

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS NO MANDRILAMENTO DE FERRO FUNDIDO GG25

Mateus Lopes Siviero, mateuslopesiviero@hotmail.com<sup>1</sup>  
João Marcelo Bittencourt Lima, jmarcelo2805@gmail.com<sup>1</sup>  
Theodor Rucker van Caspel, theodorcaspel@gmail.com<sup>1</sup>  
Felipe Gustavo Ebersbach, felipe.ebersbach@gmail.com<sup>1</sup>  
Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil.

**Resumo:** A indústria de fabricação sofre constantes avanços no sentido de aumentar a produtividade, a qualidade dos produtos e ainda diminuir os custos de produção. Pode-se afirmar que esses são os principais aspectos buscados atualmente, tanto pelos engenheiros como pelos pesquisadores e demais profissionais da área. No intuito de diminuir o consumo de matéria prima, simulações são aplicadas no projeto de peças para validar o seu dimensionamento geométrico. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo desenvolver um modelo de forças adequado para o mandrilamento externo de ferro fundido cinzento GG25. Como objetivos secundários têm-se o estudo do modelo e a possível aplicação do mesmo em futuras simulações numéricas pela empresa parceira. O modelo é baseado na Equação de Kienzle, sendo que os dados são obtidos através de ensaios de torneamento, processo no qual as dificuldades de ensaio são significativamente menores. Os ensaios ocorreram em um torno CNC Heyligenstaedt, modelo Heynumat 10U, nos quais foram variados o avanço ( $f = 0,075, 0,15$  e  $0,225$  mm) e a profundidade de corte ( $a_p = 0,5, 1$  e  $1,5$  mm), sendo que as componentes da força de usinagem foram monitoradas através de uma plataforma piezelétrica da empresa Kistler Instruments. Foram realizados modelos para a profundidade de corte de 0,5mm separados das profundidades de 1 e 1,5mm. Os resultados foram satisfatórios e as diferenças entre os dados simulados e ensaiados mantiveram-se dentro do intervalo tolerado, com exceção da força passiva para a profundidade de corte de 1 e 1,5 mm.

**Palavras-chave:** Usinagem, mandrilamento, modelagem, simulação, força de usinagem.

### 1. INTRODUÇÃO

Os produtos fabricados por empresas de todos os setores, atualmente, devem apresentar boa qualidade, tempo de produção reduzido e preços competitivos, devido à grande concorrência em um mundo cada vez mais globalizado. Para atingir tais características, torna-se fundamental para as empresas que ocorra uma melhoria constante dos processos produtivos, buscando novas soluções para produzir seus produtos com a qualidade requerida em um tempo cada vez menor e com mínimos custos de produção.

Os processos de usinagem, dentre todos os processos de fabricação, assumem suma relevância para as empresas do ramo metal-mecânico, tanto economicamente como tecnologicamente. Segundo Walker (1996), operações de usinagem fazem parte do processo de manufatura da maioria dos produtos industrializados. Como consequência disso, os processos de usinagem apresentam importante papel para a indústria de manufatura, o que estimula o contínuo desenvolvimento de novas tecnologias e o constante estudo dos processos de usinagem.

Dentro do grupo das ligas metálicas ferrosas, destacam-se os ferros fundidos devido às suas propriedades térmicas e mecânicas, sendo aplicados amplamente na indústria metal-mecânica. Os ferros fundidos cinzentos, dentre todos os tipos de ferros fundidos, apresentam baixo custo de fabricação, boa absorção de vibrações, boa estabilidade dimensional e a boa usinabilidade ocasionada particularmente pela grande quantidade de grafita livre em sua microestrutura. Essas características fazem com que os ferros fundidos cinzentos apresentem uma larga aplicação nas indústrias de máquinas e equipamentos, automobilística, ferroviária e naval (Metals Handbook, 1997; Callister, 2005; Chiaverini, 2012 e Norton, 2013).

O conhecimento da grandeza e da orientação das forças durante a usinagem é base para a determinação das condições de corte, das deformações da peça usinada e dos modos de falha da mesma. Tal conhecimento serve também para a avaliação da precisão de uma máquina-ferramenta, para a determinação de procedimentos que ocorrem na região de formação de cavaco e para a explicação de mecanismos de desgaste. Diante disto, a modelagem e simulação de forças na usinagem é uma ferramenta de grande importância, permitindo a obtenção de dados com alto grau de aproximação (Kim, 2005; König, 2005 *apud* Boeira, 2010). Com o intuito de diminuir os custos de produção, atualmente são cada vez mais empregadas ferramentas computacionais no projeto das peças, de modo que permitam simular o processo de forma confiável.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de forças para a operação de mandrilamento externo. O modelo é baseado e adaptado do modelo de Kienzle e emprega coeficientes adaptados através de ensaios de

