

MODELAGEM DOS ESFORÇOS NO ALARGAMENTO DE FERRO FUNDIDO GG25

Michel Reis Pedreira Muniz Tavares

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina

rolf.schroeter@ufsc.br

micheltavares86@gmail.com

Maria Vitória Sikora

Universidade Federal de Santa Catarina

maria.v.siko@gmail.com

Resumo. Por ocorrer posteriormente a processos como furação e mandrilamento, o processo de alargamento soma o custo destes em casos de falhas e há, portanto, uma grande demanda no estudo dos seus fenômenos físicos. Dentre estes, há a relação entre os esforços de usinagem e os parâmetros de processo. Neste trabalho, o alargamento de peças de ferro fundido GG25 foi realizado variando-se dois parâmetros de processo: a velocidade de corte (32; 65; e 97 m/min) e o avanço (0,12; 0,16; 0,32; e 0,48 mm). A ferramenta utilizada foi um alargador de metal-duro com oito gumes, canais retos e diâmetro nominal de 18,98 mm. Os pré-furos tinham diâmetro de 18,50 mm e profundidade dos mesmos era de 9 mm. Ao longo destes alargamentos, foram obtidos os valores do momento de corte e força de avanço através de uma plataforma piezométrica. Com os resultados obtidos foram elaborados modelos usando três técnicas: modelo de Kienzle utilizando valores tabelados para as constantes; modelos de Kienzle utilizando constantes calculadas através dos valores experimentais; e redes neurais artificiais do tipo feed-forward. Os modelos foram comparados através do erro médio absoluto em porcentagem e do erro quando da simulação de um alargamento feito com velocidade de corte 85 m/min e 0,24 mm de avanço. Os modelos de redes neurais apresentaram menores erros. O modelo que utilizou as constantes tabeladas de Kienzle apresentou erro médio absoluto superior a 500% para a força de avanço, mas mostrou uma tendência, possibilitando o uso de um fator de correção.

Palavras chave: Usinagem. Modelagem. Forças. Redes neurais. Kienzle.

1. INTRODUÇÃO

O processo de alargamento ocorre posteriormente a outros como, por exemplo, a furação e o mandrilamento, logo os custos de uma falha no alargamento somam-se aos custos das etapas anteriores. Como consequência, estudos dos fenômenos que ocorrem no alargamento são necessários para reduzir os prejuízos decorrentes de falhas neste processo. Dentre os fenômenos a serem estudados, está o comportamento dos esforços de usinagem ao longo deste processo.

Os esforços no alargamento têm ordem de grandeza pequena quando comparados com furação, fresamento e alguns outros processos de usinagem com geometria definida comumente aplicados. Dada esta condição, os esforços no alargamento podem ter menor demanda de estudos sobre a ótica das deformações provocadas nas peças durante a usinagem, entretanto servem como variáveis intermediárias para a obtenção de parâmetros de maior interesse na indústria como, por exemplo, a rugosidade da peça usinada ou a potência consumida pela máquina-ferramenta, colocando-se então como variáveis intermediárias (Arrazola *et al.*, 2013).

O presente trabalho apresenta uma comparação entre redes neurais do tipo *feed-forward* e o modelo de Kienzle na modelagem do momento de corte e da força de avanço no alargamento de ferro fundido GG25. O modelo de Kienzle foi dividido em dois para a comparação - o modelo com os valores das constantes tabeladas e ajustadas pelos fatores de correção presentes na literatura (Paucksch, 1996), chamado de "Kienzle tabelado" e o modelo com as constantes obtidas experimentalmente, chamado de modelo de "Kienzle calculado".

2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu na execução de 12 ensaios de alargamento a seco em ferro fundido GG25, utilizando-se velocidades de corte nos valores de 32, 65 e 97 m/min e os avanços da ferramenta de 0,12, 0,16, 0,32 e 0,48 mm. Os pré-furos dos corpos de prova possuíam diâmetro de 18,50 mm e profundidade de 9 mm. Os dados obtidos para a força de corte e de avanço nestes ensaios foram utilizados para obter constantes do modelo de Kienzle e para gerar as redes neurais.

