

APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE KIENZLE NA DETERMINAÇÃO DA FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE NA USINAGEM EM TORNO CONVENCIONAL

João Batista RODRIGUES FILHO (1); Luis Paulo Nepomuceno de SOUSA (2); Marília Feliciano ALVES (3); André Pimentel MOREIRA (4); Clayton Ricarte da SILVA (5); Evaldo Correia MOTA (6)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Av. 13 de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, e-mail: joaofilhus@hotmail.com

(2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Av. 13 de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, e-mail: long_player13@hotmail.com

(3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Av. 13 de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, e-mail: mariliaf.alves@hotmail.com

(4) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Av. 13 de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, e-mail: apmoreira@ifce.edu.br

(5) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Av. 13 de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, e-mail: clayton@ifce.edu.br

(6) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Av. 13 de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, e-mail: evaldom@ifce.edu.br

RESUMO

Cotidianamente, nos inúmeros processos de usinagem, vários procedimentos são realizados para minimizar o custo de produção. Fatores como o elevado tempo de usinagem; a habilidade do operador e as condições de funcionamento das máquinas são algumas variáveis que influenciam diretamente no preço final do produto. A proposta deste artigo trabalho é simular uma operação de desbaste em um torno convencional e determinar, através da equação de Kienzle, como a variação da velocidade de avanço e a profundidade de corte podem influenciar na força e potência de corte. O erro entre a potência calculada e a potência medida teve 6,9% de erro no primeiro ensaio, 5,0% no segundo ensaio e 11,8% no terceiro ensaio. Atribuindo o valor máximo de profundidade e velocidade mínima de avanço recomendada pelo fabricante da ferramenta de corte e comparado com os valores mínimos de profundidade de corte e maior velocidade de avanço, foi constatada uma redução na força e potência de corte de 2,43 kW para 1,46 kW, mas com acréscimo do tempo de usinagem de 8,02 minutos para 9,86 minutos. O menor tempo de usinagem foi constatado em valores intermediários a faixa de maior e menor profundidade de corte e velocidade de avanço. O melhor acabamento superficial e menor vibração ficaram evidenciados quando a velocidade de avanço foi mínima. Os ensaios demonstraram que a aplicação da equação de Kienzle no cálculo da força e potência de corte é válida para estabelecer os critérios de custo-benefício da usinagem.

Palavras-chave: usinagem, parâmetros de corte, equação de Kienzle, torno convencional.

1 INTRODUÇÃO

Data de aproximadamente 500 mil anos atrás, no período Paleolítico¹, o aparecimento das primeiras ferramentas construídas pelo homem. Tendo como principal objetivo a caça e a defesa dos grandes animais. As facas, pontas de lanças e machados eram fabricados com lascas de grandes pedras. Nesse período, os artefatos eram obtidos com o desgaste e polimento da pedra (Princípio da Retificação). Com o passar do tempo essas ferramentas foram sendo aprimoradas e diversificadas funcionalmente, sendo-lhes atribuídas qualidades e formas geométricas mais definidas para cada função, como a agricultura, a tecelagem e a corrida militar, etc.

A fundição dos metais como: o cobre, bronze, ferro e alumínio, proporcionaram um significativo avanço na produção de equipamentos e ferramentas nos variados ramos industriais. O impulso provocado pela

¹ Período compreendido entre 1000000 a.C a 8000 a.C.

revolução industrial, a utilização da energia elétrica e a evolução dos processos de obtenção do aço, deram origem à indústria mecânica destinada a dar suporte às indústrias de transformação.

As indústrias mecânicas trabalham em dois modos de operação: conformação e usinagem.