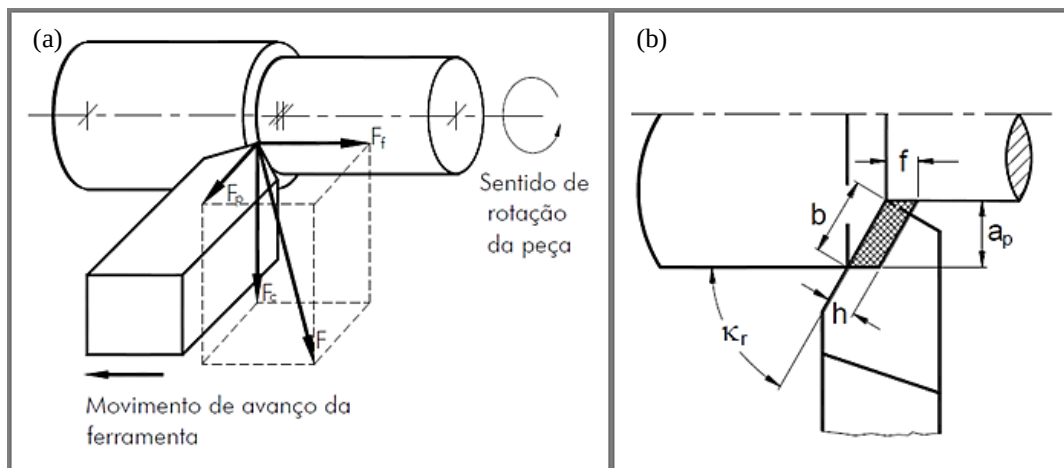
torneamento, processo no qual tais dificuldades são significativamente menores, de acordo Boeira (2010). Ensaios de torneamento longitudinal externo foram realizados, mantendo-se constante a geometria das ferramentas de corte, variando-se o avanço e a profundidade de corte, sendo monitoradas em todos os ensaios as componentes da força de usinagem com emprego de uma plataforma piezelétrica.

## 2. METODOLOGIA

O processo de mandrilamento é bastante semelhante ao processo de torneamento, sendo que no mandrilamento a ferramenta de corte sofre rotação e a peça a ser usinada normalmente permanece em repouso durante o ciclo de usinagem. Diferentemente de processos como furação e fresamento, a rotação no mandrilamento não ocorre em torno do eixo de simetria da ferramenta, e sim a ferramenta orbita em torno do eixo de simetria da peça, de maneira semelhante ao que ocorre no processo de torneamento. Com base nessas constatações, extrapolar os resultados de ensaios de torneamento para o processo de mandrilamento torna-se factível.

Boeira (2010), em sua pesquisa, utilizou dados de torneamento para modelar esforços no processo de furação e obteve resultados satisfatórios para a força de corte ( $F_c$ ) e de avanço ( $F_f$ ). Mangoni (2004) também utilizou dados de torneamento para modelagem de esforços em fresamento, obtendo resultados satisfatórios para a força passiva ( $F_p$ ) e força de corte ( $F_c$ ). Como explanado anteriormente, o processo de furação e de fresamento possuem divergências cinemáticas mais significativas com relação ao torneamento do que o processo de mandrilamento.

O modelo mais difundido para calcular as componentes da força de usinagem é o modelo de Kienzle, o qual se trata de um modelo empírico para o torneamento em geral com ferramentas com gumes retos. Para calcular as componentes da força de usinagem (Fig. 1a), utilizam-se as Eq. (1), (2) e (3). As Equações (4) e (5) são obtidas por meio de relações trigonométricas na geometria da seção de corte (Fig.1b). As forças específicas de corte ( $k_{c1.1}$ ), de avanço ( $k_{f1.1}$ ) e passiva ( $k_{p1.1}$ ), juntamente com os expoentes da equação de Kienzle, são determinadas com a ajuda de resultados de ensaios que monitoram a força de corte, força de avanço e a força passiva.



**Figura 1. (a) Componentes da força de usinagem.  $F_p$  é a força passiva,  $F_f$  é a força de avanço e  $F_c$  é a força de corte e (b) mostra a seção de corte, de König e Klocke (1997).**

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

$$F_f = k_{f1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_f)} \quad (2)$$

$$F_p = k_{p1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_p)} \quad (3)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin K_r} \quad (4)$$

$$h = f \cdot \sin K_r \quad (5)$$

Onde:

- $k_{c1.1}$  - Força específica de corte para  $b \times h = 1 \text{ mm}^2$ ;
- $k_{f1.1}$  - Força específica de avanço para  $b \times h = 1 \text{ mm}^2$ ;
- $k_{p1.1}$  - Força específica passiva para  $b \times h = 1 \text{ mm}^2$ ;
- $b$  - Largura do cavaco [mm];

|         |                                                |
|---------|------------------------------------------------|
| $h$     | - Espessura do cavaco [mm];                    |
| $1-m_c$ | - Expoente de Kienzle para a força de corte;   |
| $1-m_f$ | - Expoente de Kienzle para a força de avanço;  |
| $1-m_p$ | - Expoente de Kienzle para a força passiva;    |
| $f$     | - Avanço [mm];                                 |
| $a_p$   | - Profundidade de corte [mm];                  |
| $K_r$   | - Ângulo de direção do gume da ferramenta [°]. |

Caso o processo de mandrilamento estudado fosse interno, segundo Paucksh (1996), um fator de correção deveria ser adicionado com relação à concavidade. E caso as ferramentas não fossem de gumes retos, as Eq. (4) e (5) deveriam também ser adaptadas, levando-se em consideração a geometria das ferramentas utilizadas. Neste trabalho as ferramentas da operação de mandrilamento estudadas possuem gumes retos, como frequentemente também ocorre no processo de torneamento. O processo de mandrilamento para o qual o modelo será empregado também é externo, não se fazendo necessário o emprego do fator de correção para concavidade.

## 2.1. Corpos de prova e ferramenta utilizada

No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um corpo de prova de ferro fundido cinzento GG25, cuja composição química é mostrada na Tab.(1) e as propriedades mecânicas na Tab. (2), ambas segundo Chiaverini (2012).

