

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS FORÇAS NA FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO GG25

Theodor Rucker van Caspel

Felipe Gustavo Ebersbach

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de Precisão Mecânica (LMP), Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, Trindade, CEP: 88040-900, Florianópolis - SC, Brasil.

theodorcaspel@gmail.com

felipe.ebersbach@gmail.com

rolf.schroeter@ufsc.br

Resumo. As indústrias de todos os setores buscam novas tecnologias constantemente para os seus processos produtivos, visando aumentar a sua eficiência fabril. Em processos de usinagem, a obtenção de conhecimentos sobre o processo pode demandar um grande número de ensaios, o que consome muitos recursos, bem como elevado tempo. Uma alternativa para reduzir o número de ensaios é a simulação. Nos últimos anos, a modelagem e simulação se desenvolveu em diversas áreas, porém os modelos mais precisos costumam exigir alto nível de conhecimento e testes, o que torna difícil a sua aplicação nas indústrias brasileiras. O objetivo deste trabalho é apresentar modelos de esforços para o processo de furação com brocas helicoidais e demonstrar a metodologia para obter as constantes destes modelos. Os modelos utilizados e a metodologia foram escolhidos por serem simples e necessitarem de um número relativamente pequeno de ensaios. Os erros obtidos com os modelos desenvolvidos situaram-se em valores menores do que 3%.

Palavras chave: Usinagem. Ferro fundido cinzento. Furação. Modelagem. Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Para manter sua competitividade, as indústrias têm a necessidade de estar sempre melhorando seus processos produtivos. Para que esta melhoria seja feita de maneira eficiente e que não prejudique os processos é necessário um conhecimento dos processos e dos efeitos de suas entradas e saídas.

A maneira mais direta de se obter o conhecimento de processos é através de ensaios, porém estes resultam em altos custos tanto em recursos quanto em tempo. Para reduzir estes custos, muitas vezes são utilizados métodos de simulação. A simulação consiste na criação de um sistema virtual que possui comportamento análogo ao sistema real analisado, sendo possível a realização de ensaios sem a utilização de insumos e maquinário e em menor tempo, porém necessitando de um ambiente virtual adequado (Kim e Ahn, 2005).

Para que uma simulação possua um comportamento análogo ao sistema real é necessária a utilização de modelos que descrevam o comportamento de um sistema, o que muitas vezes é feito através do uso de equações. Todo modelo possui um certo grau de imprecisão e diferentes modelos podem descrever um comportamento com diferentes graus de precisão. A escolha de um modelo irá depender da precisão requerida para o resultado, no entanto é comum que modelos que apresentam resultados mais precisos demandem mais conhecimento para serem aplicados, além de mais tempo de processamento e maior número de ensaios. Por este motivo, muitas vezes a escolha de modelos menos precisos, porém de mais fácil aplicação, se torna interessante.

Dentre os processos de fabricação por usinagem, um dos processos que apresenta grande importância é o processo de furação. De acordo com Tonshoff, *et al.*, (1994) os processos de furação costumam definir o tempo de ciclo de fabricação devido ao seu tempo de processo. Uma das maneiras de diminuir este tempo de processo é aumentando os valores dos parâmetros de processo, como por exemplo a velocidade de corte e o avanço. No ponto de vista de tempo de processo, o aumento destes parâmetros é vantajoso, porém estes influenciam nas forças de usinagem.

Além do tipo e parâmetros de processo, outro fator que tem influência na modelagem de processos de usinagem é o material a ser usinado. Um grupo de materiais bastante utilizados na indústria é o grupo dos ferros fundidos. Dentre os ferros fundidos, os ferros fundidos cinzentos se destacam pelo seu baixo custo e por apresentarem boa usinabilidade devido, principalmente, à grande quantidade de grafita livre em sua microestrutura, boa absorção de vibração e boa estabilidade dimensional. Tais características fazem com que estes materiais tenham larga aplicação em diversas indústrias metal-mecânicas (Walker, 1996; Trent e Wright, 2000; Callister, 2005).

No Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) já foram realizados vários trabalhos em modelagem e simulação de processos de usinagem. O trabalho de Ebersbach (2014) focou

em modelar tempos e custos de processos para otimização, enquanto Boeira (2010) e Gonçalves (2014) modelaram esforços em usinagem visando otimizar o projeto de ferramentas.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver modelos de esforços para furação com brocas helicoidais, bem como a demonstração da metodologia para obter as constantes destes modelos. O desenvolvimento teórico dos modelos para os esforços de furação foi realizado a partir dos modelos de Kienzle para torneamento.

