

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TORNO-BROCHAMENTO

Cleyzer Marcondes Bastos, Eng. Mec.

Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88.010-970. Tel: 0xx(48)3319395.

e-mail: cleyzer@lmp.ufsc.br

Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil, Caixa Postal 476 – EMC – 88.010-970. Tel: 0xx(48)3319395.

e-mail: rolf@lmp.ufsc.br

Resumo. Anualmente mais de 55 milhões de automóveis com motores de combustão interna são fabricados no mundo, sendo que cada vez maiores exigências nos projetos e menores custos de produção são exigidos. No caso da fabricação de virabrequins, o desenvolvimento dinâmico dos últimos 15 anos em novos conceitos de fabricação evidencia o esforço na busca por melhores alternativas de manufatura. Dentre estas, o torno-tornobrochamento é um processo de fabricação de virabrequins relativamente novo, que combina a concepção convencional de torneamento, para o processo de desbaste, e o torno-brochamento como processo de pré-acabamento para a posterior retificação. Por se tratar de um processo amplamente utilizado na usinagem de virabrequins, este trabalho tem como objetivo o estudo do processo torno-brochamento através da modelagem da cinemática, da dinâmica do processo de corte e da realização de experimentos que validem os modelos elaborados. Assim, a partir deste estudo será possível avaliar a influência de parâmetros de entrada sobre o processo de formação de cavaco, erros de forma, esforços de usinagem e deflexão do virabrequim durante o processo. Ensaaios preliminares de torno-brochamento mostraram forte equivalência entre os valores de força de corte experimentais e os obtidos através de simulações.

Palavras chave: simulação, torno-brochamento, virabrequim.

1. INTRODUÇÃO

Anualmente mais de 55 milhões de automóveis com motores de combustão interna são fabricados no mundo. Nestes motores a energia proveniente da combustão nos cilindros é transformada do movimento linear para o rotativo através do sistema composto por pistão, biela e virabrequim.

As exigências de maior potência e estabilidade no projeto de motores refletem-se diretamente sobre estes componentes. Estas exigências são essencialmente maiores potências, motores de tamanho reduzido e maior rendimento, ou seja, poucas perdas mecânicas e baixo peso. Isto influencia diretamente nas características construtivas destes componentes, como por exemplo nas

dimensões, na qualidade do material, no processo de obtenção das superfícies, bem como nas características tribológicas das superfícies em contato.

Simultaneamente, a necessidade de redução de custos de produção de tais componentes resulta na otimização das alternativas de fabricação existentes. No caso da fabricação de virabrequins, o desenvolvimento dinâmico dos últimos 15 anos, do torneamento para o torno-brochamento linear, para o torno-brochamento rotativo, para o torno-tornobrochamento e retornando para o processo de torneamento dos mancais e fresamento externo dos munhões, demonstra o esforço na busca por melhores alternativas para a produção em série de virabrequins, segundo Sandvik GmbH (2003).

Como resultado desta busca constante da qualidade e da redução dos custos de produção, surge o desenvolvimento de novos conceitos de processos de fabricação, juntamente com o desenvolvimento de novas máquinas-ferramentas. Em certas linhas de produção de virabrequim na indústria automobilística, é utilizado o processo de fresamento externo para a usinagem dos munhões e o processo de torno-tornobrochamento para a usinagem dos mancais.

O processo de torno-tornobrochamento é um processo de fabricação relativamente novo, sendo empregado principalmente na indústria automobilística a partir dos anos 90. Este processo combina a concepção convencional do processo de torneamento, como processo de desbaste, e o torno-brochamento, como processo de pré-acabamento para a posterior retificação. Neste processo a ferramenta realiza somente uma vez o processo de corte, podendo, desta forma, obter o perfil final da peça em apenas um ciclo do suporte de ferramentas de torno-tornobrochamento.

Por se tratar de um processo amplamente utilizado na usinagem de virabrequins, este trabalho tem como objetivo o estudo do processo de pré-acabamento por torno-tornobrochamento através da modelagem da cinemática, da dinâmica do processo de corte e da realização de experimentos que validem os modelos elaborados.