**Tabela 1. Principais elementos do ferro fundido cinzento.**

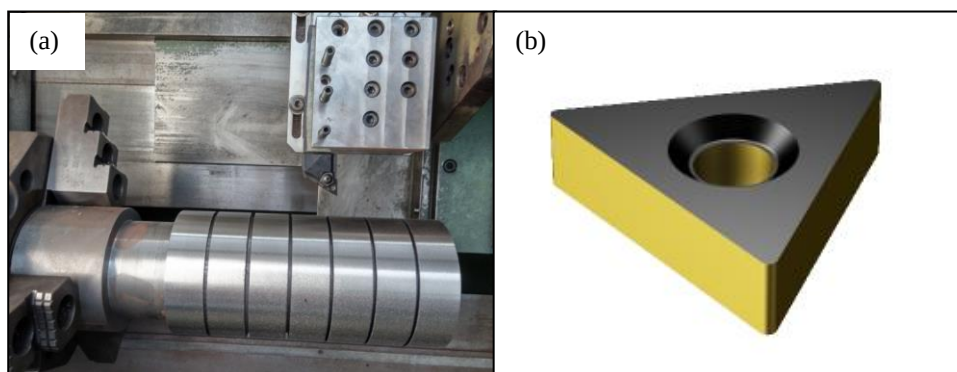
| Tipo     | Composição Química, % |         |           |           |           |
|----------|-----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
|          | C                     | Si      | Mn        | S         | P         |
| Cinzento | 2,5/4,0               | 1,0/3,0 | 0,20/1,00 | 0,02/0,25 | 0,02/1,00 |

**Tabela 2. Propriedades mecânicas do GG25 conforme a norma DIN 1691.**

| Classe | Resistência à tração [MPa] | Resistência à flexão [MPa] | Resistência à compressão [MPa] | Módulo de elasticidade [MPa] | Resistência à fadiga [MPa]                   |
|--------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| GG 25  | 250                        | 340 a 430                  | 690 a 980                      | 10,5 a 12                    | 0,35 a 0,5 do limite de resistência a tração |

O corpo de prova ensaiado é mostrado na Fig. (2), onde se apresenta fixado na máquina-ferramenta e pronto para os ensaios. A geometria do corpo de prova é tubular, com diâmetro externo de 114 mm, diâmetro interno de 60 mm e 350 mm de comprimento. Foram realizados rebaixos no corpo de prova para permitir a entrada da ferramenta de corte, como também dividir o tubo em sete regiões, permitindo uma maior quantidade de ensaios com um mesmo corpo de prova.

Os insertos utilizados nos ensaios foram de metal-duro da classe K, fabricados pela Sandvik Coromant. A geometria dos insertos utilizados é triangular (Fig. 2b), com 6 gumes, sendo 3 de cada lado do inserto e com raio de quina de 0,8 mm. Os ensaios foram realizados em duas etapas, sendo a primeira utilizando insertos com gumes novos e a segunda etapa utilizando os insertos com desgaste. O porta-ferramenta utilizado nos ensaios para a fixação dos insertos foi um MTJNR-2525M 16W fabricado pela empresa Iscar, que conta com ângulo de direção de gume  $K_r = 93^\circ$ , ângulo de inclinação do gume  $\lambda_s = -6^\circ$ , ângulo de saída  $\gamma_0 = 6^\circ$  e ângulo de incidência  $\alpha_0 = 6^\circ$ .

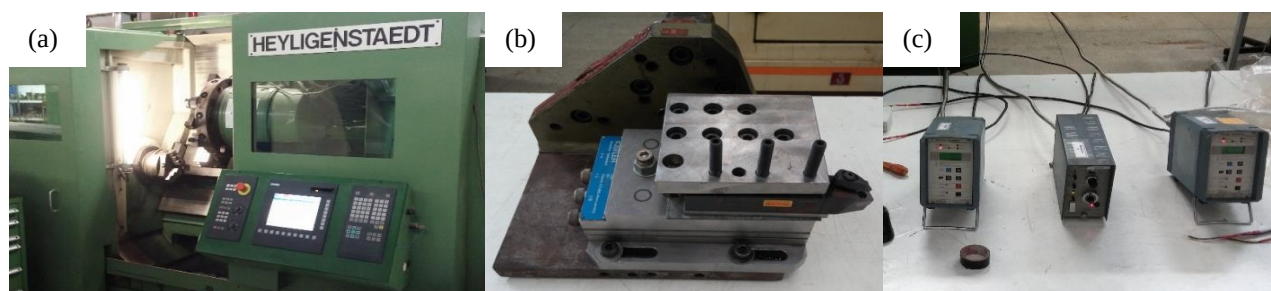


**Figura 2. (a) Corpo de prova fixado na máquina-ferramenta e (b) inserto utilizado nos ensaios.**

## 2.2. Máquina-ferramenta e sistema de aquisição de dados

Para a realização dos ensaios, foi utilizado um torno CNC Heyligenstaedt, modelo Heynumat 10U (Fig. 3a), com potência nominal no eixo-árvore de 75 kW, com rotação máxima de 4500 rpm e equipado com comando CNC Siemens 802D. Esse equipamento tem uma estrutura robusta, é dotado de barramento inclinado, placa de três castanhas com fechamento hidráulico e ambiente de usinagem enclausurado com blindagem.

A aquisição dos sinais de força foi realizada com o auxílio de uma plataforma piezelétrica Kistler 9257A (Fig. 3b), a qual possui três canais de aquisição de dados dispostos na direção dos eixos coordenados cartesianos X, Y e Z. Esta plataforma foi ajustada de acordo com os eixos da máquina-ferramenta, possibilitando a medição das componentes das forças geradas no processo de corte. Dois amplificadores Kistler 5011 e um amplificador Kistler 5006 (Fig. 3c) foram utilizados para viabilizar a leitura da variação de tensão fornecida pelos cristais piezelétricos. Para cada direção da plataforma foi utilizado um amplificador, sendo este ajustado de acordo com a sensibilidade do cristal nesta direção. Para a conversão dos sinais analógicos, vindos dos amplificadores, foi utilizada uma placa de aquisição *National Instruments USB 6218*, um *notebook* e *software* de aquisição de dados (*Labview*) configurado para adquirir 10000 pontos por segundo, armazenando os sinais obtidos e possibilitando sua posterior análise e tratamento.



