



ANÁLISE DE FORÇAS NO FRESAMENTO DE TOPO RETO

Rolf Bertrand Schroeter¹, Walter Lindolfo Weingaertner², Sérgio Eduardo M. Macedo³

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão

(1) rolf@emc.ufsc.br, (2) wlw@emc.ufsc.br, (3) macedo@lmp.ufsc.br

Florianópolis, SC, Brasil

Resumo. As forças na usinagem são, freqüentemente, elementos-chave para o entendimento da cinemática e da dinâmica de processos de usinagem, além de muito utilizadas em sistemas de monitoramento. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento das componentes de força F_x , F_y e F_z e da resultante no plano xy (F_{xy}) no fresamento de rasgos com fresas de topo reto. Esta avaliação é efetuada para diferentes condições de trabalho, alterando-se a profundidade de corte radial e o número de dentes. As informações para a análise foram obtidas em ensaios de fresamento de rasgos com fresa de topo reto de aço-rápido (DIN 844A-N e DIN 327B), corpos de prova produzidos com aço ABNT 1040 e forças medidas com o emprego de um dinamômetro piezolétrico. Como resultados são apresentadas as características do comportamento das componentes instantâneas das forças F_x , F_y e F_z e da resultante F_{xy} , além de seu espectro de freqüências, mostrando-se os efeitos da excentricidade e vibração auto-excitada. Além disso são mostradas as características da resultante F_{xy} e seu ângulo de posição (\mathbf{q}) para as diversas variações de parâmetros de usinagem ensaiadas.

Palavras-chave: Medição de forças, Fresamento de topo reto, Fresamento

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas de manufatura integrados e auto-ajustáveis capazes de usinar diversas peças sem a supervisão ou assistência de operadores é um dos principais objetivos atuais na pesquisa de processos de usinagem. Para isso, fazem-se necessários sistemas de monitoramento da operação capazes de garantir segurança e eficiência na remoção de material, tornando possível a tomada de medidas necessárias para correção das ações na ocorrência de distúrbios ou falhas.

O comportamento das forças nos processos de usinagem é de fundamental importância para a pesquisa e o desenvolvimento de modelos, para a otimização, o monitoramento e o controle do processo. Em virtude de sua relativa facilidade de medição e sua relevância física, muitos pesquisadores têm utilizado medições de forças durante a usinagem para avaliação e entendimento do processo e análise da cinemática e dinâmica de máquinas-ferramentas (König et al.; 1999, Zheng et al., 1997).

O processo de fresamento, e mais especificamente o fresamento de topo, possui uma ampla área de aplicação na indústria mecânica. As fresas de topo são utilizadas para facear,

ranhurar, executar cavidades, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos e fresar contornos. São características do processo de fresamento em geral, e mais especificamente o fresamento de topo, a excentricidade, a deflexão e vibrações durante a usinagem (Drozda et al., 1983; König et al., 1999).

Em condições normais de usinagem a ocorrência da excentricidade é praticamente inevitável, e atribui-se isso principalmente a erros na montagem da ferramenta. Uma fresa de topo excêntrica pode ser representada por uma ferramenta com raio variável girando em torno do eixo de rotação e, desta forma, tem-se que a espessura do cavaco não é igual para todos os dentes. A excentricidade altera as forças médias e os picos máximos e mínimos do perfil instantâneo de forças de diversas maneiras, dependendo das condições de corte, da geometria do corte e da natureza e intensidade da excentricidade (Armarego et al., 1991; Kline et al., 1983).

Em virtude da fresa de topo estar fixa por uma única extremidade e devido à sua característica de falta de rigidez, surgem deflexões pela ação das forças de usinagem. A inclinação da ferramenta produzida por sua deflexão causa diferentes espessuras de cavaco no sentido axial, prejudicando o acabamento da peça, restringindo a produtividade e gerando esforços não-uniformes sobre os gumes. Algumas destas características são comuns à excentricidade, entretanto, no caso da deflexão, existe a diferença de espessura de cavaco no sentido axial, sendo que este problema se torna mais crítico quanto maior for a profundidade de corte axial. Apesar de indesejável por diversos aspectos, a flexibilidade da ferramenta tem como vantagem a redução de sobrecargas em situações transientes e sob vibração auto-excitada. Deve-se notar também que a deflexão da ferramenta tem a propriedade de atenuar os efeitos da excentricidade. Quando, devido à excentricidade, a espessura de cavaco a ser removida por um gume é maior do que a teórica, as forças na usinagem também serão maiores, conduzindo a uma maior deflexão. No entanto, caso a espessura de cavaco seja menor do que a teórica, o inverso ocorre. Desta forma tem-se que os picos máximos de força são atenuados e os mínimos elevados (Armarego et al., 1991).