Conformação é a operação feita de modo que a matéria prima é submetida a esforços mecânicos e/ou térmicos até obter a forma desejada. Toda, ou pelo menos quase toda a matéria prima é aproveitada no processo, originando o produto final. Os principais processos são a laminação, a fundição e a estampagem. As operações de conformação mecânica são processos de trabalho dentro da fase plástica do metal. Quando o trabalho de conformação é realizado em lingotes, de modo a produzir formas simples como placas, tarugos, barras, chapas etc., os processos são chamados trabalho mecânico primário. Quando, geralmente a partir das partes obtidas nesses processos primários, o trabalho mecânico leva a formas e objetos definitivos, os processos são chamados trabalho mecânico secundário. (CHIAVERINI, 1986).

Para Costa e Santos (2006), uma simples definição de usinagem é o processo de fabricação com remoção de cavaco até esta ficar nas dimensões, forma e acabamento desejados. A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo.

A história da usinagem acompanha o desenvolvimento da indústria, o desenvolvimento de novos materiais e a necessidade de aumento de produção. É um processo que depende de vários fatores, mas pode-se considerar como mais importantes: a máquina-ferramenta, o material a ser usinados, a ferramenta de corte e os fluídos de corte, incluindo o método de aplicação. (SANTOS, 2006)

A Usinagem pode vir auxiliada de ferramentas manuais (lima; serra; macho; cossinete) ou de máquina-ferramenta ou máquinas operatrizes (furadeira; torno; fresadora). As máquinas ferramentas dispõem de uma gama de ferramentas para as variadas funções e materiais a serem usinados.

Segundo Chiaverini (1986), nas operações de usinagem, uma porção do material das peças é retirada pela ação de uma ferramenta, chamada ferramenta de corte, produzindo o cavaco, caracterizado por forma geométrica irregular. O número de operações de usinagem é muito grande, assim como é grande a variedade de máquinas operatrizes e ferramentas de corte disponíveis.

As primeiras ferramentas para máquina eram feitas de aço carbono temperado. No início do século XX, foi descoberto o aço rápido que possibilitou um aumento na velocidade de operação. A partir da segunda metade deste século foram descobertas ligas metálicas (carbetos de tungstênio, nitreto cúbico de boro) e materiais cerâmicos que apresentam dureza próxima do diamante, possibilitando maiores velocidades de corte, avanço e profundidade, exigindo da máquina maior precisão e potência do motor.

Sobre a questão da potência de corte, varias são as formas de se obter um valor adequado para um determinado trabalho, utilizando os mais variados parâmetros de corte. Entretanto a equação de Kienzle é mais utilizada nos processos de usinagem, sendo que os resultados obtidos apresentam valores satisfatórios para serem utilizados na prática.

Segundo Stemmer (1995), a fórmula de Kienzle se mostrou válida no cálculo da força de corte nos diversos processos de usinagem com espessura h constante do cavaco (tornear, plainar, furar, brochar) como também nos processos de usinagem com espessura variável (fresagem, serramento, denteamento de engrenagens), utilizando um valor médio h_m .

A utilização da equação de Kienzle em um processo de usinagem, é indicada para calcular valores aproximados da velocidade de avanço e profundidade de corte ideal para o perfeito funcionamento da máquina, sendo possível escolher os melhores parâmetros e estratégia de usinagem para redução do tempo de usinagem e aumento da produtividade.

Cotidianamente inúmeras atividades de usinagem são realizadas, desde peças simples fabricadas em pequenas oficinas até peças complexas em grandes aglomerados industriais. A discrepância da produtividade entre elas demonstra a importância desses estudos, pois a utilização inadequada de uma ferramenta ou a escolha inoportuna da velocidade feita pelo operador influenciará diretamente nos custos da produção.

De acordo com Stemmer (2001), apenas a vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas, expressa de diversas formas, grandezas das forças que atuam sobre a ferramenta e da potência consumida e qualidade do acabamento superficial obtido pela usinagem são passíveis de serem expressos em valores numéricos. Por

esta razão, vida da ferramenta, força de corte e potência consumida, e acabamento são os fatores de emprego mais generalizados na avaliação do grau de usinabilidade. Eles definem também, em grande parte, o custo do trabalho de usinagem realizado na fábrica. Assim, a vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas tem grande influência no custo de operação. A força e potência necessárias limitam as dimensões máximas do corte e, portanto, o volume de material removido por hora-máquina.