**Figura 3. (a) Torno CNC Heyligenstaedt, (b) plataforma piezelétrica Kistler 9257A e (c) Amplificadores 5011 e 5006.**

Os valores das componentes da força de usinagem foram determinados pela diferença da média dos sinais obtidos durante o corte, pela média dos sinais obtidos em vazio. Isso ocorreu em virtude de os sensores piezelétricos apresentarem perdas de carga ao longo do tempo de medição, o que é conhecido como *drift*, interferindo assim na determinação de valores absolutos de forças. Como consequência disso, adotou-se a medição das forças, decorrentes do processo de corte, com valores relativos, conforme mostra a Fig. (4). Antes dos ensaios definitivos serem realizados, verificou-se o perfeito funcionamento dinâmico do sistema de medição de forças, corroborando os erros dos 3 eixos analisados com o fabricante dos equipamentos utilizados.



**Figura 4. Representação da medição de força relativa utilizada nos ensaios.**

## 2.3. Ensaios

Nos ensaios variaram-se o avanço ( $f = 0,075, 0,15$  e  $0,225$  mm) e a profundidade de corte ( $a_p = 0,5, 1$  e  $1,5$  mm). Também para cada conjunto de parâmetros de entrada, fez-se uma repetição totalizando dois ensaios com os mesmos

parâmetros, isto para maior confiabilidade dos resultados. Realizou-se um DOE (*design of experiments*) com tais características, chegando-se a um total de 18 ensaios necessários, mostrados na Tab. (3).

A sequência da realização dos ensaios, após fixação do corpo de prova, envolvia realizar a programação da máquina-ferramenta com a combinação dos parâmetros de corte estabelecidos e a fixação do inserto no porta-ferramentas. A cada ensaio realizado era necessário alterar os parâmetros de corte, caso não fossem os mesmos, além de reprogramar os deslocamentos da ferramenta para que esta aproveitasse cada uma das sete seções do corpo de prova. Também era fixado um novo gume novo no porta-ferramenta e com isso ficavam garantidas as mesmas condições iniciais em relação à ferramenta de corte para todos os ensaios.

**Tabela 3. Ensaios principais.**

| Ensaio | Velocidade corte (m/min) | Avanço (mm) | Profundidade de corte(mm) |
|--------|--------------------------|-------------|---------------------------|
| 1      | 150                      | 0,075       | 0,5                       |
| 2      | 150                      | 0,075       | 0,5                       |
| 3      | 150                      | 0,15        | 0,5                       |
| 4      | 150                      | 0,15        | 0,5                       |
| 5      | 150                      | 0,225       | 0,5                       |
| 6      | 150                      | 0,225       | 0,5                       |
| 7      | 150                      | 0,075       | 1                         |
| 8      | 150                      | 0,075       | 1                         |
| 9      | 150                      | 0,15        | 1                         |
| 10     | 150                      | 0,15        | 1                         |
| 11     | 150                      | 0,225       | 1                         |
| 12     | 150                      | 0,225       | 1                         |
| 13     | 150                      | 0,075       | 1,5                       |
| 14     | 150                      | 0,075       | 1,5                       |
| 15     | 150                      | 0,15        | 1,5                       |
| 16     | 150                      | 0,15        | 1,5                       |
| 17     | 150                      | 0,225       | 1,5                       |
| 18     | 150                      | 0,225       | 1,5                       |

Na primeira etapa dos ensaios foram utilizados insertos com gumes novos. Posteriormente, foram realizados ensaios de longa duração, com os parâmetros de corte máximos, avaliados nessa pesquisa, no mesmo material do ensaio para atingir um desgaste de flanco médio de 0,1 mm. Para avaliação do desgaste dos insertos, foi utilizado um estereoscópio Zeiss, modelo Stemi V8, sendo que os ensaios para desgastar os insertos foram finalizados ao ser atingido o desgaste de flanco médio de 0,1 mm.

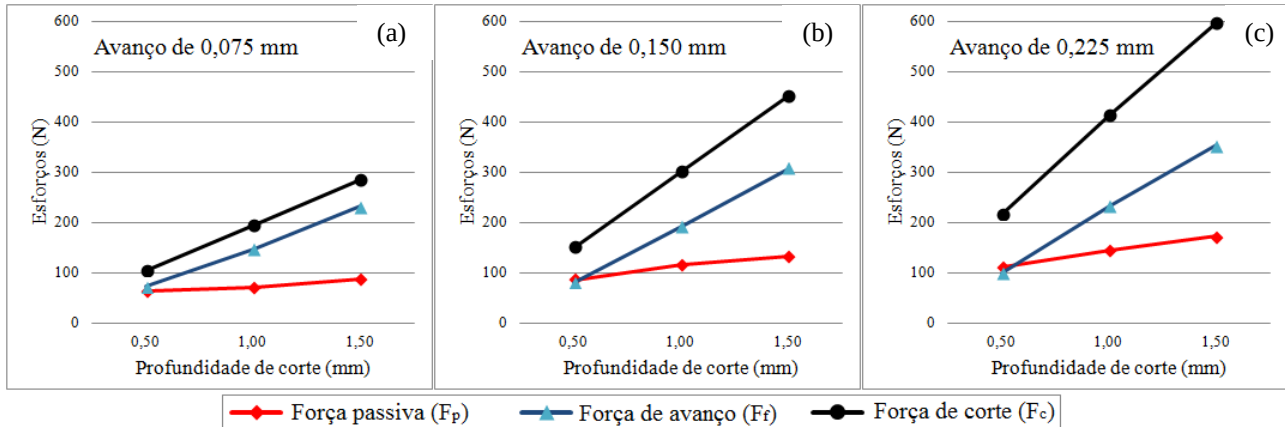
Os parâmetros dos seis ensaios com os insertos apresentando desgaste podem ser visualizados na Tab. (4). O objetivo desses ensaios foi obter fatores de correção para o desgaste, sendo que estes deverão ser multiplicados pelas constantes de força específica do material na equação de Kienzle.

