

# DETERMINAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE FORÇAS E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS NO FRESAMENTO FRONTAL

**Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.**

e-mail rolf@lmp.ufsc.br

**Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Ph.D.**

e-mail mendonca@grante.ufsc.br

**Cristian Mangoni, Eng. Mec.**

e-mail cristian@lmp.ufsc.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil,  
Caixa Postal 476 – EMC – 88.010-970

**Resumo.** Este trabalho tem como objetivo determinar teórico-experimentalmente forças no fresamento frontal. Estas forças servem como dados de entrada na análise dinâmica por elementos finitos em peças submetidas a esforços alternados, como os verificados no fresamento frontal. O número de variáveis envolvidas num processo de usinagem inviabilizaram, até recentemente, a tentativa de extrair dados confiáveis através da simulação computacional. Porém, com o aprimoramento de métodos próprios, juntamente com o desenvolvimento de programas e computadores, a simulação está se tornando cada vez mais viável. Para a simulação de forças no fresamento foram determinadas constantes experimentais que relacionam força, espessura usinada e profundidade de corte. Estas dependem do material a ser usinado e de características da ferramenta. Essas constantes alimentam um modelo matemático para simular o comportamento das forças de corte atuantes no processo de fresamento. O medelo proposto é utilizado para uma análise dinâmica por elementos finitos em peças com baixa rigidez com o objetivo de determinar parâmetros de usinagem que resultam em baixas amplitudes de vibrações. Os resultados das simulações foram satisfatórios.

**Palavras-chave:** Fresamento, forças, simulação, elementos finitos.

## 1 INTRODUÇÃO

A pesquisa em usinagem tem-se desenvolvido historicamente em duas linhas: uma, a da pesquisa empírica, geralmente modela individualmente cada necessidade específica da engenharia fornecendo um banco de dados para as mais variadas situações, porém com uma certa carência na capacidade de predizer diferentes situações. A outra linha vem abordando o problema como um desafio científico através de modelos teóricos, que em muitos casos não se aplicam facilmente no ambiente industrial, Ehmann (1995).

A usinagem é um processo complexo cujas interações entre ferramenta de corte e máquina-ferramenta são críticas. Novos materiais de peças e ferramentas surgem continuamente e, além de aspectos tecnológicos, legislações cada vez mais rigorosas quanto a aspectos ecológicos vêm motivando a necessidade de coordenar as duas linhas, com foco no desenvolvimento de teorias gerais de acordo com as necessidades da indústria. Assim, a linha empírica desenvolve métodos eficientes para a extração de dados que possam ser usados num modelo teórico, que pode por sua vez validado para um caso específico. Este procedimento tem melhorado com o desenvolvimento da computação, aumentando a confiabilidade das previsões da performance de processos, com impacto na qualidade e produtividade.

A necessidade de informações de forças confiáveis tem sido enfatizado em pesquisas publicadas por diferentes autores. O estudo de forças no fresamento é importante para o projeto dos elementos das máquinas-ferramentas como mancais, bases, acionamentos, guias, sistemas de fixação da ferramenta e da peça, na determinação dos parâmetros de corte, no esclarecimento dos mecanismos de desgaste, na previsão da amplitude de vibrações e uma estimativa da previsão da precisão obtênia na usinagem.

O método de elementos finitos encontra-se firmemente estabelecido como uma ferramenta numérica poderosa e popular, inicialmente consagrada em aplicações de análise estrutural. Atualmente, este método vem sendo aplicado com sucesso em várias áreas, dentre elas, a de usinagem. Nos últimos anos, com a evolução dos computadores e programas, começaram a serem usados elementos finitos para análise de processos de usinagem. O modelo por elementos finitos, quando calibrado com dados obtidos experimentalmente, pode ser aplicada com sucesso na análise estrutural do processo de usinagem, especialmente no fresamento, que é invariavelmente acompanhado de vibrações.

Pesquisas na área de vibrações são baseadas no projeto das características dinâmicas de um sistema rotativo através da variação de parâmetros como pré-carga dos rolamentos, espaçamentos dos rolamentos, massa, rigidez e amortecimento do sistema. A vibração auto-excitada ou a induzida são problemas sérios que afetam a qualidade superficial da peça, precisão dimensional e reduzem a vida da ferramenta.

