

ASPECTOS ECONÔMICOS NA FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25

Willian Jefferson González Castillo

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário Trindade – Cx. Postal: 476 – Florianópolis SC – 88.010-970 – Brasil
castillo@imp.ufsc.br – Florianópolis, SC, Brasil

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário Trindade – Cx. Postal: 476 – Florianópolis SC – 88.010-970 – Brasil
rolf@imp.ufsc.br – Florianópolis, SC, Brasil

***Resumo.** A determinação de condições econômicas de usinagem é fundamental na otimização de processos de fabricação com remoção de cavaco e constitui uma ferramenta essencial para fazer frente às condições de mercados cada vez mais competitivos. Tendo em vista que a furação representa uma importante parcela de custos na fabricação de componentes do setor de autopeças, responsável por um significativo volume do material removido em processos de usinagem, torna-se necessária uma abordagem econômica quando se pretende otimizar custos de produção. Este trabalho apresenta uma análise econômica da furação de ferro fundido cinzento usando brocas retas de metal-duro. No estudo foram avaliadas quatro diferentes geometrias de ferramentas, sem revestimento, usando diferentes parâmetros de corte. Através das curvas de vida das ferramentas e empregando uma metodologia de análise, foi possível determinar tempos, custos e parâmetros de usinagem que mostraram o desempenho nitidamente superior de uma das quatro ferramentas testadas. Com os resultados desta pesquisa foi possível otimizar o tipo de geometria de ferramenta e parâmetros de corte em uma operação de furação de ferro fundido cinzento com brocas retas de metal-duro.*

***Palavras-chave:** Furação, aspectos econômicos, ferro fundido cinzento.*

1. INTRODUÇÃO

A determinação de condições econômicas de usinagem é parte essencial na otimização de processos de manufatura e constitui um objeto de primeira necessidade para afrontar as condições dos mercados cada vez mais competitivos. A velocidade de corte é um parâmetro extremamente importante nos aspectos econômicos da usinagem, já que a escolha da mesma determina em grande parte os custos de fabricação. Outros parâmetros como o tempo de usinagem, a vida da ferramenta e o acabamento da superfície da peça são fatores que estão diretamente relacionados com a velocidade de corte [1, 2].

Os custos envolvidos na produção de uma peça podem ser divididos em duas categorias: os custos devidos ao processo propriamente dito, como custo de ocupação das máquinas e dos operadores; e os custos não diretamente envolvidos com o processo, como custo de controle de qualidade, custo da matéria-prima, custo da mão-de-obra indireta etc. Para a análise de custos com o fim de se obter a velocidade econômica de corte, só é necessário considerar a primeira categoria de custos, ou seja, os custos diretamente envolvidos com a produção de peças fabricadas por usinagem [3].

Este trabalho tem como objetivo principal aprofundar a pesquisa sobre a análise econômica no processo de furação com brocas de canais retos em ferro fundido cinzento, visando à otimização do processo. Os experimentos foram realizados em linha de produção e em laboratório, utilizando brocas de metal-duro integral com canais retos e com orifícios internos de refrigeração [1].

2. CUSTOS DE USINAGEM

Segundo König⁽⁴⁾, os custos devidos ao processo de fabricação por peça estão compostos por três parcelas: os custos para preparação e tempos secundários (custos fixos A), custos de máquina-ferramenta e do operador (custo principal B) e custo de ferramentas (custo C), Equação 1 [4].

$$K_F = K_{ML} \left(\frac{t_r}{m} + t_n \right) + K_{ML} + t_h \cdot \frac{t_w}{T} (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT}) \quad (1)$$

(A) (B) (C)

Onde:

- K_F = custo de fabricação por peça [\$/peça]
- K_{ML} = custo de máquina e operador por hora [\$/h]
- K_{WT} = custo de ferramenta por vida [\$/peça]
- t_r = tempo de preparação [min]
- t_n = tempos secundários [min]
- t_h = tempo principal [min]
- t_w = tempo de troca da ferramenta [min]
- T = vida da ferramenta [min]
- m = tamanho do lote

O comportamento do custo de fabricação e o comportamento dos custos isolados em dependência da velocidade de corte são mostrados na Figura 1. Com o aumento da velocidade de corte os custos de fabricação não podem ser reduzidos continuamente. Em decorrência da diminuição da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, o número de trocas de ferramentas torna-se mais freqüente, tendo-se assim um crescimento do custo de ferramenta. Além disso, o aumento do tempo de fabricação decorre de paradas mais freqüentes da máquina para a substituição da ferramenta [4].