**Tabela 4. Ensaios realizados com a ferramenta desgastada.**

| Ensaio | Velocidade corte (m/min) | Avanço (mm) | Profundidade de corte(mm) |
|--------|--------------------------|-------------|---------------------------|
| 1      | 150                      | 0,075       | 1,5                       |
| 2      | 150                      | 0,075       | 1,5                       |
| 3      | 150                      | 0,15        | 1,5                       |
| 4      | 150                      | 0,15        | 1,5                       |
| 5      | 150                      | 0,225       | 1,5                       |
| 6      | 150                      | 0,225       | 1,5                       |

### 3. RESULTADOS

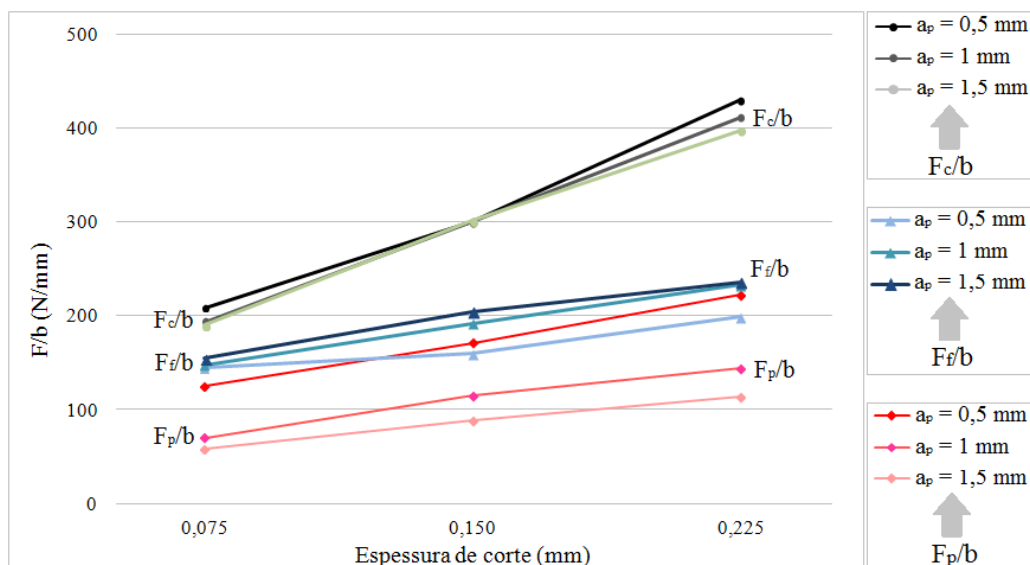
Após a realização dos ensaios, fez-se uma análise das componentes da força de usinagem. A Figura (5) mostra os valores médios das componentes da força de usinagem, com a variação da profundidade de corte para os avanços de 0,075, 0,15 e 0,225 mm. Percebe-se que o aumento da profundidade de corte resultou no aumento das componentes da força de usinagem para todos os avanços analisados. De acordo com König e Klocke (1997) e Klocke (2011), o aumento da profundidade de corte resulta no aumento da largura de corte, como consequência, ocorre o aumento das componentes da força de usinagem. O aumento do avanço também resultou no aumento das forças durante o processo, para todos os avanços analisados, que de acordo com os mesmos autores, ocorre devido ao aumento da espessura de corte.



**Figura 5. (a) Variação da profundidade de corte para avanço  $f = 0,075$  mm, (b) Variação da profundidade de corte para avanço  $f = 0,150$  mm e (c) Variação da profundidade de corte para avanço  $f = 0,225$  mm.**

No entanto, nos ensaios realizados com a menor profundidade de corte, os valores obtidos da força de avanço e força passiva são muito próximos. O raio de quina dos inserts utilizados nos ensaios foi de 0,8 mm, portanto, para os ensaios com profundidade de corte de 0,5 mm, o raio de quina dos inserts foi superior à profundidade de corte ensaiada. Segundo König e Klocke (1997), quando o raio de quina da ferramenta de corte é maior que a profundidade de corte, deformações plásticas são mais pronunciadas na região do corte. Portanto, tal comportamento descrito pelos autores pode ter sido o responsável para que a força passiva chegasse próximo ou até mesmo ultrapassasse a força de avanço.

Na etapa de desenvolvimento do modelo de força de mandrilamento, os dados coletados tiveram mesma análise e compilação para os três esforços estudados. Os valores dos esforços foram divididos pela largura do cavaco criando as relações  $F_c/b$ ,  $F_f/b$  e  $F_p/b$ , desta forma embutindo a variável de profundidade de corte, conforme ilustrado na Fig. 6.