As vibrações durante o fresamento podem ser divididas em vibração externamente excitada e vibração auto-excitada. A principal vibração externamente excitada, ou vibração forçada, é causada pelas variações de força devido à mudança de direção e ao corte interrompido, isto é, frequência de passagem de dentes. Também são fonte de vibração os impactos de cada dente com a peça. As vibrações auto-excitadas, ou regenerativas, são causadas por um mecanismo de auto-excitação durante a formação do cavaco. Esse fenômeno ocorre principalmente quando o processo apresenta altas taxas de remoção. As principais consequências são a piora na qualidade superficial e dimensional da peça, o desgaste excessivo ou a quebra da ferramenta e a limitação da produtividade do processo (Weck, 1996).

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das componentes de força F_x , F_y e F_z no fresamento de rasgos com fresas de topo reto em condições normais, com elevada excentricidade e com vibração auto-excitada. Serão apresentadas as características da resultante das forças F_x e F_y (plano xy), denominada F_{xy} e também o ângulo de direção (θ) desta resultante. Esta avaliação é efetuada para diferentes condições de trabalho, alterando-se parâmetros de usinagem tais como profundidade de corte radial (a_e) e número de gumes (z).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nos experimentos utilizaram-se as seguintes fresas de topo reto de aço-rápido S4:

- DIN 844A-N, 4 dentes, diâmetro (d) 10 mm;
- DIN 327 B, 2 dentes, diâmetro (d) 10 mm.

O material dos corpos de prova foi o aço ABNT 1040, laminado e normalizado, com dureza média de 158 HB.

Nas medições de forças durante a usinagem foi utilizado um sistema composto dos seguintes elementos:

- Dinamômetro Piezelétrico KISTLER INSTRUMENTE 9265 A2;
- Amplificadores de sinal KISTLER INSTRUMENTE AG 5006;
- Sistema de aquisição de sinais A/D (conversor de sinais analógicos para digitais);
- Microcomputador PC;
- Programa para aquisição de sinais digitais;
- Programa para análise dos sinais.

Os parâmetros de corte utilizados foram:

- Velocidade de corte (v_c): 25 m/min;
- Avanço por dente (f_z): 0,025 mm;
- Profundidade de corte axial (a_p): $d/2$;
- Profundidade de corte radial (a_e): 0,50d; 0,75d; 1,0d.

Nos ensaios com a_e igual a 0,50d foram efetuadas usinagens concordante e discordante. Para o ensaio com a_e igual a 0,75d a usinagem inicia discordante e termina concordante. As condições de todos os ensaios realizados estão resumidos na tabela 1.

Tabela 1 - Condições dos ensaios realizados

Ensaio	Ferramenta	a_p [mm]	a_e [mm]
E01	d 10 mm, z 2	5,0	10
E02	d 10 mm, z 4	5,0	10
E03	d 10 mm, z 4	5,0	7,5
E04	d 10 mm, z 4	5,0	5,0 con.
E05	d 10 mm, z 4	5,0	5,0 dis.

O comprimento de cada rasgo usinado foi de 20 mm. Repetiu-se cada condição com três ferramentas diferentes e com cada ferramenta usinaram-se três rasgos idênticos, totalizando nove ensaios para cada condição. Não é considerado o desgaste da fresa e a estabilização inicial do gume, pois nas condições e comprimentos de ensaio não se observa uma influência significativa destas variáveis, apesar de não se poder afirmar que a ferramenta está na mesma condição nas três repetições. Todos os experimentos foram executados sem a utilização de fluido de corte, em uma fresadora vertical CNC, com a fixação das ferramentas feita por pinça.