Para Ferreira (1997), devido à globalização do mercado, a competição entre as empresas de manufatura tem se tornado cada vez maior. O consumidor tem cada vez mais opções para a compra de um determinado produto, e alguns dos fatores fundamentais para a sua decisão são o preço, a qualidade e a confiabilidade. Como o mercado está voltado para o consumidor, às empresas têm buscado incorporar características de flexibilidade à fabricação, pois as mudanças nos produtos, e, por conseguinte a variedade de peças é muito grande.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Maquinas Operatrizes (LMO) do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Ceará - IFCE, no campus de Fortaleza. Os ensaios foram executados em um torno convencional oficina IMOR 420, conforme a Figura 1. Utilizou-se a equação de Kienzle para calcular a potência de corte e tempo de usinagem para os valores de profundidade de corte e avanços sugeridos pelo fabricante da ferramenta de corte de metal duro. Outros parâmetros foram verificados através de inspeção visual, entre eles, o acabamento final da peça, desgaste da ferramenta.



Figura 1 – Torno Convencional IMOR oficina 420

No ensaio foi utilizado um tarugo de Aço ABNT 1020 com 1 ½" de diâmetro, uma pastilha de metal duro TAEGUTEC DNMA 110408, conforme a Figura 2. Para calcular os parâmetros de potência e tempo de usinagem, foi realizada a usinagem sem arrefecimento a fim de se obter uma peça com 100 mm de comprimento e 36 mm de diâmetro.

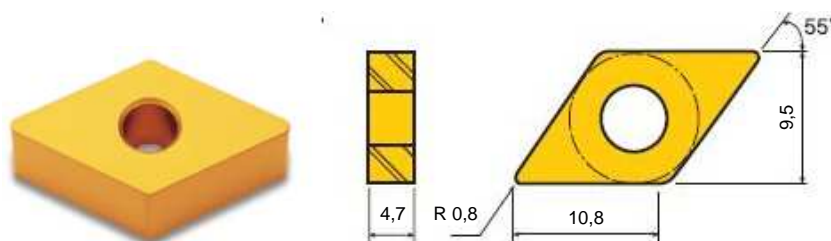


Figura 2 – Pastilha de metal duro DNMA 110408 (adaptado de TAEGUTEC)

Para a realização dos ensaios, foram estipulados e testados três diferentes valores de velocidade para o avanço e profundidade de corte através da equação de Kienzle e uma verificação da potência fornecida ao motor, através de um osciloscópio digital.

A aproximação dos valores de rotação e velocidade de corte se dá, dentre outros aspectos, devido à limitação da máquina cuja máxima rotação é 1000 rotações por minuto (RPM), como também devido os valores

calculados, conforme a Equação 01 está raramente disponível no ábaco de RPM (rotação-velocidade de corte-diâmetro da peça) dos tornos, como pode ser visto na Figura 3.

$$N(RPM) = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad [\text{Eq. 01}]$$

O operador é responsável pela aproximação do valor calculado com o valor disponível, escolhendo adequadamente a rotação que vai ser utilizada.

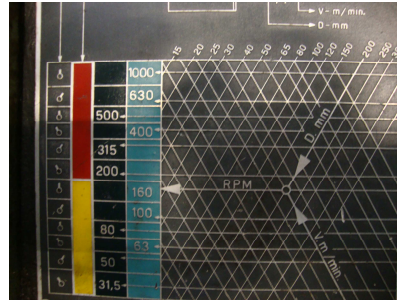


Figura 3 – Ábaco de RPM

Com o intuito de se obter a variação mínima dos valores, foram seguidas as recomendações do fabricante da ferramenta, recomendações estas quando não consideradas, influenciam diretamente na força, potência e tempo de corte, dentre outros, como consumo de energia, acabamento e desgaste da ferramenta.