**Figura 6. Gráfico mostrando as relações  $F_p/b$ ,  $F_f/b$  e  $F_c/b$ .**



Os dados foram avaliados para cada espessura de corte, de maneira que pudesse ser averiguado se os mesmos possuíam diferenças significativas entre si. Para isso foi utilizado um teste de hipóteses para os resultados obtidos. As amostras incluíam relações  $F/b$  para uma mesma espessura de corte. Os resultados mostraram que cada amostra possuía diferenças significativas comparada a qualquer outra, incluso a oriunda do ensaio réplica com os mesmos parâmetros de entrada.

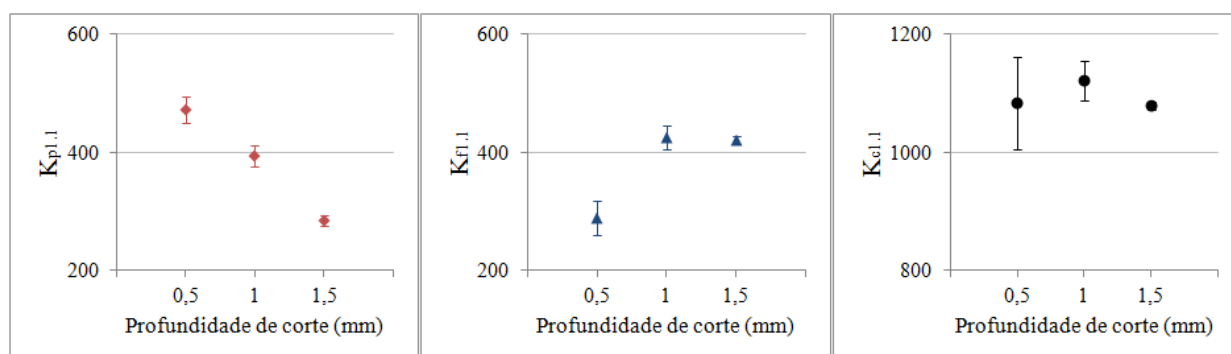
Isto ocorre devido à placa de aquisição captar mais de dez mil pontos de força por segundo, o que diminui consideravelmente a faixa de repetitividade. Segundo Albertazzi (2008), é o efeito da média sobre os erros de medição. O intervalo de confiança para 95% de probabilidade, mostra-se tão pequeno que os valores foram omitidos nos gráficos anteriores. Quando é comparado o ensaio e sua réplica, as significâncias dos erros aleatórios subjazem os erros sistemáticos, mostrando que os parâmetros de entrada avaliados nos ensaios não foram as únicas variáveis influenciadoras no processo de usinagem e de medição.

Outra constatação oriunda dos testes, é que as variações dos parâmetros de corte influenciaram significativamente os dados que estão sendo analisados, de acordo com o teste de hipótese realizado. Com a assertiva dos dados de cada ensaio serem diferentes entre si, o cálculo das constantes de Kienzle não pôde ser feito através da média entre todos os ensaios para uma mesma espessura de corte.

Precisou-se calcular uma equação para cada profundidade de corte, utilizando a média dos resultados de um ensaio e sua réplica. O desvio considerado foi o desvio padrão das médias desses dois ensaios. A partir da definição do intervalo de incerteza em relação ao valor médio, a média da relação  $F/b$  mais um desvio e a mesma média menos um desvio, foi feita uma divisão aleatória dos valores no intervalo com  $n$  números randômicos, sem ordenação dos valores aleatórios. A determinação das forças específicas de corte e dos expoentes de Kienzle, mostrados nas Eq. (1) a (3), foi feita a partir da linearização, em escala bi-logarítmica, da variação das relações  $F/b$  em função da espessura de corte ( $h$ ), utilizando o método dos mínimos quadrados.

Desta forma, o primeiro valor randômico correspondente ao primeiro conjunto de parâmetros gerou o primeiro valor de força específica e do expoente de Kienzle. A segunda combinação gerou o segundo valor dos coeficientes de Kienzle, até que se tivessem  $n$  valores aleatórios da força específica de corte e do expoente de Kienzle. Segundo Donatelli (2005), a quantidade de números aleatórios  $n$  está diretamente ligada ao ruído amostral e à amplitude dos valores obtidos. Isto significa que um valor grande de números aleatórios  $n$  tende a produzir uma diminuição do ruído amostral e uma estimativa mais confiável dos valores obtidos e da incerteza de medição. Neste trabalho o valor de  $n$  foi mantido constante e igual a 10000.

A partir da ordenação dos  $n$  valores da força específica de corte, de forma crescente, pode-se extrair o valor correspondente ao valor médio ( $n*0,5$ ) da distribuição de frequências acumuladas. Os valores de máximo ( $n*0,975$ ) e mínimo ( $n*0,025$ ) determinaram a incerteza do resultado obtido com um intervalo de confiança de 95%. Deste modo, as constantes  $k_{c1.1}$ ,  $k_{f1.1}$  e  $k_{p1.1}$  foram determinadas, bem como os respectivos expoentes ( $1-m_c$ ), ( $1-m_f$ ) e ( $1-m_p$ ). As constantes específicas de corte podem ser visualizadas na Fig. (7).



**Figura 7. Gráfico mostrando as constantes  $k_{p1.1}$ ,  $k_{f1.1}$  e  $k_{c1.1}$ .**

Analisando os resultados das constantes, ficou clara a influência dos ensaios onde o raio de quina da ferramenta foi maior que a profundidade de corte ensaiada. As forças específicas para a profundidade de corte de 0,5 mm apresentaram as maiores faixas de intervalo de confiança de 95%. Os valores para  $k_c$  também estiveram próximos ao esperado para materiais com resistência entre 200 e 300 Mpa, segundo Beno & Mankova (2004).