A partir deste estudo será possível avaliar a influência de certos parâmetros de entrada como velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte e desgaste da ferramenta sobre erros de forma resultante do processo, esforços de usinagem, deflexão do virabrequim e outros aspectos tecnológicos.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO DO PROCESSO

O processo de torno-brochamento caracteriza-se por apresentar diversas ferramentas fixadas em um mesmo suporte, que realiza o movimento de avanço de corte abaixo da linha de centro do mancal, em sentido contrário ao giro do mancal (corte discordante) ou no mesmo sentido (corte concordante). Durante o processo, o mancal apresenta valores de rotação equivalentes aos utilizados em processos de torneamento e cada inserto da ferramenta de brochar realiza o processo de corte em apenas um passe.

A retirada de material do mancal durante a usinagem é realizada de forma contínua, à medida que a ferramenta é engajada neste, e pode ser dividida em três etapas (I, II e III), conforme Berkold (1992). A Figura (1) mostra estas etapas, onde o processo é visto em um plano perpendicular ao eixo do virabrequim.

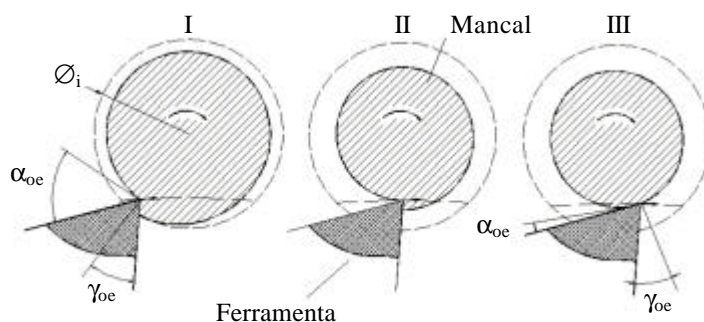


Figura 1 - Formação do cavaco (Berkold, 1992)

Etapa I - Esta etapa corresponde ao tempo que a ferramenta inicia o processo de corte movimentando-se abaixo da linha de centro do mancal até que o primeiro ponto usinado, ou seja, a região do mancal onde a ferramenta efetuou o primeiro contato passe novamente sobre a linha que liga o centro do mancal à ponta da ferramenta. Este tempo é aproximadamente de uma rotação, pois a rotação do mancal é bem superior à rotação do disco de corte. Em outras palavras, a etapa I corresponde ao tempo para que toda a periferia do mancal com raio igual ao inicial (\varnothing_i) seja usinada. Nesta etapa a espessura teórica de usinagem aumenta à medida que a ferramenta realiza o movimento de avanço, atingindo um valor máximo ($h_{m\acute{a}x}$) no final desta etapa.

Etapa II - Esta etapa corresponde ao tempo que a ferramenta leva desde o fim da primeira etapa até atingir a linha que liga o centro do mancal ao centro do disco de corte. Nesta etapa a espessura teórica de usinagem diminui com o tempo, pois a variação do comprimento do raio que liga o centro do mancal e a quina da ferramenta é inferior à variação do comprimento do raio externo do mancal na região de corte.

Etapa III - Corresponde ao tempo que inicia no fim da segunda etapa até não haver mais contato da ferramenta com o mancal. Verifica-se de forma ampliada na Fig. (1) que após o processo de corte o mancal apresenta um erro de forma provocada pela própria natureza do processo. No final desta etapa, o ângulo de incidência deve apresentar um valor suficiente para que não haja intenso atrito do flanco da ferramenta com a superfície do mancal, e o erro de forma resultante da cinemática do processo dependerá das condições de corte e do diâmetro do mancal.

No processo de torno-tornobrochamento ocorre a combinação dos processos de torneamento e torno-brochamento, onde ambas as ferramentas de torneamento e torno-brochamento são fixadas na periferia de um suporte circular de ferramentas. O processo de torneamento é realizado pelo movimento de avanço do suporte transversalmente à peça, similar a operação de sangramento, e o processo de torno-brochamento pelo movimento rotacional do disco de corte tangencialmente à peça conforme descrito anteriormente. Neste processo o torneamento é utilizado na operação de desbaste, enquanto que o torno-brochamento realiza o pré-acabamento do mancal para a posterior retificação conforme Berkold (1992) e Augsten (1990).