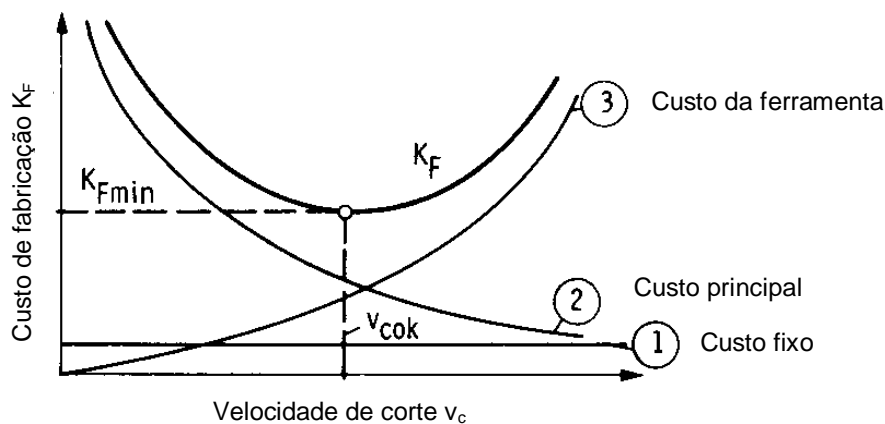


Figura 1 – Custo de fabricação e parcelas de custos envolvidas no processo [4]

Na furação o tempo principal e o tempo de fabricação podem ser calculados pelas equações (2) e (3) a seguir:

$$t_h = \frac{l}{f * n} \quad (2)$$

$$t_e = \left(\frac{t_r}{m} + t_n\right) + t_h + t_w \cdot \frac{t_h}{T} \quad (3)$$

Introduzindo a equação de Taylor (4) na equação de custos de fabricação (1) e pela diferenciação segundo a variável v_c , é possível a dedução de algumas das funções de otimização da usinagem [4].

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (4)$$

Onde: T = vida da ferramenta;
 C_v = constante que representa a vida T para uma $v_c = 1 \text{ m/min}$;
 k = coeficiente angular da reta $T - v_c$.

Para a velocidade de ótimos custos v_{cok} tem-se:

$$v_{cok} = \sqrt[k]{-(k+1) \cdot \frac{\left(t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}\right)}{C_v}} \quad (5)$$

Pela introdução da equação (5) na equação (4) obtém-se a vida de ótimos custos T_{ok} :

$$T_{ok} = -(t_w + 1) \cdot \left[t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}\right] \quad (6)$$

A determinação da velocidade de corte para ótimo tempo de produção v_{coz} é feita de forma análoga:

$$v_{coz} = \sqrt{-(k+1) \cdot \frac{t_w}{C_v}} \quad (7)$$

Substituindo na equação de Taylor (4) a equação (7) determina-se a vida de ótimo tempo de produção T_{oz} :

$$T_{oz} = -(k+1) \cdot t_w \quad (8)$$

3. CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA

Define-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido [5]. À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida tendem a aumentar, as dimensões da superfície se alteram e o acabamento da superfície normalmente piora. Em ferramentas de metal-duro, por exemplo, o aumento das forças de corte, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total do gume. A utilização de uma ferramenta até este ponto é desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de

reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer um gume adequado. Infelizmente, não existe uma única relação entre o desgaste da ferramenta, a qualidade e as dimensões da superfície usinada. Tentar medir o desgaste da ferramenta incrementaria os tempos não-produtivos. Por este motivo, em grandes produções industriais, como consequência das dificuldades de medição e interpretação dos desgastes, simplesmente é adotado como critério de fim de vida o número de peças usinadas por ferramenta. Tal número é calculado cuidadosamente através de um teste inicial e deve ser empregado um fator de segurança, o que leva a custos adicionais de usinagem [6, 7].

Em laboratório, o critério mais utilizado é o desgaste da ferramenta, devido à facilidade de ser quantificado. O desgaste de flanco é frequentemente utilizado como critério de fim de vida pela sua influência direta sobre a rugosidade da superfície do material usinado e as dimensões da peça.