A ferramenta de corte utilizada foi um alargador de canais retos e gumes ajustáveis (para compensar o desgaste da ferramenta), cujo diâmetro nominal é de 18,98 mm. A ferramenta possuía insertos de metal-duro, seis gumes, além de canais para escoamento de meios lubrificantes, que neste caso não vieram a ser utilizados, visto terem sido os ensaios realizados a seco.

Para a aquisição dos sinais de força de avanço e momento de corte foi utilizada uma plataforma piezelétrica Kistler® 9273. As cargas elétricas provenientes do dinamômetro foram transformadas em valores de tensão proporcionais à carga por amplificadores de sinal Kistler, tipo 5019b141. Os sinais de tensão foram adquiridos por uma placa de aquisição NI-USB- 6218 e armazenados em um computador contendo um aplicativo desenvolvido no software Labview®. Estes equipamentos foram dispostos conforme a representação esquemática apresentada na Fig. (1).

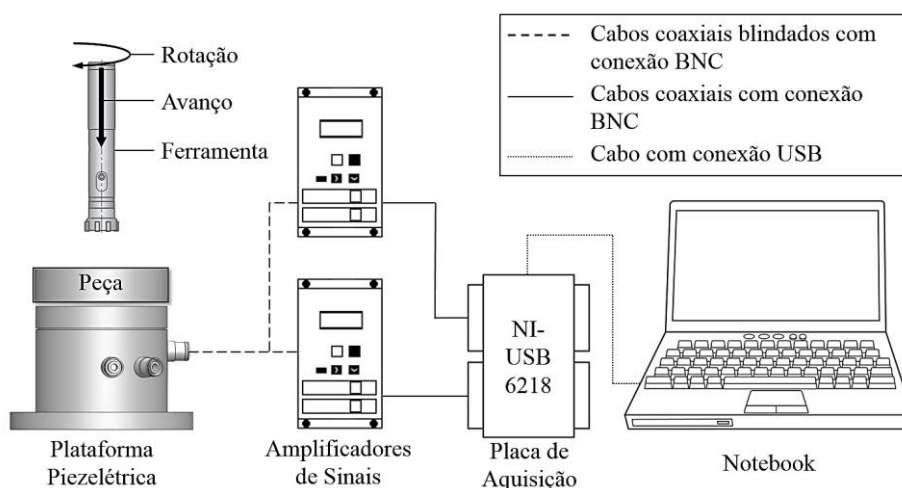


Figura 1. Representação esquemática da bancada de ensaios de alargamento destacando o sistema de medição de força de avanço e momento de corte. Fonte: (Tavares, 2018).

Foram utilizados três valores de velocidade de corte e quatro valores para o avanço. O objetivo de utilizar mais valores de avanço decorre da maior influência deste parâmetro nos esforços analisados. A Tabela (1) apresenta os valores utilizados e as nomenclaturas dadas a cada um dos ensaios de acordo com seus parâmetros.

Tabela 1. Nomenclatura dos ensaios.

Avanço (mm)	0,12	0,16	0,32	0,48
Velocidade de corte (m/min)	32	65	97	
	$E_{12,32}$	$E_{16,32}$	$E_{32,32}$	$E_{48,32}$
	$E_{12,65}$	$E_{16,65}$	$E_{32,65}$	$E_{48,65}$
	$E_{12,97}$	$E_{16,97}$	$E_{32,97}$	$E_{48,97}$

Adicionalmente foi realizado um ensaio com avanço de 0,24 mm e velocidade de corte de 85 m/min. Logo, seguindo a lógica da Tab. (1), este recebeu o nome de $E_{24,85}$. Os dados obtidos neste ensaio não foram utilizados para a obtenção dos modelos, mas para a simulação dos mesmos.

Os valores selecionados para as análises foram obtidos a partir do momento em que o chanfro do alargador, que representa os gumes principais da ferramenta, penetra totalmente a peça. Este momento é calculado a partir dos parâmetros de corte e da determinação do momento em que a usinagem começa nos sinais de força. Para obter uma média, um conjunto de pontos coletados posteriormente a este momento é selecionado. A quantidade de pontos depende do sinal de força, podendo variar de menos de um segundo a até todo o período em que a ferramenta penetra a peça, dependendo da qualidade do sinal obtido. A Figura (2) apresenta o momento em que os sinais são coletados:

A modelagem dos esforços com os dados obtidos seguiu duas metodologias: modelo de Kienzle e redes neurais. A equação do modelo de Kienzle foi reescrita em uma forma logarítmica conforme Tavares (2018), incluindo o fator de correção da velocidade de corte. Desta forma as constantes puderam ser obtidas através de uma regressão múltipla dos dados conforme Fig. (3).