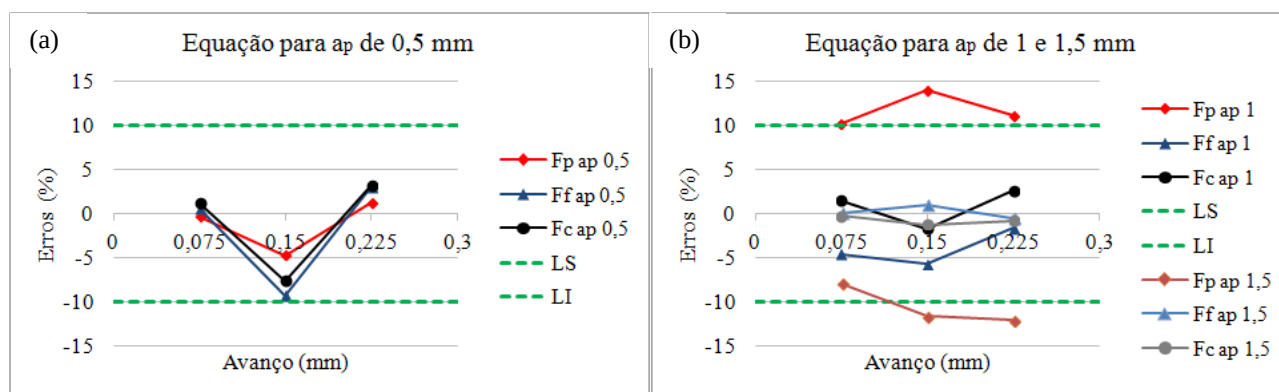
Foi realizado um teste de hipóteses para as constantes e estas apresentaram diferenças significativas entre si. O resultado também é justificado pela quantidade de pontos de ensaio, que diminuem a incerteza de medição. Optou-se por não juntar o modelo para a profundidade de corte menor que o raio de quina com os demais, em decorrência do comportamento observado com as componentes da força de usinagem. Assim, foi elaborada uma nova equação conciliando os dados de profundidade de corte para 1 mm e 1,5 mm, sem levar em consideração os dados para profundidade de 0,5 mm.

Após as constantes serem novamente calculadas, utilizando o mesmo método descrito anteriormente, as equações finais foram montadas e podem ser visualizadas na Tab. 5.

**Tabela 5. Equações finais de forças.**

| Equações                   | Força passiva ( $F_p$ )       | Força de avanço ( $F_f$ )     | Força de corte ( $F_c$ )       |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Profundidade de 0,5 mm     | $F_p = 472,17. b. h^{(0,51)}$ | $F_f = 288,50. b. h^{(0,26)}$ | $F_c = 1083,24. b. h^{(0,64)}$ |
| Profundidade de 1 e 1,5 mm | $F_p = 336,40. b. h^{(0,65)}$ | $F_f = 424,14. b. h^{(0,39)}$ | $F_c = 1101,21. b. h^{(0,68)}$ |

Com base nas equações finais, as forças foram simuladas com os mesmos parâmetros de entrada dos ensaios e os erros foram calculados. Para isso comparou-se o resultado da simulação com os próprios dados dos ensaios desta pesquisa e que deram origem às equações. O resultado pode ser observado na Fig. (8).



**Figura 8. Erros das equações formuladas para profundidade de corte de 0,5 mm (a) e para profundidade de corte de 1 e 1,5 mm (b).**

Os erros mantiveram-se dentro do intervalo esperado. Para a profundidade de corte de 1 e 1,5 mm, a simulação da força passiva ultrapassou os limites de tolerância. Isto mostra que juntar os dados de forças para profundidade de 1 e 1,5 mm diminui a exatidão do modelo, sendo que isto é mais reforçado pela força passiva, pois ela já apresentava maior variância antes da unificação. Isso é observado pela distância entre as retas  $F_p/b$  serem maiores do que as distâncias das demais relações para uma mesma espessura de corte na Fig. (6).

Depois de encontradas as equações para os insertos novos, buscaram-se os fatores de correção que pudessem considerar o desgaste das ferramentas. Paucksch (1996) sugere os fatores das Eq. (6), (7) e (8) para corrigir os valores das forças específicas de corte  $k_c$ ,  $k_p$  e  $k_f$  do material.

Desgaste da ferramenta para a força de corte: 
$$f_{st} = 1 + \frac{VB}{VB_0} \quad \text{onde: } VB_0 = 1\text{mm} \quad (6)$$

Desgaste da ferramenta para a força de avanço: 
$$g_{st} = 1 + 2,5 \frac{VB}{VB_0} \quad \text{onde: } VB_0 = 1\text{mm} \quad (7)$$

Desgaste da ferramenta para a força passiva: 
$$h_{st} = 1 + 3 \frac{VB}{VB_0} \quad \text{onde: } VB_0 = 1\text{mm} \quad (8)$$

Estas equações levam em consideração o desgaste de flanco médio (VB) dos insertos. Para a utilização de tais equações, foi necessário realizar o desgaste dos insertos posteriormente utilizadas nos ensaios da Tab. (4), como relatado na metodologia.

As constantes de força específica de corte da Tab. (5), para profundidade de corte de 1 e 1,5 mm, foram corrigidas por estes fatores. As novas equações geraram valores teóricos de força que foram comparados com os resultados dos ensaios com ferramentas desgastadas. As diferenças médias foram de aproximadamente 3% para os esforços de corte, 6% para os esforços de avanço e 34% para os esforços de força passiva. Optou-se por calcular as constantes de Kienzle com os resultados dos próprios ensaios com insertos desgastados, para depois dividi-las pelas constantes dos ensaios com insertos novos, assim comparando o fator de correção obtido dos ensaios deste trabalho com o sugerido por Paucksch (1996). A Tabela (6) mostra a comparação entre os fatores de correções obtidos.



