregada, principalmente pela facilidade de uso e sofisticação dos ambientes de desenvolvimento de modelos computacionais, aliado ao poder de processamento das estações de trabalho.

O fresamento externo é um dos processos de usinagem mais empregados na obtenção dos mancais principais e dos munhões dos virabrequins. É um processo complexo onde um grande número de gumes atua. Por isso, seria necessário muito tempo e ensaios práticos para um trabalho de pesquisa que oferecesse resultados confiáveis, o que inviabilizaria técnica e financeiramente o mesmo. Tal fato justifica o emprego de técnicas de simulação e modelagem no estudo deste processo.

Tabela 2 – Tipos de modelos de operações de usinagem (Peng e van Luttervelt, 1999).

Modelagem (aspectos/elementos)	Tipo do modelo
Força de corte (força/torque/potência)	B
Cavaco (forma/quebra do cavaco)	B
Ferramenta (desgaste/vida)	A
Tensões (esforço)	B
Superfície (rugosidade/integridade)	A
Temperatura	B
Componente (precisão)	A
Vibração	B

É também de importância como motivação para esta pesquisa o fato de ser dada cada vez mais ênfase à área de modelagem e simulação de processos de usinagem, observando-se esta tendência atual tanto em termos de pesquisa como na própria indústria.

3. MODELO EMPREGADO

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho para o estudo do fresamento externo veio das observações feitas sobre o mesmo, com relação à trajetória descrita pela ferramenta durante o processo de corte.

Na Fig. (4) está representado o modelo cinemático utilizado para descrever a trajetória de dois gumes sucessivos do disco de fresa empregado no processo de fresamento externo do munhão. Para tanto, foram primeiramente estabelecidas as variáveis de entrada e saída, conforme mostrado na Tab. (3).