Uma montagem típica das ferramentas sobre o disco está ilustrado na Fig. (2), onde as ferramentas de 1 a 4 realizam o processo de desbaste por torneamento e as ferramentas 5 a 6 são usadas para o processo de torno-brochamento de pré-acabamento de acordo com Augsten (1990).

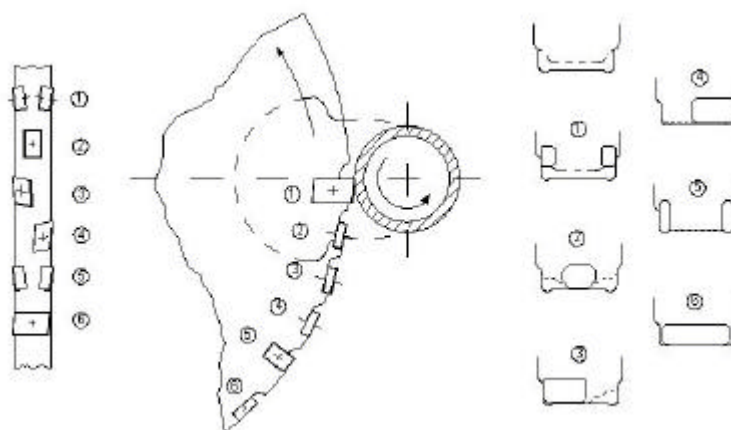


Figura 2 - Configuração da ferramenta de torno-tornobrochamento, Augsten (1990)

No processo de torno-tornobrochamento, a ferramenta que realiza a operação de torno-brochamento de pré-acabamento do diâmetro do mancal, que corresponde a ferramenta número 6 da Fig. (2), apresenta certo valor de inclinação do gume com o objetivo de atenuar os esforços de usinagem, conforme ilustra a Fig. (3). Como resultado desta inclinação, há durante o processo de corte uma variação tanto da espessura como da largura de usinagem.

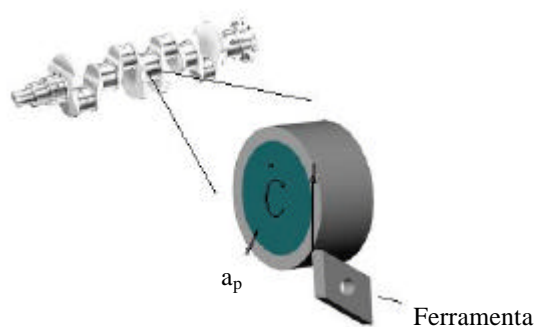


Figura 3 - Ferramenta com inclinação do gume para a usinagem dos mancais

3. MODELAGEM DA CINEMÁTICA DO PROCESSO

A modelagem da cinemática do processo de corte por torno-brochamento tem como objetivo quantificar características tecnológicas do processo de corte, como espessura de usinagem, variação dos ângulos efetivos de entrada e de saída, erro de forma e área de corte a partir de dados de entrada, como geometria da ferramenta, rotação da peça, rotação do disco de corte e a profundidade de corte.

A modelagem da cinemática do processo de corte foi realizada no software comercial MATLAB e as equações utilizadas são relações trigonométricas, que descrevem o posicionamento da ferramenta em relação à peça em sucessivos intervalos de tempo.

Devido às variações tanto na espessura como na largura de usinagem no decorrer do processo, os modelos da cinemática e da dinâmica foram primeiramente analisados em um plano perpendicular ao eixo do virabrequim e posteriormente para toda a região de corte. No caso da ferramenta de pré-acabamento de torno-brochamento, a qual apresenta uma inclinação do gume, a espessura de usinagem teórica do cavaco em relação ao tempo, observada sobre um plano posicionado em qualquer ponto do gume da ferramenta e perpendicular ao eixo do mancal, apresentará comportamento idêntico para todos os pontos do gume. Entretanto os planos subsequentes mostrarão a formação do cavaco com um certo atraso, ocasionado pela inclinação do gume da ferramenta e devido ao movimento de avanço, conforme ilustra a Fig (4).