Convencionou-se chamar F_y a força na direção de avanço, F_x perpendicular a F_y no plano de avanço e F_z normal a este plano.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira parte das análises considera os efeitos da excentricidade, deflexão e vibração auto-excitada no perfil de forças esperado. A excentricidade e a deflexão são inerentes ao processo e praticamente não podem ser evitadas. Pode-se, contudo, através de uma montagem cuidadosa, reduzir seus efeitos. A excentricidade aumenta os picos máximos e reduz os mínimos. Existe a tendência de o conteúdo de frequências das forças deslocar-se da frequência de entrada de dentes para a de rotação da fresa (Kline et al., 1983). A Fig. 1 mostra

dois ensaios realizados nas mesmas condições (ensaio E02, tabela 1), sendo que o período de tempo apresentado é equivalente a duas rotações completas da fresa. Na primeira parte da Fig. 1 a montagem foi feita de forma a minimizar a excentricidade. Nota-se que os picos referentes a cada entrada de dente têm aproximadamente a mesma intensidade (indicados nos círculos). A frequência predominante é a de passagem dos dentes conforme o espectro de frequências de F_x . Na segunda parte da Fig. 1 mostra um ensaio no qual a montagem da ferramenta elevou a sua excentricidade. Como efeito tem-se um pico de força máximo, um mínimo e dois intermediários no mesmo nível (indicados pelos círculos). Percebe-se ainda a frequência de entrada de dentes, mas também fica evidente frequência de rotação da fresa.

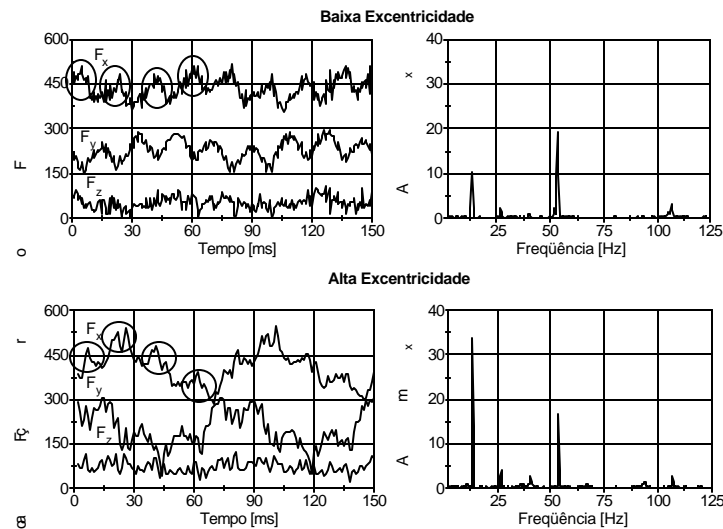


Figura 1 - Ensaio E02 em condições normais e com elevada excentricidade

A Fig. 2 apresenta o efeito da excentricidade sobre a resultante F_{xy} em ensaios com uma fresa de topo de 2 dentes (ensaio E01, tabela 1). Fica bastante claro a transferência do conteúdo de frequências da frequência de entrada de dentes para a de rotação da fresa.

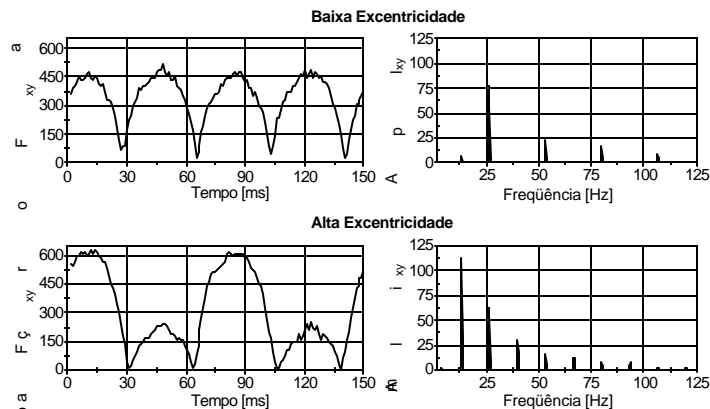


Figura 2 - Ensaio E01 em condições normais e com elevada excentricidade

Os efeitos da deflexão não podem ser evidenciados de forma tão clara como a excentricidade. A deflexão altera a espessura de cavaco no sentido axial e atenua os efeitos da excentricidade. Entende-se que os ensaios com baixa excentricidade poderiam ter um efeito um pouco mais explícito caso não ocorresse a deflexão, e nos ensaios com alta excentricidade os picos máximos e mínimos seriam mais acentuados.