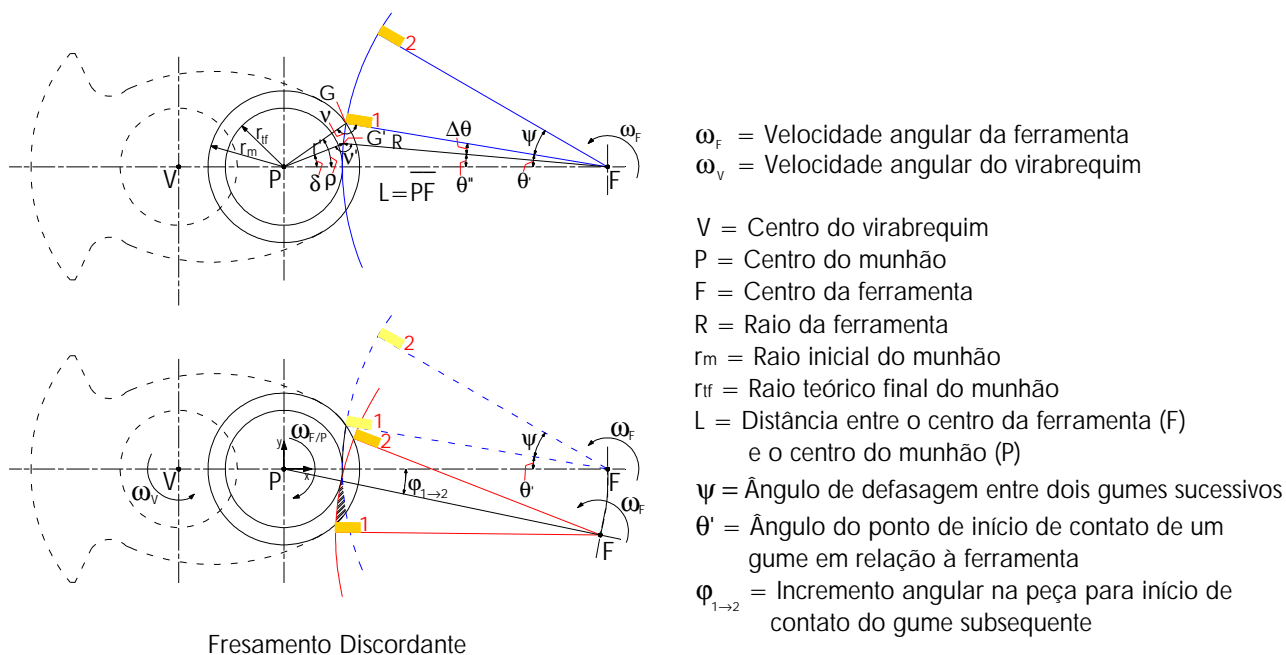


Figura 4. Representação do modelo cinemático da trajetória de dois gumes sucessivos para o fresamento discordante.

Tabela 3. Variáveis de entrada e de saída

Nome	Símbolo	Classificação	
		Entrada	Saída
Velocidade angular da ferramenta (rad/s)	ω_F	X	
Velocidade angular do virabrequim (rad/s)	ω_V	X	
Raio inicial do munhão (m)	r_m	X	
Raio da ferramenta (m)	R	X	
Profundidade inicial de aproximação da ferramenta (m)	a_{pi}	X	
Ângulo de defasagem entre dois gumes sucessivos (rad)	ψ	X	
Espessura do cavaco teórico (m)	h		X
Comprimento de contato (m)	lc		X
Espessura máxima do cavaco teórico (m)	$h_{m\acute{a}x}$		X

Estas variáveis foram equacionadas, chegando-se aos seguintes resultados principais, expressos pela Eq. (1), para o cálculo do ângulo de início de contato do gume em relação à ferramenta e pela Eq. (2), para descrição da variação do raio da trajetória após o engajamento da ferramenta no munhão:

$$q' = a \cos\left(\frac{R^2 + L^2 - r_m^2}{2 * R * L}\right) \quad (1)$$

$$r' = \sqrt{R^2 + L^2 - 2 * R * L * \cos(q'')} \quad (2)$$

Estes modelos matemáticos da cinemática do processo foram implementados numa ferramenta de matemática computacional, o que permitiu a simulação da trajetória da ferramenta em relação ao

munhão. Na Tab.(4) está mostrado o algoritmo utilizado na modelagem e simulação do processo de fresamento externo.

Tabela 4. Algoritmo de simulação e modelagem do processo de fresamento externo

Entradas	
Velocidade angular da ferramenta (rad/s)	ω_F
Velocidade angular do virabrequim (rad/s)	ω_V
Raio inicial do munhão (m)	r_m
Raio da ferramenta (m)	R
Profundidade inicial de aproximação da ferramenta (m)	a_{pi}
Ângulo de defasagem entre dois gumes sucessivos (rad)	ψ
Número de incrementos	t
Saídas	
Espessura do cavaco teórico (m)	h
Comprimento de contato (m)	lc
Espessura máxima do cavaco teórico (m)	$h_{m\acute{a}x}$
Variáveis	
$q' = a \cos\left(\frac{R^2 + L^2 - r_m^2}{2 * R * L}\right)$	Ângulo do ponto de início de contato de um gume em relação à ferramenta [rad]
$\Delta q = \frac{2 * q'}{t}$	Varição incremental do engajamento do gume da peça
q'' varia Δq de q' até $-q'$	Varição do engajamento do gume na peça do início ao fim do contato do gume no munhão
$r' = \sqrt{R^2 + L^2 - 2 * R * L * \cos(q'')}$	Raio de variação da trajetória da ferramenta em relação ao munhão
$b = a \sin\left(\frac{R}{r' * \sin(q'')}$	Ângulo de posição do raio de variação da trajetória em relação ao munhão
$Plotar(b, r')$	
Fim	

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Os resultados obtidos são expostos a seguir. Na Fig. (4) é mostrada a trajetória de vários gumes sucessivos para um dado giro do virabrequim. Na Fig. (5) é mostrado o comportamento da profundidade de corte do cavaco teórico, em função do comprimento de contato da ferramenta com a peça. Deste gráfico pode-se observar que a espessura de cavaco aumenta em decorrência da penetração do gume da ferramenta em torno de 13 mm de comprimento de contato, diminuindo até chegar a 0 mm.