2. MATERIAIS E METODOS

2.1 MODELOS

Para obter o modelo mecanicista foram utilizados os modelos de Kienzle para torneamento, conforme descrevem König e Klocke (1997). Estes modelos correlacionam os esforços de usinagem com a área da seção de corte. Para adaptar estes modelos para os esforços no processo de furação foram realizados desenvolvimentos analíticos levando em consideração a geometria do cavaco não deformado gerado no processo e a configuração dos esforços gerados.

Utilizando os modelos de Kienzle é possível deduzir equações para os dois esforços presentes na furação, o momento em z (M_z) e a força de avanço em z (F_z). Considerando M_z como resultante das forças de corte aplicadas no centro dos cavacos gerados pelos dois gumes da broca e F_z como a soma das forças de avanço obtêm-se as Eq. 1 e Eq. 2.

$$M_z = \frac{k_{c1.1} D^2 \left(\frac{f_z}{2} \sin \frac{\sigma}{2} \right)^{(1-m_c)}}{4000 \sin \frac{\sigma}{2}} \quad (1)$$

$$F_z = \frac{k_{f1.1} \left(\frac{f_z}{2} \sin \frac{\sigma}{2} \right)^{(1-m_f)}}{\sin \frac{\sigma}{2}} \quad (2)$$

Onde $k_{c1.1}$ e $k_{f1.1}$ são respectivamente as forças específicas de corte, avanço e passiva, f_z é o avanço, D é o diâmetro da broca e σ o ângulo de ponta da broca. Os expoentes $(1-m_c)$, $(1-m_f)$ e $(1-m_p)$ representam respectivamente os coeficientes de Kienzle das forças de corte, avanço e passiva, respectivamente.

Estes modelos possuem certas limitações, como por exemplo a origem predominantemente empírica. Isto implica que estes modelos preveem comportamentos usando dados experimentais sem modelar os fenômenos envolvidos, fazendo com que sua capacidade de previsão diminua conforme a simulação se distancie das condições dos ensaios usados para sua obtenção. Outra limitação é que alguns fenômenos da furação com brocas helicoidais não foram considerados, como a ação do gume transversal, fazendo com que a utilização das constantes obtidas em ensaios de torneamento não seja adequada.

Para aumentar a aplicabilidade do modelo são empregados fatores de correção para as forças específicas. Os fatores utilizados foram para a variação da velocidade de corte, conforme Paucksh, (1996), sendo apresentados nas Eq. 3 e Eq. 4. Outros fatores de correção podem ser utilizados, porém deve-se obter a forma de suas equações em literatura ou por análise de correlações com as entradas utilizadas.

$$f_{sv} = \left(\frac{v_{c0}}{v_c} \right)^n \quad (3)$$

$$g_{sv} = \left(\frac{v_{c0}}{v_c} \right)^m \quad (4)$$

Sendo f_{sv} e g_{sv} os fatores de correção para velocidade de corte para $k_{c1.1}$ e $k_{f1.1}$, respectivamente. As letras 'm' e 'n' são constantes e v_{c0} e v_c são respectivamente a velocidade de corte de referência e a velocidade de corte ensaiada. Para utilizar os fatores de correção uma condição deve ser considerada a de referência e esta será usada para obter as constantes do sistema, devendo haver apenas a variação do avanço para obter o expoente de Kienzle. Para obter o valor do fator de correção basta dividir o valor de esforços de um ensaio, onde apenas o fator de correção de interesse esteja agindo, pelo valor do mesmo esforço do ensaio de referência.

2.2 ENSAIOS

Os ensaios foram realizados utilizando corpos de prova de ferro fundido GG25 com $\varnothing$ 100 mm X 200 mm. As brocas utilizadas nos ensaios foram helicoidais de metal-duro, classe K10, com $\varnothing$ 7 mm ângulo de ponta de 120° e revestimento de TiN.

A máquina utilizada foi um centro de usinagem de três eixos Charles MVC-955, com comando Sinumerik 840D. A aquisição dos esforços foi realizada através de uma plataforma piezelétrica Kistler, modelo 9273, dois amplificadores Kistler, modelo 5011 e uma placa de aquisição National Instruments NI-USB-6218. O sistema de aquisição foi ligado a um computador com o *software* Labview utilizando uma frequência de aquisição de 10 kHz para F_z e M_z e um filtro passa-baixa de 1 kHz.