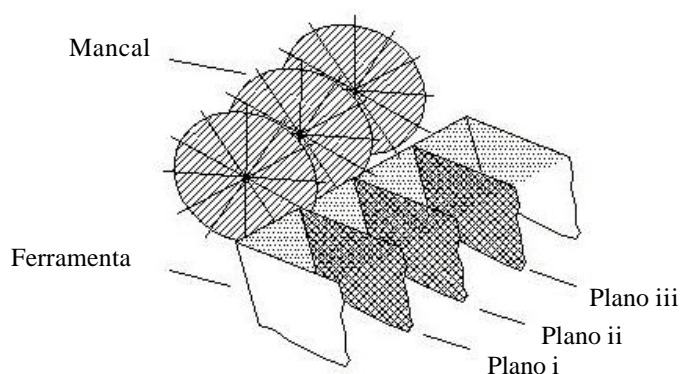


Figura 4 - Planos da ferramenta a serem modelados (Berktoold, 1992)

3.1 Espessura Teórica de Usinagem

A espessura teórica de usinagem no plano perpendicular ao eixo do virabrequim, obtida com a simulação do processo de torno-brochamento, possibilita verificar se o processo de corte ocorre

acima da espessura teórica mínima de usinagem e é posteriormente usada para o cálculo da força teórica de corte.

A espessura mínima de usinagem (h_{\min}) representa a menor espessura necessária para que haja condições de remoção de material devido ao arredondamento do gume em toda a sua extensão. A porção de material com espessura inferior à espessura mínima de usinagem (h_{\min}) é, ao invés de cortada, deformada elástica e plasticamente pelo gume. Para uma remoção segura de cavacos em ferramentas com gumes arredondados ou chanfrados, o valor recomendado para espessura mínima de usinagem (h_{\min}) é de 2 a 3 vezes o raio do gume (ρ_β), conforme König e Klocke (1997).

A Figura 5 ilustra à esquerda uma ferramenta seccionada em um plano perpendicular ao gume, juntamente com uma escala-padrão utilizada como referência. Na mesma figura à direita está representada a simulação da espessura teórica de usinagem no processo de torno-brochamento em azul, onde o eixo das abscissas corresponde ao número de rotações do virabrequim durante o processo de corte visto em um plano perpendicular ao eixo da peça. Em vermelho está representado o valor da espessura mínima teórica de corte, adotada como duas vezes o raio do gume da ferramenta. Os parâmetros de corte adotados são semelhantes aos usualmente empregados na indústria automobilística.