Em todos os ensaios foram feitas comparações entre o valor calculado utilizando o princípio de Kienzle com o fator de correção, conforme a Equação 02, e sem o fator de correção conforme a Equação 03 e o valor instantâneo medido com o osciloscópio digital.

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc} \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f \quad [\text{Eq. 03}]$$

Onde:

$$k_{c1.1} = \text{Pressão específica de corte para um cavaco de } A = b \cdot h = 1 \cdot 1 \text{ mm}^2$$

$$h = \text{Espessura do cavaco} = f \cdot \text{sen} \kappa \text{ [mm]}$$

$$b = \text{Largura de corte} = \frac{a_p}{\text{sen} \kappa} \text{ [mm]}$$

Os parâmetros utilizados nos ensaios possuem valores mínimos e máximos de avanço, assim com o máximo e mínimo de profundidade recomendado pelo fabricante da ferramenta de metal duro, em seguida foi calculado e comparados os valores obtidos pela equação de Kienzle com os valores medidos na rede elétrica. A potência de corte pode ser calculada pela Equação 04.

$$P_c = \frac{(k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc}) V_c}{60000} \quad [\text{Eq. 04}]$$

3 ENSAIOS

No ensaio I, foram estipulados os valores de profundidade máxima e avanço mínimo conforme o catálogo do fabricante, assim como a velocidade de corte, os valores recomendados de pressão específica de corte ($K_{c1.1}$) e fator de correção de Kienzle ($1-mc$) de acordo com a norma alemã AWF-158, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio I

Profundidade (mm)	Avanço (mm/min)	Ângulo de corte	Kc 1.1 (N/mm ²)	Velocidade de corte (m/min)	1-mc
3,00	0,15	90°	2000	117,5	0,83

Na Tabela 2, são mostrados os resultados do ensaio I.

Tabela 2 – Resultados do ensaio I

Tempo de corte (min)	Potência calculada (KW)	Potência medida (KW)	Potência sem o fator de correção de Kienzle (KW)	Força de corte (N)	Força de corte sem o fator de correção de Kienzle (N)
8,02	2,43	2,61	1,76	1243,53	900

Além dos resultados numéricos encontrados, através da Equação 01. Observou-se que, utilizando os valores calculados, a peça apresentou após a operação de usinagem um acabamento satisfatório devido à baixa velocidade de avanço.

No ensaio II reduziu-se a profundidade de corte com um acréscimo no avanço da ferramenta, assim como a velocidade de corte, como visto na Tabela 3. Os parâmetros de velocidade de corte e ângulo de corte foram mantidos.

Tabela 3 – Parâmetros do ensaio II

Profundidade (mm)	Avanço (mm/min)	Ângulo de corte	Kc 1.1 (N/mm ²)	Velocidade de corte (m/min)	1-mc
1,5	0,35	90°	2000	117,5	0,83

Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio II

Tempo de corte (min)	Potência calculada (KW)	Potência medida (KW)	Potência sem o fator de correção de Kienzle (KW)	Força de corte (N)	Força de corte sem o fator de correção de Kienzle (N)
6,85	2,50	2,94	2,09	1255,16	1050,0

Após a modificação dos parâmetros de profundidade de corte e avanço da ferramenta, observou-se um acabamento satisfatório para desbaste e redução do tempo de usinagem, porém um maior esforço da máquina e da ferramenta, ocasionando um aumento na potência de corte, vibrações e desgaste da ferramenta quando o processo é realizado sem arrefecimento.

Na Tabela 5, o valor atribuído para a profundidade de corte foi o mínimo, enquanto o parâmetro utilizado para avanço foi elevado ao máximo, conforme a recomendação do fabricante, observado no catálogo de ferramentas de corte.