A vibração auto-excitada é bastante indesejada pois piora na qualidade superficial e dimensional da peça, desgasta excessivamente ou quebra a ferramenta e limita a

produtividade do processo. A escolha adequada de parâmetros pode evitar que ela ocorra. A Fig. 3 mostra o efeito da vibração auto-excitada na força F_x (ensaio E2, tabela 1), sendo que os gráficos estão na mesma escala visando facilitar uma comparação de resultados. Na primeira parte da Fig. 3 não ocorreu vibração auto-excitada, estando o perfil de força de acordo com o esperado. No ensaio da segunda parte da Fig. 3 foi forçada a ocorrência da vibração auto-excitada. Nota-se claramente que isto produz efeitos desastrosos para a usinagem, com sobrecargas que danificam a peça e podem facilmente quebrar a ferramenta. O espectro de frequência evidencia a forte amplificação da força resultante.

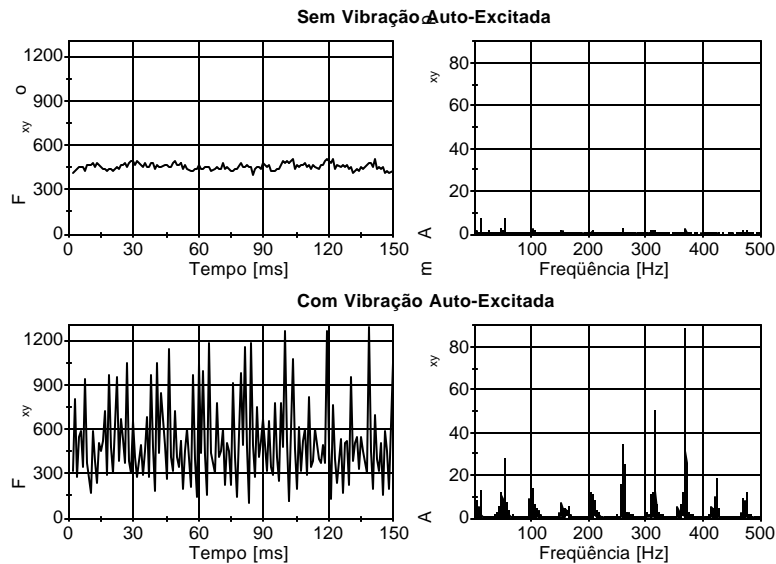


Figura 3 - Força F_x no ensaio E02 em condições normais e com vibração auto-excitada

A segunda etapa de análise visa mostrar qual é a intensidade da força resultante entre as forças F_x e F_y no plano xy , denominada F_{xy} e seu ângulo de direção θ para algumas condições de ensaio. Seria possível apresentar somente uma tabela com os valores de resultantes e ângulos médios e também as dispersões. Porém considera-se esta informação pobre, pois não se saberia corretamente como é a distribuição destes dados, além do possível erro de se considerar uma distribuição normal. Optou-se por construir gráficos que indicam como a resultante e seu ângulo de posição estão distribuídos.

O sistema de medição de força mediu de forma discreta as forças F_x , F_y e F_z , numa frequência de 1 kHz, durante um período, e armazenou-as na forma digital. Para cada ponto de medição pode-se calcular a intensidade da resultante e sua posição. Com esses valores calculados construiu-se um histograma para a resultante e um para o ângulo de posição. Desta forma pode-se analisar de forma clara quais são os valores de F_{xy} e como ela se comporta. As Fig. 4 a 8 apresentam o resultado desta análise para as condições de ensaio da tabela 1.

Para cada figura tem-se um quadro com os dados básicos para identificação do ensaio, uma ilustração da força resultante com a indicação de sua faixa de variação angular, o histograma de F_{xy} e o histograma de θ . As ilustrações indicam a largura do corte (profundidade de corte radial, a_e), a rotação da fresa e sua direção de avanço. O vetor F_{xy} representa a resultante aplicada na fresa. Vale ressaltar que os histogramas não estão correlacionados, não permitindo a afirmação de que para uma determinada posição angular teremos um valor específico de força. A experiência mostra que, por exemplo, nos valores médios da posição angular tem-se resultantes variando do valor mínimo até o máximo.