Segundo Mackerle (1999), recentemente o método de elementos finitos tem sido aplicado para estudar os efeitos da geometria e parâmetros no processo de usinagem, vida da ferramenta em relação ao ângulo de engajamento, efeitos da geometria da ferramenta em vibrações, parâmetros de corte em precisão dimensional. Outros tópicos pesquisados são relacionados à tensão residual de peças, formação de cavaco e seu controle tentando-se definir o mecanismo de formação, escoamento e quebra do cavaco e otimização de componentes de máquinas-ferramentas. Também existem pesquisas na área térmica visto que temperaturas elevadas no processo de usinagem são causas de vidas insatisfatórias de ferramentas e limitações de velocidade de corte. Muitas técnicas numéricas estão disponíveis para o estudo do fluxo de calor e distribuição de temperaturas em ambos peça e ferramenta. Os modelos normalmente apresentam situações de condução de calor entre zonas de contato, radiação e convecção forçada e livre.

O presente trabalho abrange duas grandes áreas da engenharia mecânica. A de fabricação, onde são abordadas forças nos processos de torneamento e fresamento, com o objetivo de apresentar um modelo para simulação de forças no fresamento frontal partindo de dados de torneamento. Outra, a área de elementos finitos, onde são feitas análises dinâmicas em peças com baixa rigidez submetidas a esforços alternados do fresamento com o objetivo de levantar parâmetros que resultam em níveis baixos de vibrações .

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Características Tecnológicas do Fresamento Frontal

O fresamento é um processo de usinagem cuja remoção de material da peça ocorre de modo intermitente com um ou mais gumes usinando ao mesmo tempo pelo movimento relativo entre peça e ferramenta. O movimento de rotação é dado pela ferramenta e o de avanço, pela peça ou pela ferramenta. Caso a superfície da peça seja gerada no topo da ferramenta, pelo gume secundário, então se designa o processo de fresamento frontal. De modo correspondente, um processo de fresamento no qual a superfície é gerada pelos gumes na circunferência da fresa é designado de fresamento periférico, Fig. (1).

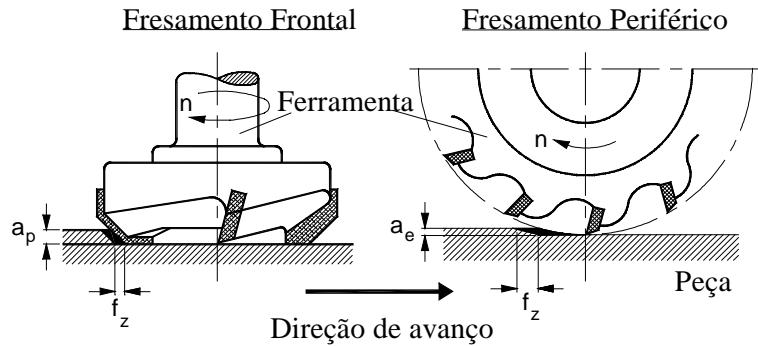


Figura 1. Fresamento frontal e fresamento periférico, König (1997)

No fresamento frontal a largura de engajamento  $a_e$  é consideravelmente maior que a profundidade de corte  $a_p$ , e a superfície da peça é gerada pelos dois gumes da ferramenta - gume principal e gume secundário.

## 2.2 Forças no Fresamento Frontal

O estudo de forças no fresamento é importante para o projeto dos elementos das máquinas-ferramentas como mancais, bases, acionamentos, guias, sistemas de fixação da ferramenta e da peça, na determinação dos parâmetros de corte, no esclarecimento dos mecanismos de desgaste, na previsão da amplitude de vibrações e em uma estimativa da precisão obtênia na usinagem.

O grande avanço das pesquisas na área do corte dos metais se deu a partir da década de 1920, tanto nos EUA quanto na Europa. O uso de modelos matemáticos para descrever o comportamento de forças na usinagem, condições de corte, a vida da ferramenta etc., tornou-se um grande instrumento para buscar sempre os melhores resultados de custo-benefício para a produção industrial.

Por definição tem-se que a força de usinagem é a força total  $F$  que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem. Esta força é decomposta em três outras componentes: força passiva  $F_p$ , força de avanço  $F_a$  e força de corte  $F_c$ .

Durante o fresamento cada dente ou inserto da fresa está sujeito a uma carga de impacto quando entra na região de corte. A magnitude desta carga depende do material da peça, da posição da ferramenta, dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta. As forças no fresamento são cíclicas e fortemente proporcionais à espessura de corte em cada posição.