Ao constante “ k_c ” representa a força específica de corte, “ $(1-m_c)$ ” representa o expoente do modelo de Kienzle que relaciona o impacto da variação da espessura de usinagem na força de corte e a variável “ n ” é um expoente do fator de correção da velocidade. Estas três constantes possuem as seguintes equivalentes para força de avanço: “ k_f ”, “ $(1-m_f)$ ” e “ m ”. As constantes “ V_c ” e “ V_{c0} ” representam respectivamente a velocidade de corte utilizada nos ensaios e a velocidade

de corte de referência, que neste trabalho foi de 65 m/min. A constante “f” representa o avanço da ferramenta, “F_c” a força de corte, “a_p” a profundidade de corte e “κ_r” o ângulo de direção do gume da ferramenta.

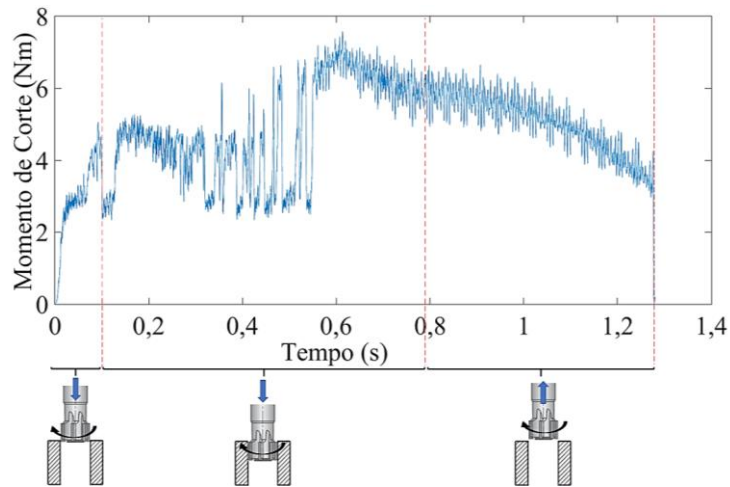


Figura 2. Exemplo de sinal de momento de corte para o alargamento com velocidade de corte de 97 m/min e avanço de 0,48 mm utilizando um alargador de metal-duro e de canais retos.

$$\log\left(\frac{\text{sen}(\kappa_r) \cdot F_c}{8 \cdot a_p}\right) = \log(k_c) + n \cdot \log\left(\frac{V_{c0}}{V_c}\right) + (1-m_c) \cdot \log\left(\frac{f}{8} \cdot \text{sen}(\kappa_r)\right)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \varepsilon$$

Figura 3. Representação da Equação do modelo de Kienzle na forma logarítmica e na forma de uma regressão multilinear. Fonte: (Tavares, 2018).

Para as redes neurais, um algoritmo variou o número de neurônios na camada oculta entre um e cem neurônios em uma rede do tipo *Feed-Forward* com treinamento do tipo *Backpropagation*. Uma rede foi criada para cada uma dos esforços medidos utilizando como critério de seleção o erro médio absoluto em porcentagem (em inglês MAPE: *Mean Absolute Percentage Error*). Foram selecionadas as redes com menor valor deste erro para cada um dos dois esforços. Durante o treinamento, 20% dos valores utilizados foram utilizados para validação e os demais para treinamento.

3. RESULTADOS

Os valores dos esforços obtidos experimentalmente para a força de avanço e de corte estão apresentados na Fig. (4) em escala bilogarítmica. Como os valores tabelados dos coeficientes de Kienzle são usualmente dados para a força de corte e não para o momento de corte, os valores obtidos para o segundo foram convertidos para o primeiro.

É possível observar um comportamento linear para as diversas velocidades de corte na Fig. (4) (a). O mesmo não é perceptível na Fig. (4) (b). Uma possível causa para este desvio encontra-se no sistema de medição onde, durante a realização de uma verificação do sistema utilizando massas padrão, foi identificada uma perda de carga (*drift*) não linear e, portanto, de modelagem e compensação mais complexa. Como consequência, três dos ensaios não foram utilizados para a modelagem da força de avanço. Foram eles: E_{16,97}, E_{48,32} e E_{48,65}. Adicionalmente, também é possível observar na Fig. (4) um maior impacto da variação do avanço que da velocidade de corte em ambos esforços.