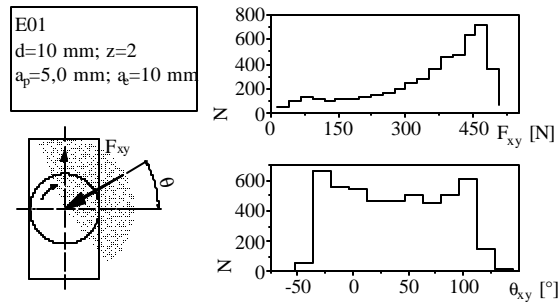


Figura 4 - Distribuição da força resultante F_{xy} e ângulo θ no ensaio E01

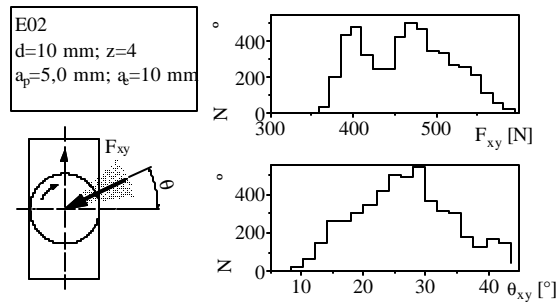


Figura 5 - Distribuição da força resultante F_{xy} e ângulo θ no ensaio E02

O ensaio E01 apresentado na Fig. 4 apresenta grande variação de intensidade e angular pois tem-se uma ferramenta de 2 dentes, sendo que tem-se a cada instante somente 1 no corte. Na Fig. 5, ensaio E02, tem-se sempre 2 dentes, de uma fresa de 4, atuando no corte e reduzindo desta forma as variações de intensidade e posição angular da resultante. Nestes dois ensaios os valores médios, principalmente a posição angular, são próximos mas as distribuições bastante distintas. Fica clara, portanto, a necessidade de apresentação das distribuições e não somente de médias.

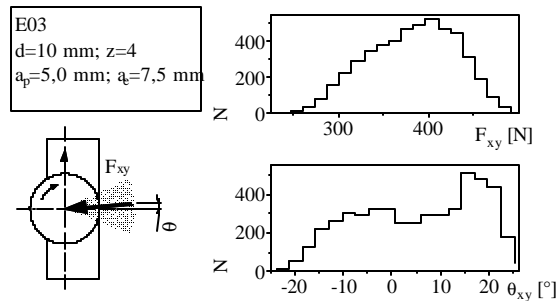


Figura 6 - Distribuição da força resultante F_{xy} e ângulo θ no ensaio E03

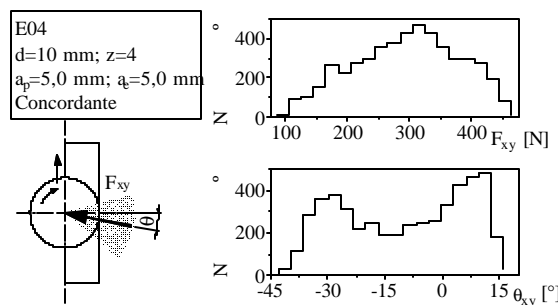


Figura 7 - Distribuição da força resultante F_{xy} e ângulo θ no ensaio E04

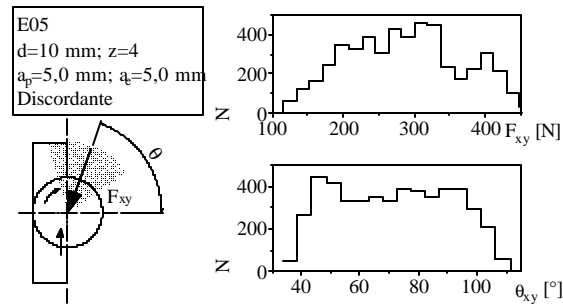


Figura 8 - Distribuição da força resultante F_{xy} e ângulo θ no ensaio E05

O ensaio E03, Fig. 6, tem como característica interessante a tendência de a força de avanço estar em torno de zero. O ensaio E04, com corte puramente concordante (Fig. 7), mostra que esta condição tende a apresentar forças de avanço negativas, reduzindo assim a potência de avanço. No ensaio E05, com corte puramente discordante (Fig. 8), a força de avanço é maior, mas a redução da força perpendicular ao avanço pode ser útil na usinagem de paredes finas, por exemplo.