As condições simuladas foram: rotação da ferramenta $n_F = 106$ rpm, rotação do virabrequim $n_V = 10,97$ rpm, raio inicial do munhão $r_m = 25$ mm, diâmetro da ferramenta $D = 700$ mm, ângulo de defasagem entre dois gumes $\psi = 45^\circ$, profundidade de corte inicial $a_{pi} = 5$ mm e fresamento discordante.

Trajétórias geradas para o corte discordante do munhão

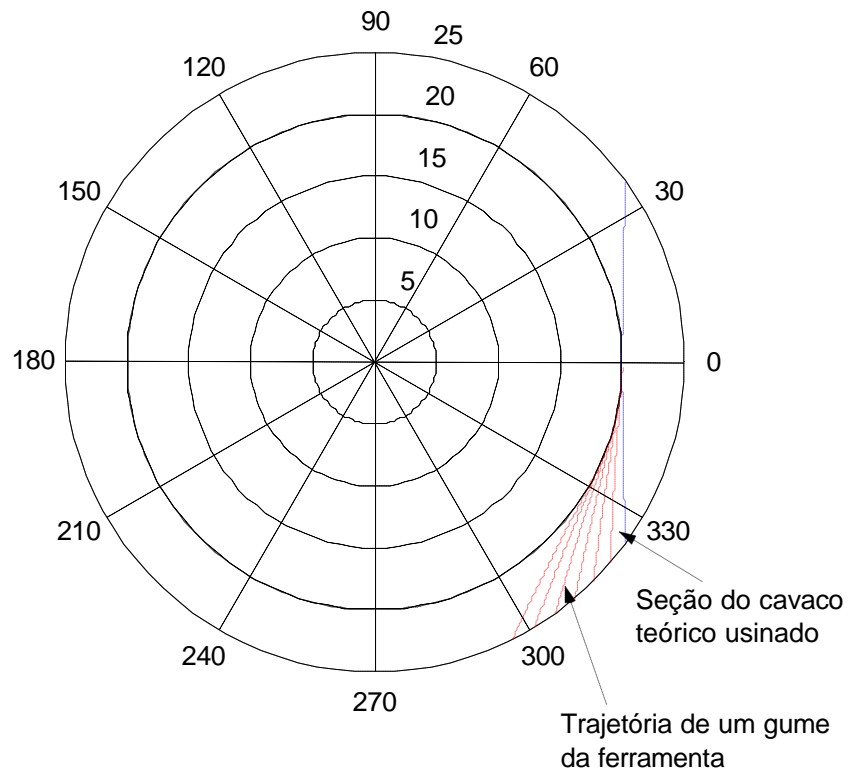


Figura 4. Trajetórias geradas, em relação ao munhão, para um dado incremento angular do virabrequim, corte discordante.