Segundo pesquisadores como (König, 1997 e Altintas, 1991), dentre outros, foram criados métodos e modelos que têm por objetivo simular as forças de corte, fato este motivado pela relativa complexidade do fenômeno. Os modelos, em sua maioria, levam em consideração a geometria da ferramenta, características do material a ser usinado, as condições de corte, deformações eventuais na ferramenta e o nível de vibrações presentes no processo. Geralmente os modelos são simplificados, isto é, nem sempre levam em consideração todas as variáveis atuantes no corte, o que de fato seria inviável.

## 2.3 Simulação na Usinagem

Entende-se simulação como sendo um processo que consiste em criar um modelo de forma lógica e matemática de um sistema real e de experimentá-lo com o auxílio de um computador, o que permite obter conclusões sobre sistemas sem construí-los se forem novos, e sem perturbá-los se existentes.

Atualmente, entende-se o conceito de simulação de uma forma mais ampla, de maneira que a experimentação forneça dados, estando desta forma a análise experimental intimamente ligada à simulação computacional, de modo a fornecer dados ao sistema de previsão, Luttervelt (1999).

O número de variáveis envolvidas num processo de usinagem até recentemente inviabilizou a tentativa de extrair dados confiáveis através de uma análise numérica. Porém, o aprimoramento de métodos como o de elementos finitos, juntamente com o desenvolvimento de programas e computadores capazes de solucionarem problemas cada vez mais complexos, estão tornando viável essa estratégia.

A grande vantagem da simulação consiste na possibilidade de redução do custo envolvido num projeto. Reduz-se o número de experimentos, que são considerados fundamentais, baixando o custo final de desenvolvimento e otimização de um determinado produto ou processo. Além disso, pode-se citar como vantagens da simulação:

- Não há interferência no processo e, com a simples mudança de um parâmetro, pode-se verificar a resposta do sistema em análise;
- Hipóteses podem ser testadas para confirmação;
- A simulação geralmente é mais fácil de aplicar do que métodos analíticos;
- Novas situações, sobre as quais se tem pouco conhecimento, podem ser tratadas;
- O tempo pode ser controlado, podendo ser comprimido ou expandido;
- Pode-se compreender melhor quais variáveis são mais importantes em relação ao desempenho, e como as mesmas interagem entre si e com outros elementos do sistema;
- Há casos em que o processo não é passível de experimentação, restando como única ferramenta de análise a simulação.

Como desvantagens da simulação pode-se citar:

- A construção de modelos requer pessoal qualificado;
- Os resultados das simulações são muitas vezes de difícil interpretação. Uma vez que os modelos tentam capturar a variabilidade do sistema, é comum que existam dificuldades em determinar quando uma observação realizada durante uma execução se deve a alguma relação significante no sistema ou a processos aleatórios construídos e embutidos no modelo;
- A tentativa de simplificação objetivando a economia de recursos costuma levar a resultados insatisfatórios.

Além da variedade de variáveis de entrada e de saída, variáveis internas também dificultam a simulação na usinagem. O material da peça tem efeitos, e às vezes é difícil determinar as suas propriedades. A interface ferramenta/peça de trabalho também é complexa, e os fenômenos que ocorrem dependem da pressão, temperatura, velocidade, das propriedades da ferramenta, da peça, do meio lubri-refrigerante, entre outros fatores. Como resultado desta variedade de propriedades, uma grande base de dados é necessária, cuja criação é cara e exige tempo.

### **3 MODELO PROPOSTO PARA FORÇAS NO FRESAMENTO FRONTAL**

O modelo de Kienzle é geralmente utilizado para o cálculo de forças no torneamento porque os parâmetros de corte são geralmente constantes. Isto faz com que a análise de forças seja mais fácil no torneamento que no fresamento, onde a espessura varia com o ângulo de engajamento. Considerando um instante de tempo em que a seção de cavaco no torneamento e fresamento possuem as mesmas larguras e espessura, as forças nos dois processos considerando que são usinados com a mesma ferramenta, o mesmo material, podem ser consideradas semelhantes. Assim, pode-se utilizar o modelo de Kienzle para fresamento, o que permite o uso de um banco de dados já existente de constantes de torneamento sem a necessidade de serem feitos novos ensaios de fresamento.