A escolha dos critérios de fim de vida depende de vários fatores, tais com exigências da usinagem, material da ferramenta, processo etc., sendo os mais comuns [2, 5, 6,7]:

- Falha completa da ferramenta;
- Falha preliminar da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste no flanco VB_{max} ;
- Vibrações intensas da peça ou da ferramenta;
- Profundidade da cratera KT;
- Deficiência no acabamento da superfície;
- Formação de rebarbas;
- Variação na forma dos cavacos;
- Alteração das dimensões da peça;
- Força de corte, torque ou potência;
- Aumento da força de avanço;
- Aumento da temperatura do gume;
- Número de peças usinadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram utilizadas 20 brocas de metal-duro de canais retos com quatro geometrias de afiação diferentes, classificadas como geometrias A, B, C e D. As ferramentas foram ensaiadas em dois grupos, sendo o primeiro grupo de 8 brocas, com diâmetros 8,4 e 8,66 mm, para a realização dos ensaios preliminares, e o segundo grupo de 12 brocas, de 9,55 mm de diâmetro, para a execução dos ensaios de comparação de geometrias de afiação. A Tabela 1 descreve as principais características, medidas em laboratório, das quatro geometrias das brocas testadas.

Tabela 1 – Especificações das ferramentas utilizadas no trabalho

Geometria	A	B	C	D
Ângulo de ponta σ [°]	120	140	140	120
Ângulo de incidência α [°]	12	14	14	20
Ângulo de gume transversal ψ [°]	68	48	48	55
Comprimento do gume transversal [mm]	0,64	0,63	0,63	0,30
Largura da guia [mm]	0,70	0,76	0,72	0,75

As ferramentas são fabricadas em metal-duro classe K20, possuem canais retos e furos internos de refrigeração. A Figura 2 mostra as diferentes geometrias utilizadas ao longo do trabalho.

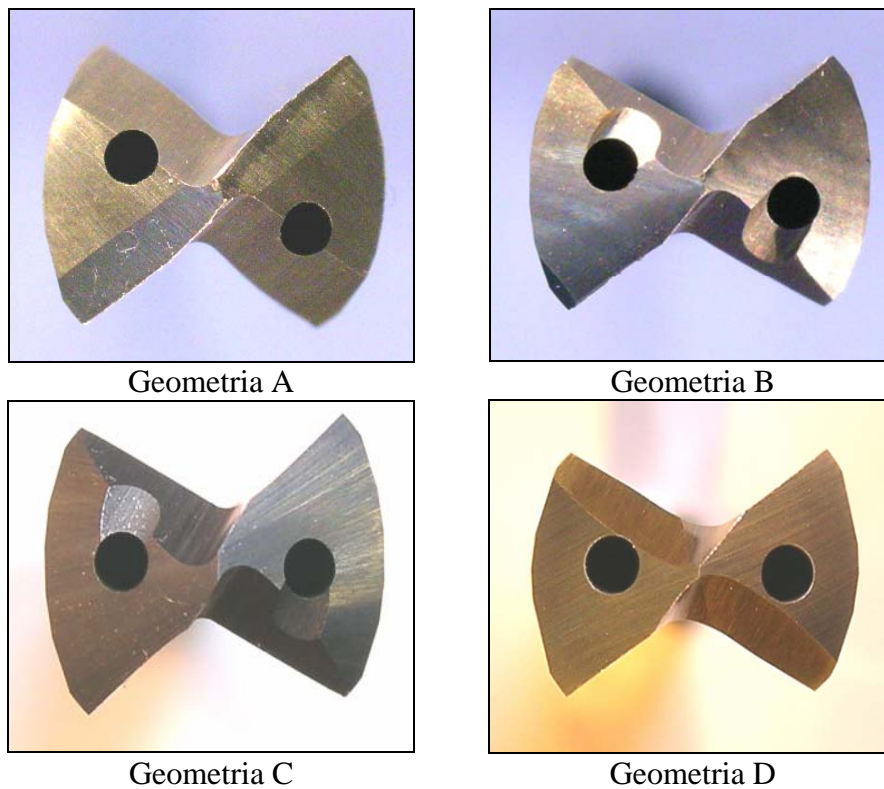


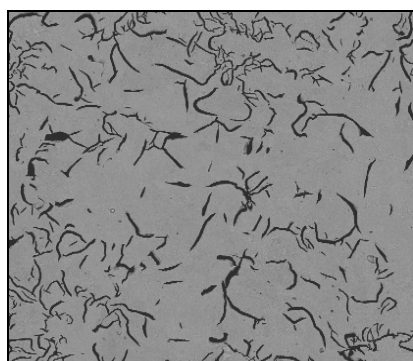
Figura 2 – Geometrias de brocas testadas