A partir dos dados dos ensaios foram obtidos os valores para as constantes dos modelos de Kienzle apresentados na Tab. (2). Também seguem representados os valores tabelados corrigidos com os coeficientes para os valores de velocidade de corte, ângulo de direção do gume da ferramenta, diâmetro da ferramenta e ângulo de saída da ferramenta utilizando as equações disponíveis em Paucksch (1996).

De forma geral os valores calculados apresentaram ordem de grandeza semelhante aos tabelados, sendo que a exceção foi o expoente “(1-mf)”. Uma possível explicação está relacionada ao confinamento do cavaco no processo de alargamento, o que não ocorre no torneamento, processo utilizado para obtenção dos valores tabelados. Como consequência, os valores obtidos para a força de avanço utilizando parâmetros tabelados apresentam um grande desvio dos valores obtidos experimentalmente. Entretanto este erro é tendencioso, e pode ser minimizado através de um fator de

correção de valor -272 N. Adicionalmente, este erro é também maior na velocidade de corte mais baixa (32 m/min). Este valor de velocidade de corte não é usual para a ferramenta aplicada, pois está muito abaixo do recomendado pelo fabricante. Removendo este valor de velocidade e recalculando o fator de correção, chega-se ao valor de -267 N.

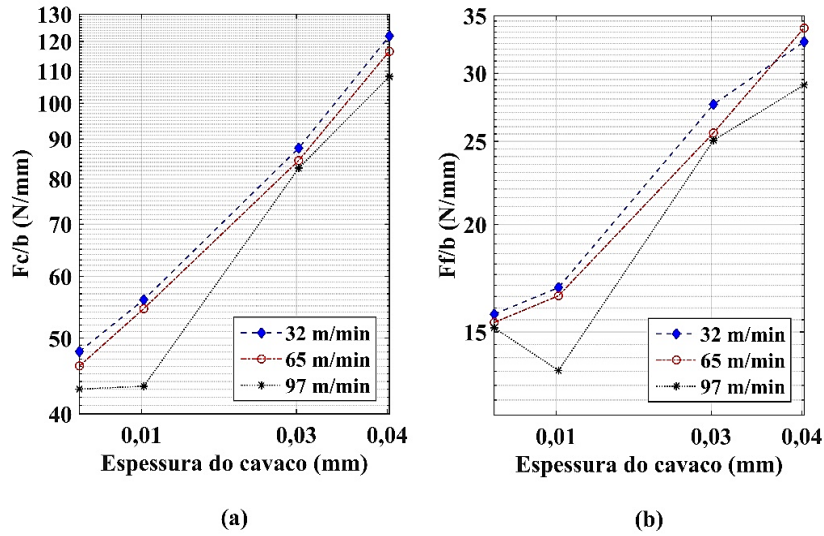


Figura 4. Resultados dos esforços para força de corte e avanço em escala bilogarítmica. (a) força de corte; (b) força de avanço.

Tabela 2. Constantes de Kienzle experimentais e tabeladas.

Conjunto de dados	$(1-m_c)$	k_c (N/mm ²)	n	$(1-m_f)$	k_f (N/mm ²)	m
Calculado	0,68	975	0,1	0,54	175	0,1
Tabelado	0,74	1179	0,1	0,09	173	0,1

Quando comparados aos modelos de Kienzle tabelado e calculado, as redes neurais decorreram em menores erros médios absolutos e menores erros durante a simulação do ensaio E_{24,85}. Estes resultados condizem com a literatura (Gonçalves, 2012), onde modelos de medição de esforços no processo de brochamento helicoidal utilizando redes neurais acarretaram menores erros. Esta comparação entre os modelos é observada na Tab. (3).