Uma vez encontrada similiaridade entre os resultados das forças no torneamento e fresamento, para mesmas condições de usinagem, podem ser realizados experimentos visando a determinação das constantes de corte para o cálculo das forças usando um algoritmo computacional. Sabendo-se que a variação da força durante o corte está intimamente relacionada à variação do avanço que, por sua vez, é função do ângulo de engajamento, descrito pelo gume da ferramenta na peça, a estratégia básica para o modelo proposto é calcular os valores instantâneos da força ao longo de cada ciclo de corte. Os dados obtidos do fresamento são então comparados com os dados provenientes do modelo proposto que foi alimentado com os dados produzidos no torneamento devido à facilidade de medição e tratamento dos dados de força no processo de torneamento.

No torneamento as forças atuantes são: força de corte, força de avanço e força passiva. No fresamento, as forças atuantes são normalmente designadas forças tangenciais, radiais e axiais, Fig. (2). Neste trabalho optou-se pelo método de previsão de forças proposto por Kienzle, ligeiramente modificado para o processo de fresamento, devido à facilidade de medição e tratamento dos dados de força no processo de torneamento.

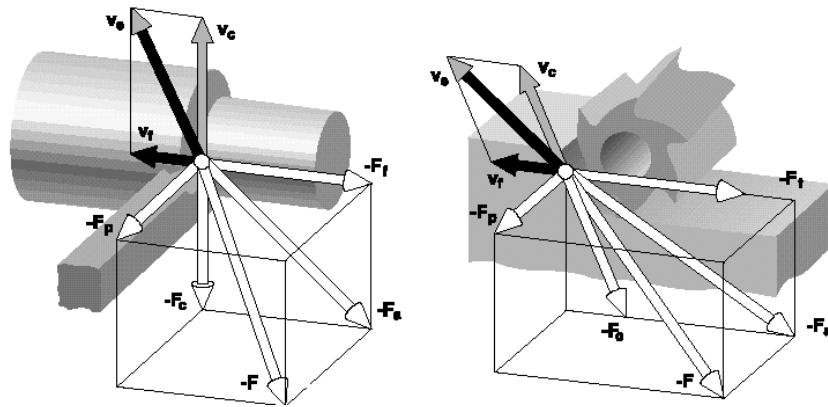


Figura 2. Forças atuantes nos processos de torneamento e fresamento

A principal modificação que a equação de Kienzle sofreu na previsão das forças radiais e tangenciais atuando no gume da ferramenta no processo de fresamento, é basicamente a consideração de que no fresamento a espessura de usinagem  $h$  varia periodicamente com o ângulo de engajamento  $\phi$  à medida que o gume descreve sua trajetória na peça. Assim, as forças tangenciais e radiais são previstas por:

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= k_{c1.1} \times b \times h^{(1-mc)} \sin(\phi) \\ F_r(\phi) &= k_{f1.1} \times b \times h^{(1-mf)} \sin(\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

As forças que agem no plano x-y mediante decomposição trigonométrica das forças tangenciais e radiais resultam:

$$\begin{aligned} F_x(\phi) &= -F_t \cos(\phi) - F_r \sin(\phi) \\ F_y(\phi) &= +F_t \sin(\phi) - F_r \cos(\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

#### 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios de torneamento realizados neste trabalho foram realizados visando o levantamento da curva experimental de Kienzle. Esta é obtida através da plotagem bilogarítmica da razão entre força de

corte e largura de usinagem ( $F_c/b$ ) com a espessura de usinagem. Estes ensaios possibilitam a obtenção da força espessífica de corte ( $k_{c1.1}$ ) e do expoente ( $1-m_c$ ) da Eq. (1), que são característicos do material da peça, assim como do material e geometria da ferramenta. Estas constantes são necessárias para a comparação entre o modelo proposto e os resultados de forças do fresamento frontal.

#### 4.1 Máquinas e Equipamentos

Os ensaios de força no torneamento foram realizados num torno CNC COSMOS 20U, fabricado pela empresa ROMI e utilizando uma plataforma piezelétrica Kistler 9257A, amplificadores de sinais Kistler 5011 utilizados para viabilizar a leitura da variação da tensão nos cristais piezelétricos, cabos coaxiais, placa de aquisição National Instruments PCI-MIO-16E-1, microcomputador e software de aquisição. Os ensaios de força no fresamento foram realizados em uma fresadora CNC ROMI Polaris F400. Para a aquisição de forças foi utilizada uma plataforma piezelétrica Kistler 9265A com faixa de 0 a 15 kN de força.