Foram realizados ensaios variando o avanço e a velocidade de corte em três níveis, conforme a Tab. 1. Foi realizada uma repetição para cada ensaio, totalizando 18 ensaios de furação. Os valores centrais foram definidos por pesquisa em literatura de valores usuais do processo, sendo que a profundidade dos furos foi de 15 mm. Os outros valores foram definidos para obter um intervalo de interesse para a aplicação do modelo. Após processar os dados brutos, os valores de esforços de cada ensaio foram definidos como os esforços máximos durante o processo.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos ensaios.

Parâmetro	Valores ensaiados
Velocidade de corte [m/min]	40; 55; 70
Avanço [mm]	0,08; 0,17; 0,25

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CONSTANTES OBTIDAS

Utilizando os valores de esforços obtidos nos ensaios, as constantes que regem o modelo foram extraídas. As primeiras constantes obtidas foram os expoentes de Kienzle, obtidos utilizando apenas os dados dos ensaios com $v_c = 55$ m/min. Utilizando os expoentes encontrados, foram calculadas as forças específicas para os ensaios com $v_c = 55$ m/min e a força específica do modelo foi definida como sua média. Por último foram calculados os fatores de correção de cada um dos outros ensaios e as constantes dos fatores foram calculadas a partir de um valor médio. Todas as constantes obtidas estão apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. Constantes obtidas para o modelo.

Constante	Valores encontrados
k_c [N/mm ²]	1100
k_f [N/mm ²]	860
$(1-m_c)$ [-]	0,7
$(1-m_f)$ [-]	0,9
m [-]	-0,003
n [-]	-0,027

3.2 ANÁLISE

Após obter os valores das constantes, foram feitas simulações para obter os valores teóricos para os ensaios utilizando o modelo. Isto foi feito para verificar o quão próximos os valores simulados chegavam aos valores ensaiados. Na Figura 2 é apresentada a relação entre os esforços medidos e os obtidos utilizando os modelos. Para F_z o erro médio entre os valores ensaiados e simulados foi aproximadamente 3%, enquanto que para M_z situou-se em torno de 7,5%. Os maiores erros foram de 7,2% e 19% para F_z e M_z respectivamente, o que pode ser associado às maiores dispersões dos valores medidos de M_z em relação aos valores de F_z .

Os valores dos expoentes de Kienzle mostram que para as condições ensaiadas, a espessura do cavaco possui uma maior influência em M_z do que em F_z . Esta informação pode ser importante onde se tem a necessidade de otimizar os parâmetros de processo para reduzir um dos esforços.

Os valores encontrados para as constantes 'm' e 'n' contradizem o relatado na literatura, pois seus valores negativos indicam que existe uma tendência a um aumento dos esforços com o aumento da velocidade de corte. Estes valores podem ter ocorrido devido ao pequeno número de repetições realizadas neste trabalho. Os valores encontrados são bastante pequenos, sendo provável que com um número maior de ensaios os resultados apresentassem pequenas diferenças em relação aos obtidos na pesquisa.

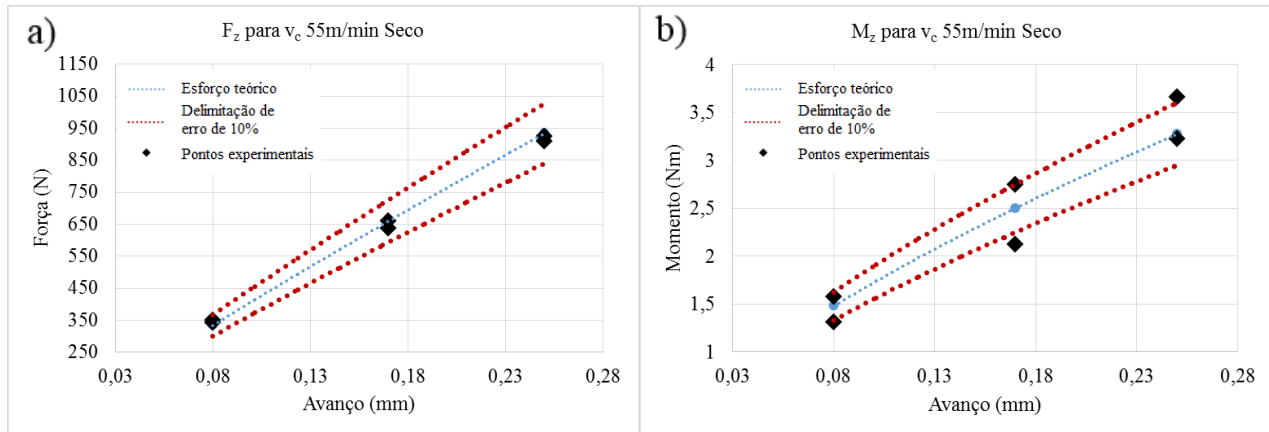


Figura 2. Comparação entre esforços obtidos pelos modelos e pontos experimentais, a) F_z e b) M_z .