O material utilizado para os corpos de prova foi ferro fundido cinzento GG25, com uma dureza Brinell de 260 HB. Foram preparados cilindros fundidos, com 72 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro previamente faceados, para a realização de ensaios. A análise química fornecida pelo fabricante é mostrada na Tabela 2:

Tabela 2 – Composição química do ferro fundido cinzento GG25

C [%]	Sn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Cu [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
3,06	0,11	0,07	0,003	0,61	2,00	0,90	0,60	0,125

Foi realizada a análise da microestrutura em seções transversais dos corpos de prova. As amostras foram submetidas a polimento e análise para caracterizar o tipo de grafita. Posteriormente, foi feito um ataque químico com nital a 2% de concentração, para avaliar as porcentagens de grafita e perlita, verificando-se que o material encontrava-se em conformidade com a norma. A Figura 3 mostra as imagens obtidas para a análise microestrutural do ferro fundido cinzento GG25.



Sem ataque 150x



Ataque de nital 2% 200x

Figura 3 – Micrografia do ferro fundido cinzento GG25

Para a realização dos ensaios de verificação da influência dos parâmetros de corte sobre as grandezas de saída do processo, foi tomada como base a série R10 para a seleção de medidas arbitrárias da norma DIN 323, que é comumente utilizada em experimentos na área de usinagem. Assim, as velocidades de corte escolhidas foram de 63, 80, 100 e 125 m/min, enquanto que os avanços empregados foram de 0,063; 0,08; 0,1; 0,125; 0,16 e 0,2 mm [8].

Para os ensaios da análise comparativa entre diferentes geometrias de afiação de ferramentas foram utilizadas três condições de usinagem. A Tabela 3 mostra as condições de parâmetros utilizados nesse ensaio, escolhidos a partir da série de números normalizados R20, da norma DIN 323 [8].

Tabela 3 – Parâmetros de corte utilizados em ensaios comparativos

Condição	v_c [m/min]	f [mm]
1	112	0,08
2	125	0,08
3	140	0,08

Na a avaliação dos desgastes foi utilizada uma metodologia que consiste em realizar a medição dos desgastes em chão-de-fábrica em intervalos definidos previamente. Foi utilizada uma câmara digital de alta resolução com um sistema de iluminação e de posicionamento da ferramenta para garantir a repetitividade na aquisição das fotos. Através de um software de edição de imagens foram medidos os desgastes máximos de flanco VB_{max} , Figura 4. Como ponto de referência para a medição dos desgastes máximos de flanco VB_{max} , foi utilizado o gume principal da ferramenta.

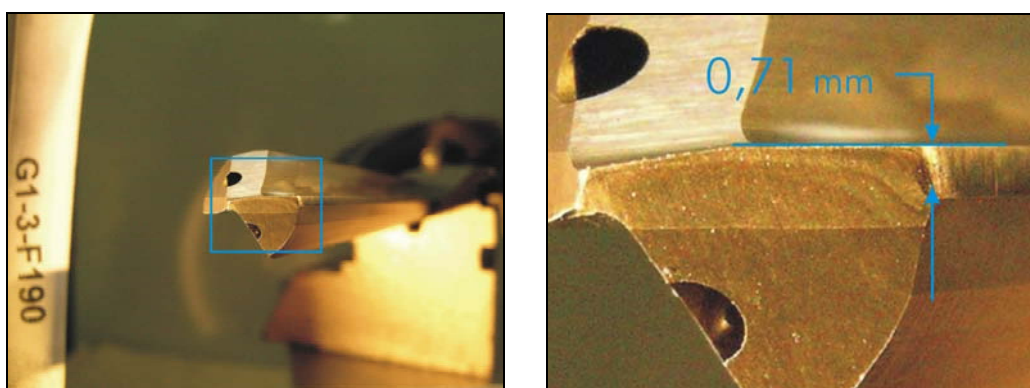


Figura 4 – Metodologia de medição do desgaste de flanco VB_{max}

Para o registro dos desgastes VB_{max} foi realizada uma marcação em todas as ferramentas, a qual consiste da identificação dos gumes e de um código que identifica o tipo de geometria, número da broca e o número de furos usinados. Assim, foi medido o VB_{max} em ambos os gumes de cada ferramenta e foi tomado o maior desgaste entre as duas medições como representativo para os resultados. Tal procedimento foi adotado devido à diferença pouco significativa entre estas duas medições.