#### 4.2 Ferramentas e Material

O material utilizado nos ensaios de força foi o ferro fundido cinzento GG25 (Norma DIN).

A ferramenta utilizada para o torneamento foi do tipo quadrada SPMT 100408R-HQ fabricada pela empresa ISCAR. A ferramenta apresenta um comprimento de gume de 10,2 mm, espessura de 4,12 mm, raio de quina  $r_e$  de 0,7 mm, com quebra cavaco. O porta-ferramenta utilizado nos ensaios foi um PQLNL 2525 M-09, com ângulos de incidência 6° e de saída 6°.

Os insertos utilizados no fresamento foram os mesmos dos ensaios de torneamento. O porta-ferramenta utilizado foi um cabeçote de fresamento F90SP-D63-22-FP10, também fabricado pela empresa ISCAR, com diâmetro de 63 mm e 7 insertos.

#### 4.3 Procedimento Experimental

Como parâmetros de usinagem foi utilizada uma velocidade de corte de 140 m/min, e profundidades de corte de 2 e 2,5 mm. Os valores de avanço foram determinados a partir da série de números normalizados R 20 da norma ISO 3685.

Os dados de força foram adquiridos freqüência de aquisição de 1000 Hz durante 5 s em cada aquisição. Para cada valor de avanço foram realizadas 5 repetições em peças diferentes.

Após a coleta dos dados de força, estes foram tratados para a determinação dos valores médios das forças para cada valor de avanço. Para a determinação dos coeficientes de Kienzle foi criado um programa em software comercial (Matlab) visando facilitar futuros ensaios.

O objetivo principal dos ensaios no fresamento frontal é o levantamento das forças nas direções x e y nas mesmas condições de usinagem utilizadas no torneamento, com a finalidade de validar o modelo proposto, comparando-se os resultados de força deste ensaios com os de saída do algoritmo.

O fresamento foi realizado em cheio de modo a permitir a análise das forças com o ângulo de imersão variando de zero a 180°. Para a validação do modelo foram feitos ensaios utilizando apenas um inserto no cabeçote de fresamento frontal, para facilitar a análise e a comparação com o processo de torneamento.

### 5 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Com o objetivo de obter informações preliminares para levantar a viabilidade de uma comparação de forças nos processos de torneamento e fresamento, foram feitos ensaios cujas médias das forças para cada condição verificadas nos dois processos encontram-se comparadas na Fig. (3). Como a força no fresamento é variável, os dados do fresamento são para um ângulo de imersão de  $90^\circ$ , onde a seção do cavaco apresenta as mesmas dimensões em ambos os processos para os mesmos parâmetros de usinagem. As forças dos dois processos são similares, o que permite a previsão de forças de fresamento através de modelos de torneamento conforme o modelo proposto.

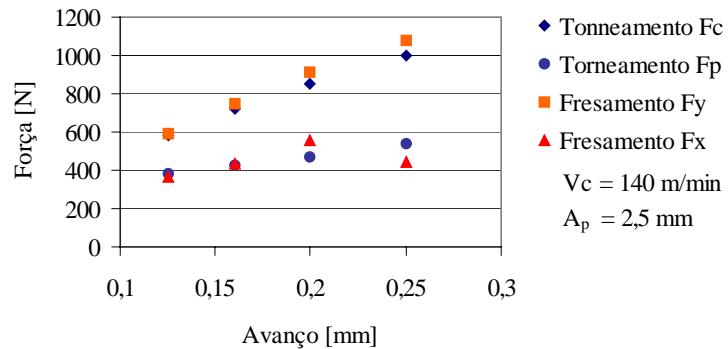


Figura 3. Comparação entre forças de torneamento e fresamento

A Figura (4) mostra os resultados da comparação de forças entre o modelo proposto e dados experimentais de fresamento frontal utilizando uma profundidade de corte de 2 mm e velocidade de 140 m/min. Quando a fresa descreve um ângulo de engajamento de  $90^\circ$ , a força de corte equivale a  $F_x$  e a de avanço a  $F_y$ .