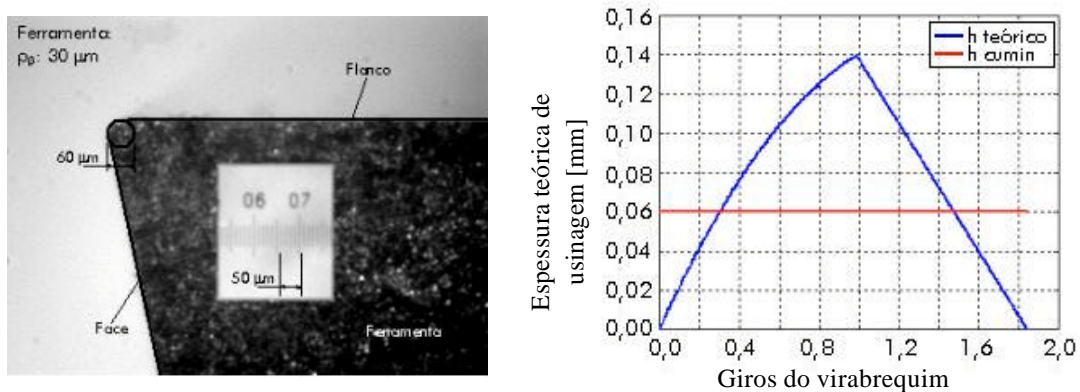


Figura 5 - Raio do gume da ferramenta (ρ_β) e espessura de usinagem

3.2 Variação dos Ângulos de Incidência e de Saída Efetivos

Em decorrência da cinemática do processo, os valores dos ângulos ortogonais efetivos de incidência e de saída variam ao longo do mesmo. O ângulo ortogonal de incidência efetivo apresenta um máximo com a entrada da ferramenta no mancal e vai diminuindo à medida que esta se desloca com a rotação da disco de corte. Ou seja, com o movimento de avanço da ferramenta o ângulo ortogonal de saída efetivo apresenta menores valores no início de corte e aumenta com o movimento de avanço da ferramenta. A Figura 6 mostra a variação destes ângulos no decorrer do processo para as mesmas condições de corte utilizadas na simulação da espessura teórica da Fig. (6) e com o ângulo de incidência ortogonal de montagem da ferramenta de $3,5^\circ$.

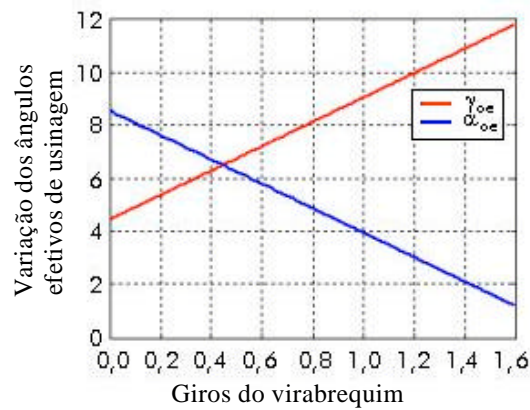


Figura 6 – Variação dos ângulos de incidência e saída efetivos

3.3 Erro de Forma

O erro de forma resultante do processo de torno-brochamento é resultante da própria cinemática do processo de corte. Quando a quina da ferramenta estiver abaixo da linha de centro do mancal, ou seja, no final da etapa II, o mancal terá o menor raio possível e caso a ferramenta permanecesse neste ponto durante uma rotação do mancal, este apresentaria teoricamente um formato cilíndrico. Entretanto a ferramenta continua o seu movimento de avanço sobre a peça e o formato teórico final do mancal é ligeiramente aproximado ao de um came.

O erro de circularidade resultante da cinemática do processo de torno-brochamento corresponde à distância entre as circunferências inscritas e circunscritas no perfil da peça. Simulando o erro de circularidade decorrente do processo, para um plano do gume e perpendicular ao eixo da peça, na faixa de valores de 100 a 300 °/min do disco de corte e de 600 a 1200 rpm da peça para um diâmetro final da peça em torno de 50 mm, obtém-se o comportamento demonstrado na Fig (7).

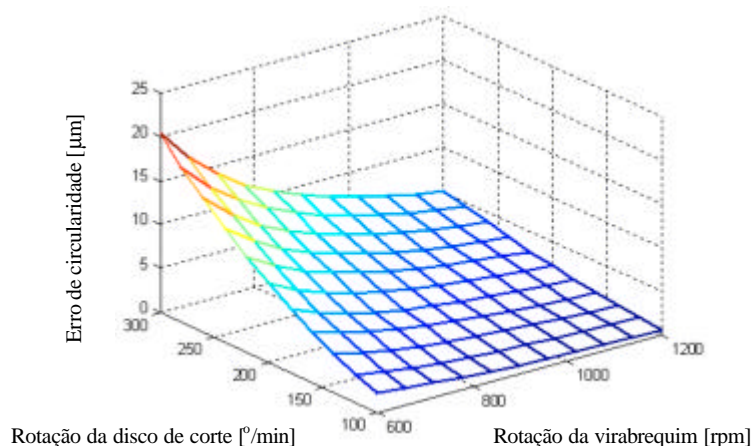


Figura 7 - Erro de circularidade

Verifica-se na figura que com o aumento da rotação do disco de corte e com a diminuição da rotação do virabrequim ocorre um aumento do erro teórico de circularidade.

4. MODELAGEM DA DINÂMICA

Durante o processo de usinagem, surge uma pressão na região de contato entre a peça e a ferramenta resultante do mecanismo de formação de cavaco. Este esforço atua sobre o sistema

máquina-ferramenta-peça e, como consequência destes esforços, podem surgir deflexões e influenciar na integridade da ferramenta, assim como na precisão do processo.