Uma tendência que foi verificada é de que os erros aumentam com a aplicação dos fatores de correção. Isto se deve ao fato de apesar do modelo aplicado ser mecanicista, ele é predominantemente empírico e modela resultados e não os fenômenos que os causam.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um modelo para os esforços em processos de furação com brocas helicoidais e foi demonstrada uma metodologia para a obtenção das constantes para este modelo. Deve ser entendido que este modelo tem o objetivo de alcançar um entendimento básico dos esforços oriundos do processo e sua precisão irá depender da qualidade e quantidade de ensaios realizados para obter suas constantes. Deve também ser lembrado que as constantes do modelo são válidas apenas para a geometria de brocas ensaiadas.

Este modelo é menos preciso e versátil do que muitos modelos utilizados atualmente, porém sua vantagem está em ele não exigir um grande nível de conhecimento para ser aplicado e nem de testes exaustivos na obtenção de suas constantes. É recomendado que o modelo e metodologia apresentados neste trabalho sejam utilizados em análises preliminares para redução de custos quando não se necessita de uma grande precisão nos resultados.

Para trabalhos futuros, pode-se analisar a relação entre precisão do modelo e o número de ensaios utilizados para a obtenção das constantes. Além disto podem ser realizados ensaios para obter outros coeficientes de correção para ampliar a aplicabilidade do modelo.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em especial ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC); ao Laboratório de Mecânica e Precisão (LMP); ao Laboratório de Materiais (LABMAT) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq).

4. REFERÊNCIAS

- Boeira, A. M. G., 2010. *Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos*. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Callister, W. D. J., 2005. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 2 ed. New York: John Wiley&Sons, Inc.
- Ebersbach, F. G., 2014. *Otimização dos tempos e custos do fresamento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Gonçalves, G. A., 2014. *Análise teórico-experimental dos esforços no brochamento helicoidal*. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Kim, K. W.; Ahn, T. K., 2005. *Force Prediction and Stress Analysis of a Twist Drill from Tool Geometry and Cutting Conditions*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 6, Nr. 1, p. 65-72.
- König, W.; Klocke, F., 1997. *Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Böhren*. VDI-Verlag, Dusseldorf, 4ª edição.
- Paucksh, E., 1996. *Zerspantechnik* Vieweg, Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag.
- Stemmer, G. E., 2008. *Ferramentas de corte I*. UFSC, Florianópolis, 4ª edição.
- Tonshoff, H. K., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994. *Machining of Holes Developments in Drilling Technology*. CIRP Annals, Vol. 43, Issue 2, p. 551-561.

Trent, E. M. e Wright, P.K., 2000. *Metal Cutting*. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann.
Walker, J. M., 1996. *Handbook of Manufacturing Engineering*. New York: Marcel Dekker.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MODELING AND SIMULATION OF FORCES IN DRILLING OF GREY CAST IRON GG25

Theodor Rucker van Caspel

Felipe Gustavo Ebersbach

Rolf Bertrand Schroeter

Federal University of Santa Catarina (UFSC), Precision Mechanic Laboratory (LMP), Mechanical Engineering Department. Eng.
Agrônomo Andrei Cristian Ferreira st, Trindade, Zip code 88040-900, Florianópolis - SC, Brazil.

theodorcaspel@gmail.com

felipe.ebersbach@gmail.com

rolf.schroeter@ufsc.br

Abstract. Industries from every sector constantly seek for their productive processes, aiming to increase their factories efficiency. On machining processes, the acquisition of knowledge about processes can take a great number of tests that consumes a lot of resources as well as a lot of time. One alternative to reduce the number of tests is simulation. In recent years, modeling and simulation have developed in many areas but the more precise models usually require a high level of knowledge and testing that make their application complicated in Brazilian industries. The objective of this work is to present models to the strains in drilling processes with helicoidal drills and demonstrate a methodology to obtain the constants of these models. The models used and the methodology were chosen for being simple and require a relatively small number of tests. The errors obtained with the developed models were in average smaller than 3%.

Keywords: Machining. Gray cast iron. Drilling. Modeling. Simulation.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.