Tabela 5 – Parâmetros do ensaio III

Profundidade (mm)	Avanço (mm/min)	Ângulo de corte	Kc 1.1 (N/mm ²)	Velocidade de corte (m/min)	1-mc
0,80	0,457	90°	2000	117,5	0,83

Na Tabela 6 são mostrados os resultados.

Tabela 6 – Resultados do ensaio III

Tempo de corte (min)	Potência calculada (KW)	Potência medida (KW)	Potência sem o fator de correção de Kienzle (KW)	Força de corte (N)	Força de corte sem o fator de correção de Kienzle (N)
9,86	1,46	1,86	1,28	835,32	731,20

Os resultados obtidos mostram um acréscimo no tempo de usinagem, mas com um significativo decréscimo na força e potência de corte.

4 CONCLUSÕES

Os ensaios demonstraram as mudanças obtidas na qualidade do acabamento da peça; o comportamento da máquina durante a operação; as vibrações sofridas pela ferramenta e o tempo de usinagem.

Demonstrou-se nos ensaios realizados a importância dos procedimentos técnicos aplicados referentes ao cálculo de parâmetros de corte. Os ensaios realizados no Laboratório de Máquinas Operatrizes (LMO) do IFCE - Campus de Fortaleza permitiu a validação da aplicação da equação de Kienzle no cálculo da força e potência de corte, onde especificamente neste ensaio os parâmetros atribuídos e modificados foram a velocidade de avanço e a profundidade de corte.

O erro entre a potência calculada e a potência obtida teve 6,9% de variação no primeiro ensaio, 5,0% no segundo ensaio e aproximadamente 11,8% no terceiro ensaio, perfazendo um erro médio entre os ensaios de aproximadamente 7,9 %.

Atribuindo o valor máximo de profundidade e velocidade mínima de avanço recomendada pelo fabricante da ferramenta de corte e comparado com os valores mínimos de profundidade de corte e maior velocidade de avanço, foi constatada uma redução na força e potência de corte de 2,43 kW para 1,46 kW, mas com acréscimo do tempo de usinagem de 8,02 minutos para 9,86 minutos.

O menor tempo de usinagem foi constatado em valores intermediários a faixa de maior e menor profundidade de corte e velocidade de avanço, com um pequeno acréscimo na força e potência de corte.

O acabamento superficial e menor vibração ficaram evidenciados quando a velocidade de avanço foi mínima.

REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. v.2. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill,1986.

CIMM. Centro de Informação Metalmecânica. **Usinagem Como Referencial Pré-histórico**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/3347> Acesso em 30 set 2010.

COSTA, Éder Silva; SANTOS, Denis Júnior. **Processos de Usinagem**: Apostila. Divinópolis: CEFET-MG, 2006.

CUNHA, Lauro Salles; CRAVENCO, Marcelo Padovani. **Manual Prático do Mecânico**. 9.ed. São Paulo: Ed. Hemus, 2003.

FERREIRA, João Carlos E.; STRADIOTTO, César R. K.; BUTZKE, Adilson U.. **Determinação Automática dos Parâmetros de Usinagem e Geração do Programa NC num Sistema CAD/CAPP/CAM**. In: COBEM, 14, 1997. Florianópolis: UFSC, 1997.

STEMMER, Gaspar Erich. **Ferramentas de Corte II**. 4.ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC , 1995.

STEMMER, Gaspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. 4.ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC , 2001.

SANTOS, José Ciro dos. **Avanços Tecnológicos na Usinagem Mecânica**: Trabalho de Conclusão de Curso. Fortaleza: CEFET-CE, 2006.

TAEGUTEC, **Catálogo de Ferramentas**. Disponível em:

<<http://208.254.18.23/TTKorea/TTCat/item.asp?GFSTYP=M&fnum=94&tool=I&mapp=IS&cat=5514731&lang=EN&search=Y>> Acesso em: 29 jun 2010.