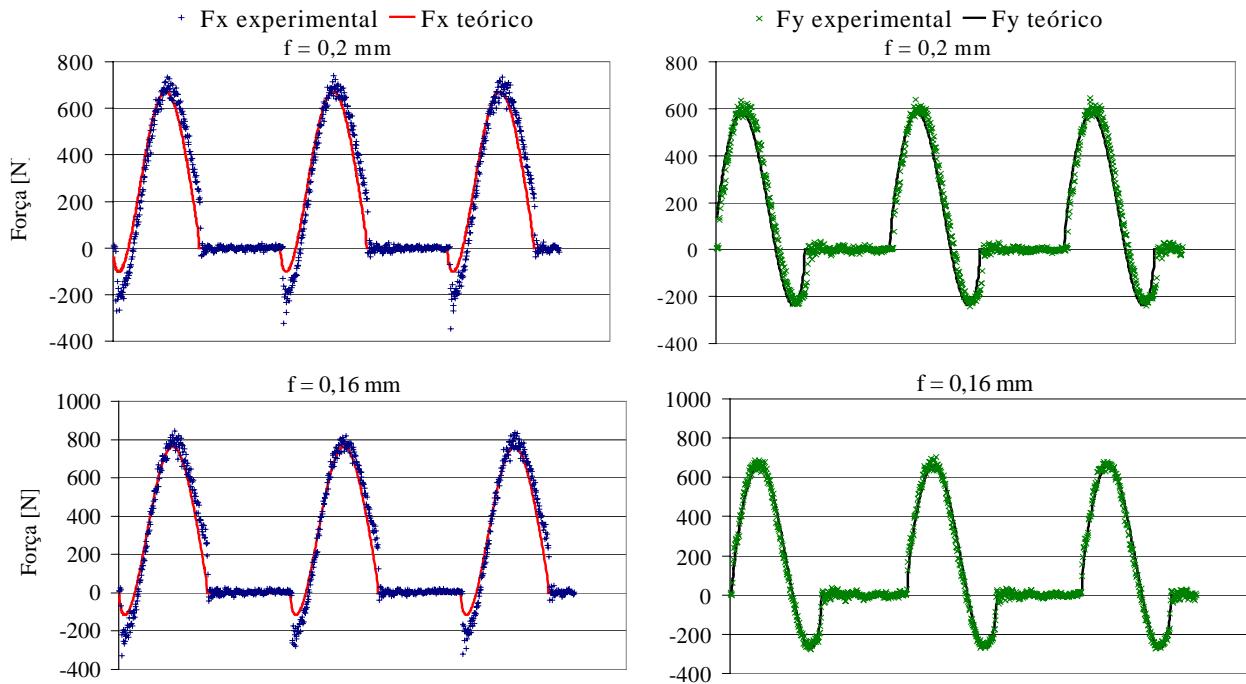


Figura 4. Comparação teórico experimental de forças

O modelo proposto, quando comparado com os resultados experimentais, apresentou resultados satisfatórios, principalmente na simulação das forças de maiores amplitudes. No início do corte, apresentou uma pequena diferença entre os valores experimentais e teóricos. Isto se deve ao fato do modelo de Kiezele não apresentar bons resultados na simulação de forças de avanço para espessuras de cavaco pequenas. Entretanto estas forças apresentam magnitudes desprezíveis comparadas com o restante do corte. Como resultado desta comparação, mostra-se a viabilidade do modelo proposto, onde podem serem utilizadas as constantes de Kienzle do torneamento para a predição de forças no fresamento frontal. O uso destas constantes facilita o processo de simulação devido aos bancos de dados existentes e à facilidade do ensaio no torneamento para novos materiais ou ferramentas.

## 6 ANÁLISE DINÂMICA POR ELEMENTOS FINITOS

Vibrações no processo de fresamento ocorrem devido ao corte intermitente. Estas podem ocorrer devido a uma baixa rigidez da máquina, do suporte da ferramenta, da fixação da peça, por folgas na fixação da peça, além da freqüência de contato do dente da fresa ou das muitas ressonâncias surgidas no processo. Em alguns casos, mesmo quando as ferramentas são rígidas, as vibrações podem ocorrer pela natureza da peça. O nível máximo de vibração tolerável depende da aplicação. Em operações de desbaste, o que determina esse nível é principalmente o efeito que a vibração exerce sobre a vida da ferramenta. Em operações de acabamento, a qualidade superficial e precisão dimensional são determinantes, Crede (1991)..