**Tabela 6. Comparação entre os fatores de correção para desgaste da ferramenta.**

|          | Fator obtido neste trabalho | Fator considerando Paucksch | Diferenças (%) |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| $h_{st}$ | 0,90                        | 1,33                        | 32,04          |
| $g_{st}$ | 1,05                        | 1,275                       | 17,84          |
| $f_{st}$ | 0,98                        | 1,11                        | 11,37          |

Nos ensaios realizados para desgaste da ferramenta, as forças não apresentaram um incremento significativo em relação aos ensaios com ferramentas novas, na medida em que foi averiguado por Paucksch (1996), o que suscita melhor análise sobre demais variáveis e diferenças entre os ensaios que podem ter motivado as discrepâncias encontradas.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a modelagem e simulação dos esforços de mandrilamento externo através da captação das três principais forças de usinagem em um processo de torneamento. As equações obtidas de Kienzle satisfizeram de maneira prevista o processo teórico estudado, aproximando-se da realidade.

Dentre as forças estudadas, a força passiva foi a que apresentou maior variância, conseqüentemente maiores faixas para intervalo de confiança e maiores erros associados à simulação. A força de corte foi a de maior exatidão quando simulada. Dentre as profundidades de corte avaliadas, quanto menor a profundidade ensaiada, maiores as divergências encontradas, o que ocorreu principalmente pelos parâmetros estarem muito próximos às especificações de raio quina da ferramenta.

Durante a análise dos resultados, um ensaio apresentou valores destoantes significativos em relação ao ensaio réplica. Foi averiguado também que os erros sistemáticos foram predominantes quando o ensaio era repetido, sendo os erros aleatórios dissolvidos pela quantidade de pontos obtidos em cada ensaio. Ambas as constatações sugerem que uma maior quantidade de réplicas dos ensaios seja interessante, tanto para refinar as equações melhorando as constantes, quanto por diluir a efeito cascata de um dado errado nas análises subsequentes.

Os ensaios para desgaste também apresentaram resultados divergentes do esperado na literatura. É sugerido um maior estudo sobre as características da ferramenta desgastada e das configurações utilizadas nos ensaios, tanto dos presentes autores como dos utilizados na referência citada.

#### 5. 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 Usinagem e Comando Numérico (USICON) e Laboratório de Materiais (LABMAT), da UFSC; à Empresa Brasileira de Compressores (EMBRACO) e ao Conselho Nacional de Conhecimento Científico e Tecnológico (CNPq).

#### 6. REFERÊNCIAS

- Albertazzi, A., 2008. “Fundamentos de metrologia científica e industrial” – 1 ed. Barueri, SP: Manole.
- Beno, J.; Mankova, I. 2004. “Technological and material factors of machining”. SjFTUKE, ISBN 80-7099-701-X, Kosice, Slovakia.
- 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”. 2010. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de 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.
- Chiaverini, V., 2012, “Aços e Ferros Fundidos”. 7 ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM.
- Donatelli, G.D., Konrath, A.C., 2005, “Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição”. Revista de Ciência e Tecnologia, Vol. 13, Nr. 25/26, pp. 5-15.
- Klocke, F., 2011 “Manufacturing Processes 1”- (Translated by Aaron Kuchle) Berlin: Springer.
- König, W., Klocke, F., 1997, “Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren”. 5 ed., Springer-Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- Mangoni, C., 2004, “Determinação Teórico-experimental de Forças e Análise Dinâmica por Elementos Finitos no Fresamento de Peças com Baixa Rigidez”. 2004. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- Metals Handbook., 1997, “Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys”. ASM, v. 1.

- Mühle, H. B., 2000, “Mandrilamento com Cabeçotes de Excentricidade Regulável e Sistema de Balanceamento”. 2000. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Norton, R. L., 2013, “Projeto de Máquinas”. 4. ed. São Paulo: Bookman.
- Paucksch, E., 1996, “Zerspantechnik”. Editora Viewegs Fachbücher der Technik, 11. überarbeitete Auflage, Braunschweig, Alemanha, 404 p.
- Walker, J. M., 1996, “Handbook of Manufacturing Engineering”. New York: Marcel Dekker.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# MODELING AND FORCE SIMULATION OF BORING ON GRAY CAST IRON GG25

## COBEF2017-0371

**Abstract:** *The manufacturing industry is under constant development to increase productivity, product quality and decrease production costs. It can be said that these are the main features currently sought by engineers, researchers and related professionals in the area. Looking for reduce the consumption of raw material, simulations are applied in the design of parts to validate its geometric dimensioning. In this context, the present research intends to propose a suitable force model for the external boring of gray cast iron GG25. Secondary objectives are the study of the model and the possible application of it in future numerical simulations by the partner company. The model is based on the Kienzle equation and data are obtained through turning tests, a process that test difficulties are significantly lower. The experiments were performed on a HEYNUMAT 10U CNC lathe in which the feed ( $f = 0.075, 0.15$  and  $0.225$  mm) and cut depth ( $a_p = 0.05, 0.1$  and  $0.15$  mm) were varied. The components of the machining force were monitored through a piezoelectric platform of Kistler Instruments. Models for the depth of cut of  $0.5$ mm were realized separated of the depths of  $1$  and  $1.5$ mm. The results were satisfactory and the differences between the simulated and tested data remained within the tolerated range, with the exception of passive force for the cut depth of  $1$  and  $1.5$  mm.*

**Keywords:** *machining, boring, modeling, simulation, machining force.*