As forças resultantes do processo de pré-acabamento de torno-tornobrochamento durante a usinagem correspondem à força de corte tangencial a peça (F_c) e às forças normal (F_n) e axial (F_a) ao virabrequim representadas na Figura (8).

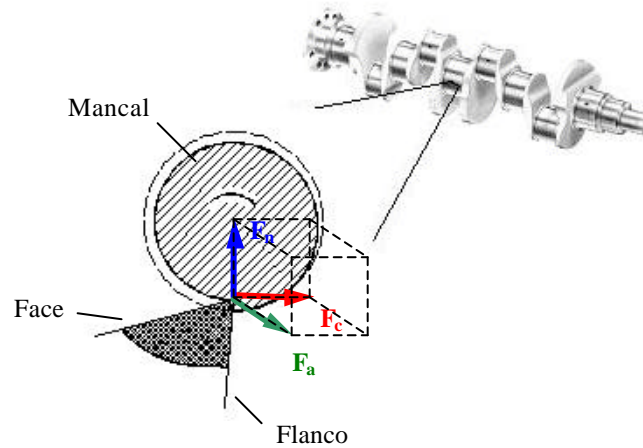


Figura 8 - Forças de usinagem no processo de torno-brochamento

Para determinar estes esforços, modelos de força já desenvolvidos para diversos processos de corte relacionam os esforços de usinagem a certos parâmetros tecnológicos. Dentre estes, o modelo de Kienzle, que corresponde ao modelo utilizado neste trabalho na modelagem da força de corte, propõe uma fórmula bastante simples descrita na Eq. (1).

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \quad (1)$$

Onde:

h: espessura de corte [mm];

b: largura de corte [mm];

$k_{c1.1}$: pressão específica de corte para um cavaco de área igual a 1 mm²;

$1-m_c$: expoente da equação de Kienzle;

F_c : força de corte.

Verifica-se pela Eq. (1) que as dimensões de usinagem são o fator de influência preponderante na força de corte e, segundo Stemmer (1993), a fórmula de Kienzle se mostra válida para o cálculo de força de corte nos diversos processo de usinagem com espessura h constante do cavaco, como em torneamento, furação e brochamento, bem como em processos de usinagem com espessura variável, como no caso do fresamento.

Na modelagem da força de corte no processo de torno-brochamento através do modelo de Kienzle, os parâmetros $k_{c1.1}$ (pressão específica de corte) e $1-m_c$ (expoente da equação de Kienzle) foram obtidos através de ensaios de torneamento variando o avanço para uma determinada largura de corte. A vantagem de realizar experimentos de torneamento para a obtenção destes parâmetros consiste no fato de que a espessura e largura de usinagem são constantes neste processo.

A metodologia empregada para a modelagem da força de corte foi a mesma que a utilizada na modelagem da cinemática, onde a força de corte é modelada primeiramente em um plano perpendicular ao eixo do virabrequim e em seguida para os planos subsequentes, conforme ilustra a Fig. (8). Para cada plano o valor de espessura de usinagem no modelo da força de corte foi obtido através da simulação da cinemática e o valor da largura de corte igual à distância entre os planos.

O gráfico no centro da Fig. (9) mostra de forma esquemática as forças para os n planos da ferramenta, onde somando-se posteriormente estas curvas, obtém-se a força teórica de corte modelada a partir do modelo de Kienzle, representada à direita da Fig. (9).