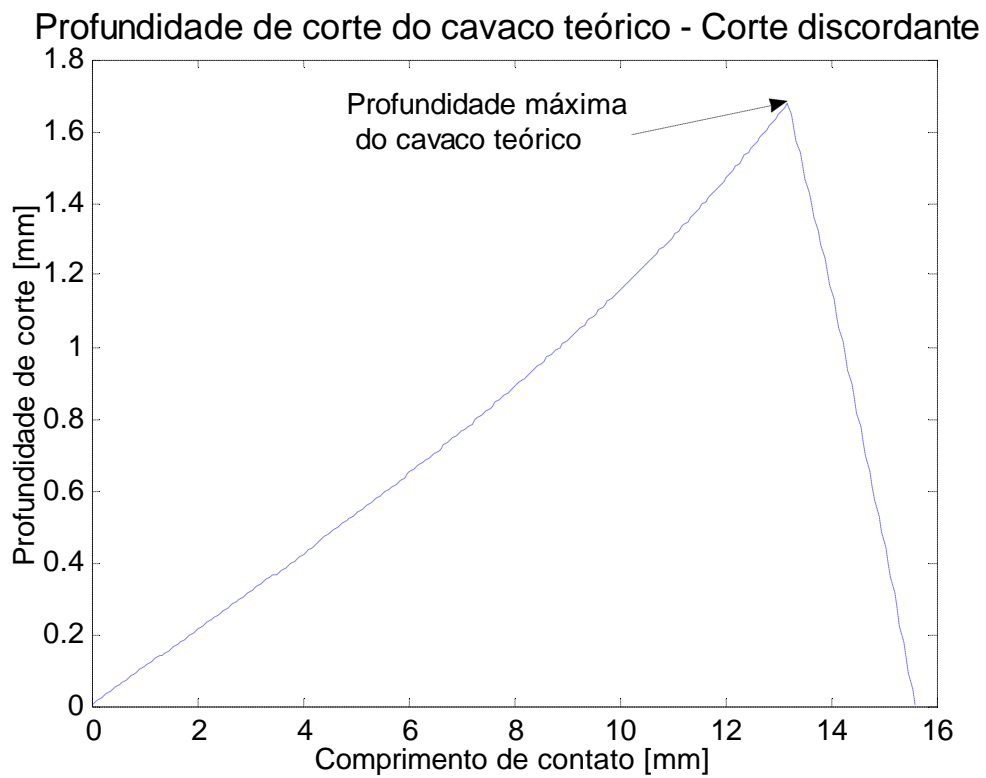


Figura 5. Variação da profundidade de corte do cavaco teórico, corte discordante.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi possível a simulação do processo de fresamento externo através da implementação de um modelo da cinemática do processo, desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão, implementado numa ferramenta de matemática computacional, que descreveu, da maneira prevista, o processo teórico de formação do cavaco.

O processo teórico de formação de cavaco foi, com isto, descrito de maneira a possibilitar respostas para várias questões a respeito do sistema real. Já nesta primeira etapa, foi possível a determinação do modo de formação do cavaco teórico. A partir da geometria deste cavaco teórico será possível, numa etapa posterior, o emprego de modelos que permitam a análise de solicitações térmicas e mecânicas que atuam durante o processo de fresamento externo dos munhões.

6. REFERÊNCIAS

- Boehringer, 2001, Technologies for Crankshaft Machining, Boe 407/e/07, Alemanha.
- Freitas Fº, P. J., “Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas”, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Informática e Estatística, Apostila, p. 1-16.
- König, W., 1997, “Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Böhren”. Düsseldorf: 5. ed. VDI. 416 p.
- Peng, V., van Luttervelt, C. A., 1999 “Symbiosis of Modeling and Sensing to Improve the Accuracy of Workpieces in Small Batch Machining Operations”, Advanced Manufacturing Technology, n. 15, p. 699-710.
- Sandvik-Coromant. Tools for Crankshaft and Camshaft Machining, C-340:824 ENG, Alemanha.
- Stemmer, C. E., 1993, “Ferramentas de corte I”, 3. ed. Florianópolis: Ed. UFSC. 249 p.

Modeling and simulation of external milling of crankshaft crank-pin

Rolf Bertrand Schroeter, Prof. Dr. Eng.

Precision Mechanics Laboratory, Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88010-970, rolf@lmp.ufsc.br

Angelo Marcos Gil Boeira, Eng. Mec.

Precision Mechanics Laboratory, Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88010-970, angelo@lmp.ufsc.br

Joel Crichigno Filho, Dr. –Ing.

Precision Mechanics Laboratory, Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88010-970, crichigno@lmp.ufsc.br

***Abstract.** The external milling is a machining process with defined geometry edge applied in crankshafts and camshafts manufacturing. One of the applications of the external milling is the machining of cylindrical surfaces, as well rotational profiles. The tool has a disc format, where several inserts are fixed on the circumference in different angular positions with the same spacing radius with regard to the milling disc center. The tool and the workpiece rotate at different angular velocity, where the tool rotates much faster. By the application of mathematical models and simulations, this work aims the deduction of the process kinematics and the theoretical chip thickness for several process parameters.*

***Keywords:** external milling, machining, crankshaft, modelling, simulation.*