Neste trabalho é feita uma análise dinâmica no fresamento frontal de peças de baixa rigidez relativa à rigidez da ferramenta. Isto permite que apenas a peça seja modelada por elementos finitos, com o objetivo de levantar os parâmetros que resultam em baixas amplitudes de vibrações. A Figura (5) mostra o modelo adotado para simular peças de baixa rigidez em uma direção, sendo que neste caso a frequência natural do primeiro modo de vibração é 510 Hz. A base foi feita em alumínio e o bloco, na parte superior, é do mesmo material usado nos ensaios de força no fresamento, isto é, ferro fundido cinzento.

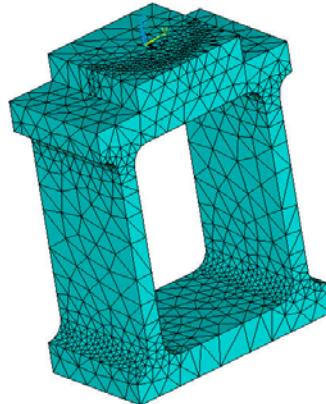


Figura 5. Geometria simulada por elementos finitos

Na simulação por elementos finitos foi feita uma análise transiente, Cook (1998). Os elementos utilizados foram tetraédricos de 4 nós com funções de interpolação lineares. Como condições de contorno foram vinculados os deslocamentos dos nós da base inferior. As forças foram aplicadas na face superior simulando o fresamento com a ferramenta de 7 insertos utilizada nos ensaios de força no fresamento, com uma profundidade de corte de 1 mm e avanço por dente de 0,1 mm. Estas forças foram aplicadas variando posição, direção e amplitude no tempo, onde mais de um inserto exerce força sobre a peça.

Uma das análises feitas, mostrada neste trabalho, foi a variação da rotação da fresa com o objetivo de identificar as velocidades que resultam em menos deflexões na peça, Fig. (6).

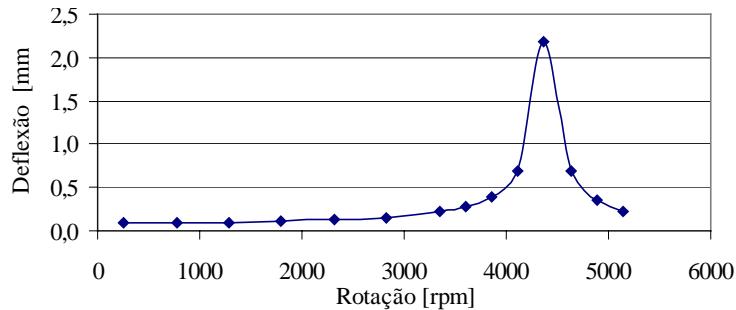


Figura 6. Deflexão da peça variando a rotação da fresa

A deflexão da peça para as condições de corte simuladas é de cerca de 0,1 mm para rotações inferiores a 3.000 rpm. A deflexão máxima acontece em 4.370 rpm, onde a freqüência de passagem de dentes de 510 Hz, que coincide com a freqüência natural da peça. Esta análise de vibração forçada não prevê vibrações regenerativas, que poderia ser simulada através de uma solução interativa, onde os deslocamentos da passagem de cada ferramenta sejam computados na passagem do inserto seguinte.

Outra simulação feita foi a variação de parâmetros de usinagem,  $a_p$  e  $f_z$ , mantendo constante a taxa de remoção de cavaco com o objetivo de identificar o parâmetro que apresenta maior influência sobre a amplitude de vibrações. A Figura (7) mostra os resultados desta simulação, onde foram obtidas amplitudes de vibrações menores para valores de avanço maiores.