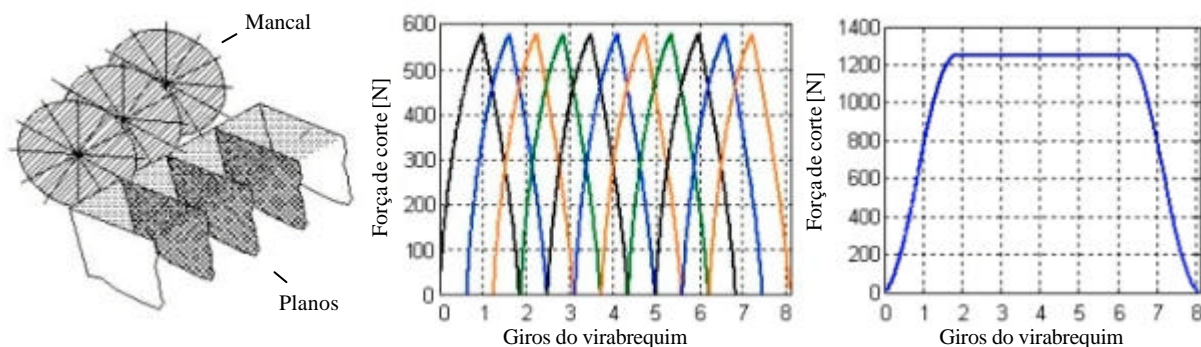
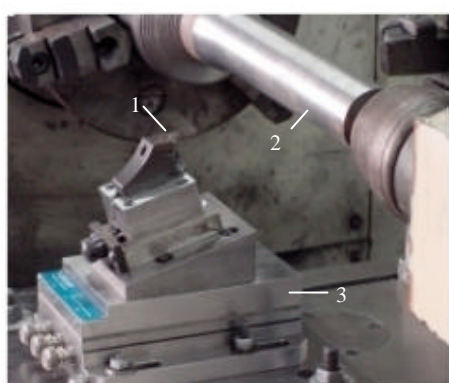


Figura 9 - Planos para análise da força de corte

5. ENSAIOS DE TORNO-BROCHAMENTO

Com o objetivo de validar o modelo elaborado para a cinemática e dinâmica do processo de corte por torno-brochamento, projetou-se um sistema que fixa a ferramenta de corte, juntamente com uma plataforma piezelétrica, sobre a mesa transversal de um torno. Este sistema realiza um movimento linear e transversal abaixo da linha de centro da peça, fixado entre a castanha e a contra-ponta, de diâmetro próximo aos mancais de virabrequim. Considerando a rotação da peça e o avanço transversal da ferramenta no torno iguais aos valores de rotação do virabrequim e do movimento de avanço da ferramenta de torno-brochamento realizado em indústrias automobilísticas, o processo de corte realizado no torno representa de forma aproximada o processo real. Em processos de corte onde um disco é utilizado como suporte da ferramenta, geralmente o diâmetro deste disco é relativamente grande em relação à variação angular que este realiza do início ao final do processo, e consequentemente essa diferença pode ser desprezada.

Ensaio preliminares de torno-brochamento em um torno convencional foram realizados utilizando o sistema representado na Fig. (10). As forças representadas em vermelho, azul e amarelo no gráfico correspondem respectivamente às forças de corte (tangencial à peça), normal e axial ao virabrequim.



1) Ferramenta, 2) Peça, 3) Plataforma Piezelétrica

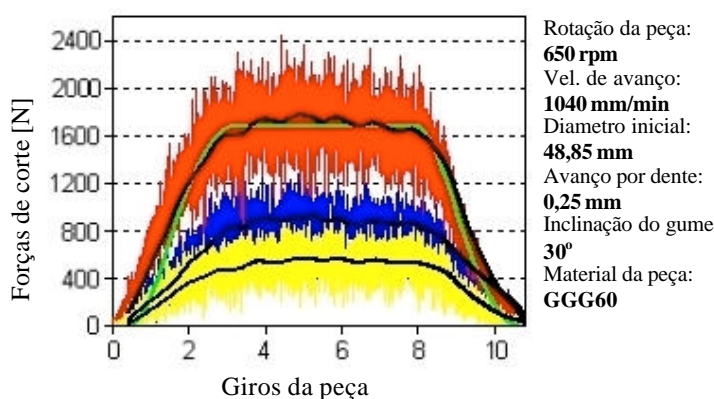


Figura 10 – Sistema utilizado no torno e as forças de corte adquiridas

Com o objetivo de verificar o comportamento das forças de usinagem foram adicionadas linhas de tendência em preto para cada uma das forças medidas. A curva em verde, na Fig. (10), corresponde à força de corte teórica simulada a partir do modelo dinâmico elaborado neste trabalho, onde os valores de $k_{c1.1}$ e $1-m_t$ do modelo de Kienzle foram obtidos em ensaios de torneamento do mesmo material (ferro fundido perlítico GGG60).