Retornando à questão da quantidade média de dentes que atua simultaneamente no corte, tem-se que este número tem influência decisiva nas variações da intensidade e posição da força resultante. Nas Fig. 5 a 8 tem-se a mesma fresa trabalhando com profundidades de corte radiais diferentes. Na Fig. 5 tem-se em média 2 dentes atuando simultaneamente, na Fig. 6, 1,33 dentes e nas Fig. 7 e 8, 1 dente. Observa-se que as variações da intensidade e posição da força resultante cresce com a redução do número médio de dentes atuantes. A diferença entre as Fig. 7 e 8, que possuem o mesmo valor médio dentes, pode ser atribuída à maior parcela de deformação elástica e plástica que ocorre no início do corte discordante em relação ao concordante, e também ao maior tempo que o dente passa em contato com a peça no corte discordante, apesar desta última diferença ser em média de somente 3%, conforme Drozda et al. 1983. Já as diferenças entre as variações da Fig. 4 e das Fig. 7 e 8, onde tem-se em média 1 dente atuando, estão associadas ao fato de no ensaio E01 o dente atuar em 180° e nos ensaios E04 e E05 somente em 90° .

Experimentos também foram realizados com fresas de 8 e 12 mm de diâmetro. Os resultados obtidos seguem as mesmas tendências dos apresentados aqui, com a óbvia diferença na magnitude das forças.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho evidenciou-se o efeito da excentricidade, que aumenta os picos máximos e reduz os mínimos, além de transferir o conteúdo de frequências da frequência de entrada de dentes para a frequência de rotação da fresa, no fresamento de topo reto. Também mostrou-se o violento aumento das forças quando se trabalha em condições de vibração auto-excitada.

Apresentaram-se as variações da força resultante no plano xy e seu ângulo de posição para diferentes condições de profundidade de corte radial. Mostrou-se que quanto menor o número médio de dentes atuando simultaneamente no corte maiores são as variações de intensidade e posicionamento da resultante. O ângulo de atuação de um dente e o corte concordante e discordante também têm influência nas variações.

Destacou-se a necessidade de apresentação das distribuições das forças e não somente valores médios e desvios. Ficou claro como a resultante está distribuída e evitou-se confundir tal distribuição com a normal.

Conclui-se que os resultados permitem uma maior compreensão do processo de fresamento de topo. As informações aqui obtidas, entretanto, devem ser somadas a outras

relacionadas com erros geométricos e qualidade da superfície produzida para uma completa avaliação e entendimento do processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa INDUFRESA COMERCIAL LTDA pela doação das ferramentas e à CAPES pelo apoio financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Armarego, E. J. A.; Deshpande, N. P., 1991, 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.
- Drozda, T. J.; Wick, C. (Ed.), 1983, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining*. 4. ed. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers,. v. 1.
- Kline, W. A.; DeVor, R. E., 1983 The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces In End Milling. *International Journal of Machine Tool Design & Research*, v. 23, n. 2, p. 123-140.
- König, W.; Klocke, F., 1999, *Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. 6. Auflage. Berlin : Springer - Verlag, 471 p.
- Weck, M., 1996, *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme, Band 4: Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung*. 5. Auflage. Düsseldorf : VDI - Verlag, p. 213-367.
- Zheng, L.; Liang, S. Y., 1997, Identification of Cutter Axis Tilt in End Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, v. 119, n. 2, p. 178-185.

CUTTING FORCE ANALISYS IN END MILLING

Abstract. *Cutting forces are an important source of knowledge for cutting processes and monitoring systems. The objective of this article is to analyse the force components F_x , F_y and F_z , and the resultant force in the xy plane (F_{xy}). The variables are the number of teeth and the radial depth of cut. The experiments were performed with HSS flat end mills (DIN 844A-N e DIN 327B), the workpiece material was the SAE 1040 and the forces were measured with a piezoelectric dynamometer. The results show the effect of eccentricity and chatter vibration on the resultant F_{xy} . There are also some behaviour of the F_{xy} and its position angle (\mathbf{q}) for the different parameters performed.*

Keywords: *Cutting force measurement, End milling, Milling*