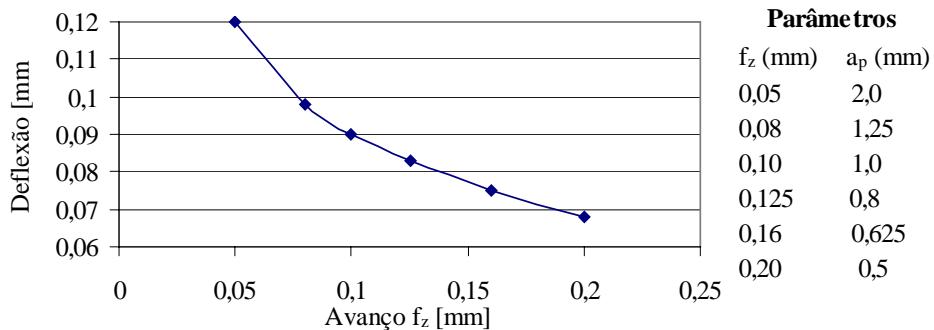


Figura 7. Variação da deflexão com os diferentes parâmetros de usinagem

Os resultados são satisfatórios, uma vez que a força de corte aumenta linearmente com o incremento da profundidade de corte  $a_p$ , enquanto que o incremento do avanço causa um aumento mais suave da força de corte, König (1997). Desta maneira, uma estratégia de corte para reduzir as amplitudes de vibração é a usinagem da peça em vários passes com o máximo possível de avanço para uma mesma velocidade de corte. Isto, obviamente, somente quando os tempos secundários desta estratégia e a vida da ferramenta estiverem em níveis aceitáveis.

## 7 CONCLUSÕES

As forças de corte presentes nos processos de torneamento e fresamento podem ser reproduzidas com sucesso pelo modelo matemático proposto, o que permite a previsão de forças no fresamento com confiabilidade baseado nas constantes de Kienzle e o uso de um banco de dados já existente de constantes sem a necessidade de serem feitos novos ensaios de fresamento.

Este modelo, quando utilizado para a análise dinâmica por elementos finitos no fresamento frontal de peças com baixa rigidez, permite a identificação da combinação dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte que resultam em menores amplitudes de vibrações, permitindo assim que as condições de usinagem sejam revistas e corrigidas antes que o processo tenha início. Quando a velocidade de corte é tal que a freqüência de passagem dos dentes coincide com a freqüência natural da peça, os níveis de vibrações aumentam significativamente. Com a maximização do avanço e redução da profundidade de corte pode-se reduzir os níveis de vibrações.

## 8 REFERÊNCIAS

- Altintas Y., Spence A., 1991, "End Milling Force Algorithms for CAD Systems", Annals of the CIRP, [S.I.], v. 40, n. 1
- Cook, R. D., Malkus D. S., Plesha, M. E., 1998, "Concepts and applications of Finite Elements Analysis". Wiscosin: University of Wisconsin.
- Crede, C. E. , Harris, C. M., 1991, "Shock and Vibration Handbook" v. 1, Mc. Graw-Hill.
- Ehmann, K. F. 1995 , DeVor, R. E. "Machining Process Modeling: a Review". Journal of Manufacture Science and Engineering, [S.I.], v. 119,
- Luttervelt, C. A., Peng, J., 1999, "Symbiosis of modelling and sensing to improve the accuracy os workpieces in small batch machining operations", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S.I.], v. 15, p. 699-710.
- König, W., Kloke, F., 1997, "Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Böhren". 4. ed. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Mackerle, J., 1999, "Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976-1996)", Journal of Material Processing Technology, Linköping, Suécia, v. 86, p. 17-44.

## THEORETICAL-EXPERIMENTAL END MILLING FORCES DETERMINATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS

**Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.**

e-mail rolf@lmp.ufsc.br

**Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Ph.D.**

e-mail mendonca@grante.ufsc.br

**Cristian Mangoni, Eng. Mec.**

e-mail cristian@lmp.ufsc.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário – Trindade, Florianópolis/SC – Brasil,  
Caixa Postal 476 – EMC – 88.010-970

**Abstract.** The aim of this work is performing a theoretical-experimental analysis of end milling forces. These forces are used as input data for a finite element dynamic analysis in workpieces submitted the alternating forces, as verified in end milling. The number of variables involved in machining processes has made impracticable, until recently, the attempt to extract trustworthy through by computational simulation. However, with the improvement of proper methods, together with the development of programs and computers, the simulation is becoming more viable. For the end milling forces simulation, experimental constants were determined related to forces, chip thickness and cutting depth. These depend on the material to be machined and the tool characteristics. These constants feed a mathematical model to simulate the behavior of the end milling cutting forces. The milling force model is used for a dynamic finite elements analysis in parts with low stiffness with the objective of determining machining parameters to avoid extreme vibrations. The results of these simulations were satisfactory.

**Key words:** Milling, forces, simulation, finite element method