6. CONCLUSÕES

A modelagem da cinemática e dinâmica do processo de pré-acabamento de torno-brochamento mostra-se importante para verificar a influência dos parâmetros de usinagem sobre fatores como: espessura de corte, erro de forma, variação dos ângulos efetivos de incidência e de saída e os esforços de corte decorrentes do processo. Com isto torna-se possível estabelecer parâmetros de corte mais adequados a partir do modelo computacional e diminuir o número de tentativas experimentais para a busca de valores otimizados.

Visando validar o modelo computacional da cinemática e dinâmica do processo, valores de esforços obtidos em ensaios preliminares que representam o processo de torno-brochamento em um torno foram comparados com os obtidos na modelagem da dinâmica do processo e verificou-se forte equivalência entre estes.

Através dos dados de forças obtidos na simulação computacional e nos experimentos de torno-brochamento, é possível a realização, por exemplo, da análise da deflexão do virabrequim por elementos finitos durante o processo de corte e posteriormente avaliar o possível aumento teórico do diâmetro no final do processo ocasionado pelo afastamento entre o centro da peça e a ferramenta de corte.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem o apoio técnico e financeiro da Renault do Brasil S. A., à Finep, ao CNPq e à CAPES.

8. REFERÊNCIAS

- Augsten, G., SchmiD, K., 1990, ‘Drehen - Drehräumen - ein neues Verfahren zum Fertigen von Kurbel und Nockenwellen’, Werkstatt und Betrieb, v. 123, n. 12, pp. 915-920.
- Berkold, A., 1992, ‘Drehräumen gehärteter Stahlwerkstoffe’, Tese (Doutorado em Engenharia) – RWTH Aachen, Alemanha.
- Konig, W., Klocke, F., 1997, ‘Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Böhren’, 5. ed. Springer-Verlag, Berlin.
- Reiter, N., Müller, M., Stallwitz, E., 1989, ‘Technologie des Drehräumen’, Werkstatt und Betrieb, v. 122, n. 3, pp. 201-206.
- Sandvik GmbH. ‘Neue Leistungspotentiale bei der Bearbeitung von Kurbelwellen’, Werkstatt und Betrieb, n. 75, p. 36. Disponível em: <http://www.werkzeug-technik.com/redac/wt75/7502-53.htm>. Acesso 02/10/2003.
- Stemmer, C. E., 1993, ‘Ferramentas de corte 1’, 3. ed., Florianópolis-UFSC.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo descrito neste artigo.

MODELLING AND SIMULATION OF THE TURN-BROACHING PROCESS

Cleyzer Marcondes Bastos, Eng. Mec.

Precision Engineering Laboratory – LMP, Mechanical Engineering Department, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brazil, C.P. 476 – EMC – 88.010-970. Tel: 0xx(48)3319395.

e-mail: cleyzer@lmp.ufsc.br

Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Precision Engineering Laboratory – LMP, Mechanical Engineering Department, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brazil, C.P. 476 – EMC – 88.010-970. Tel: 0xx(48)3319395.

email: rolf@lmp.ufsc.br

Abstract. *Every year more than 55 million automobiles equipped with internal-combustion engines are globally produced, in which higher design requirements and lower manufacturing costs are demanded. In the crankshaft production, the fast development in the last 15 years in new manufacturing conceptions demonstrates the intense search for best production alternatives. Among these, the turn-turnbroaching is a manufacturing process, which started to be used in automotive industry in 90's and has been developed as a combination of conventional conception of turning, used to roughing, and the turn broaching, used to reach minimum machining allowance for the finish grinding. By the fact that this process is being widely used in the crankshaft manufacturing process, this work has as purpose to study the turn-broaching by modeling the cinematic and dinamic process and carrying experiments to models proving. As result, this study will allow the determination of the influence from input parameters over the chip formation, form error, cutting forces and crankshaft deflection. Preliminary tests showed strong equivalence between cutting forces obtained by simulation and by tests.*

Keywords: *simulation, turn-broaching, crankshaft.*