O valor do erro de simulação ($Erro_{sim}$) obtido através das redes neurais para o do momento de corte foi inferior ao obtidos por Tavares (2018). Uma possível explicação é a diferente forma de selecionar a rede. A princípio, a melhor rede segundo critério do algoritmo, implicaria em $Erro_{sim}$ maior que 5% e um $Erro_{Médio}$ de 2,1%, critério usado por Tavares (2018), contudo, dentre as diversas topografias de rede utilizadas, foi selecionada a rede cujos resultados estão na Tab. (3). Logo, a diferença entre os erros médios dos dois critérios é de 0,1%, valor que só apresenta relevância para a comparação feita na Tab. (3), pois não seria possível assegurar que ambos são diferentes por meio de um teste de hipótese, entretanto, caso este número de algarismos significativos não fosse adotado, o $Erro_{Médio}$ para a força de avanço calculado via rede neural seria 0% por aproximação.

Tabela 3. Comparação entre os modelos quanto ao erro médio absoluto em porcentagem ($Erro_{Médio}$) e quanto a capacidade de simulação ($Erro_{sim}$).

Modelo	Kienzle Calculado		Kienzle Tabelado		Redes Neurais	
Esforço	M_c	F_f	M_c	F_f	M_c	F_f
$Erro_{Médio}$	3,9%	3,9%	5,4%	534,0%	2,2%	0,4%
$Erro_{sim}$	3,3%	3,9%	1,5%	396,0%	1,3%	3,9%

4. CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou a comparação de diferentes técnicas de modelagem de esforços no alargamento a seco de ferro fundido GG25 utilizando uma ferramenta de metal-duro e canais retos. Os erros médios absolutos obtidos

permaneceram em patamares inferiores a 5% para os modelos produzidos (redes neurais e Kienzle calculado), enquanto que modelos que utilizaram valores presentes na literatura (Kienzle tabelado) apresentaram erros maiores, especialmente no cálculo da força de avanço.

Os erros obtidos utilizando os valores tabelados dos coeficientes de Kienzle no cálculo das forças de avanços foram mais de cem vezes superiores aos demais, porém estes mostraram-se tendenciosos e passíveis de redução com o auxílio de um fator de correção. Esta tendência sugere que uma particularidade do processo de alargamento como, por exemplo, o confinamento do cavaco durante o processo de corte, podem inviabilizar o uso de constantes tabeladas para os coeficientes de Kienzle, por sua vez obtidas em ensaios de torneamento.

5. REFERÊNCIAS

- Arrazola, P.J., Özel, T., Umbrello, D., Davies, M., Jawahir, I.S., 2013, "Recent Advances in Modelling of Metal Machining Processes." CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 62, n. 2, p. 695–718.
- Gonçalves, D.A., 2012, "Análise Teórico-Experimental dos Esforços no Brochamento Helicoidal." [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina.
- Paucksch, E., 1996, "Zerspantechnik." 1ª ed. Weisbaden: Vieweg.
- Tavares, M.R.P.M., 2018, "Medição e modelagem dos esforços no alargamento de furos em ferro fundido GG25." [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Modeling of Torque and Thrust in GG25 Cast Iron Reaming

Michel Reis Pedreira Muniz Tavares

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina
rolf.schroeter@ufsc.br
micheltavares86@gmail.com

Maria Vitória Sikora

Universidade Federal de Santa Catarina
maria.v.siko@gmail.com

Abstract. *The reaming process is usually performed after other processes such as drilling and boring, hence the cost of these previous processes are added to any failure cost in reaming. As a consequence, there is a demand to study reaming physical phenomena such as the relation between the reaming torque and thrust and the process parameters. In the present work, reaming operations in GG25 cast iron were conducted ranging two process parameters: the cutting speed (32; 65; e 97 m/min) and the feed rate (0.12; 0.16; 0.32; e 0.48 mm). The applied tool was an eight straight flute right hand cut carbide reamer with a 18.98 mm diameter. The pre-holes were 18.50 mm wide in diameter and 9 mm in deep. During the experiments, the torque and thrust values were acquired with a piezoelectric platform. Three different models were developed with the results: a Kienzle with constants values from reference tables; a Kienzle model with calculated constant values; and a feed-forward neural network model. The mean absolute percentage error (MAPE) was used as the comparison criteria, as well as the simulation of reaming realized with a cutting speed of 85 mm/min and a feed of 0.24mm. The neural network model presented lower MAPE and better simulation results. The use of table constants for a Kienzle model generated errors greater than 500% for thrust, but with a bias, that allowed the use of a correction factor.*

Keywords: *machining, forces, neural Network, Kienzle.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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