Neste trabalho foi tomando como critério de fim de vida o desgaste de flanco máximo VB_{max} , fixado em 0,5 mm para todos os ensaios realizados.

Com o objetivo de avaliar os aspectos econômicos e apresentar as tendências de vida das quatro geometrias testadas, foi realizada uma análise de custos de usinagem. Para esta análise foram utilizados valores de tempos e custos aproximados segundo informações obtidas no chão-de-fábrica (custo hora máquina = R\$ 30,00 reais; custo da ferramenta = R\$ 200,00 reais; custo para oito reafiações = R\$ 80,00 reais; tempo de preparação da máquina = 10 minutos; tempo de troca da ferramenta = 1 minuto; tempos secundários = 0,1 min; tamanho do lote = 10.000 peças).

Foi calculada a vida da ferramenta para o ótimo tempo e custo de fabricação (T_{oz} , T_{ok}), bem como as velocidades de corte de ótimo tempo e ótimos custos de fabricação (v_{coz} , v_{cok}), e o tempo

mínimo de fabricação por peça (t_e). Foi calculado também o custo mínimo e máximo de produção (K_{foz} , K_{fok}) [5].

6. RESULTADOS

A Figura 5 descreve a comportamento do desgaste das quatro ferramentas com geometrias A, B, C e D, utilizando velocidade de corte de 112 m/min e avanço de 0,08 mm, o que corresponde à condição 1 do planejamento experimental (Tabela 3).

Analisando as curvas de desgaste, observa-se que as ferramentas com geometrias A, C e D apresentam um comportamento semelhante até o momento em que atingem 60 furos. A partir deste ponto (4,3 m de comprimento usinado), a broca com geometria C sofre um desgaste rápido em comparação com as demais geometrias. A broca com geometria A apresentou um comportamento evolutivo do VB_{max} similar à ferramenta com geometria D durante todo o comprimento de usinagem. Já a ferramenta com geometria B apresentou um desgaste diferenciado em relação às outras geometrias até os 200 furos. Após este ponto houve um rápido crescimento do desgaste, até chegar ao final de vida da ferramenta.

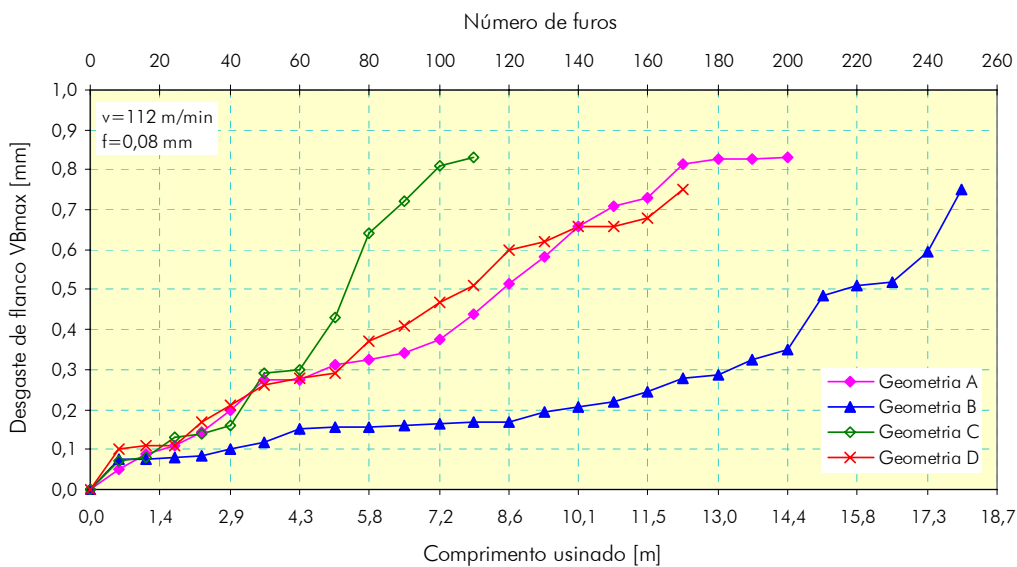


Figura 5 – Resultados de vida na condição 1

Os resultados de desgaste em todas as condições de velocidade testadas mostraram uma mesma tendência sobre os quatro tipos de geometrias de ferramentas. A Figura 6 mostra a comparação do desempenho das quatro geometrias testadas nas diferentes condições de velocidade.

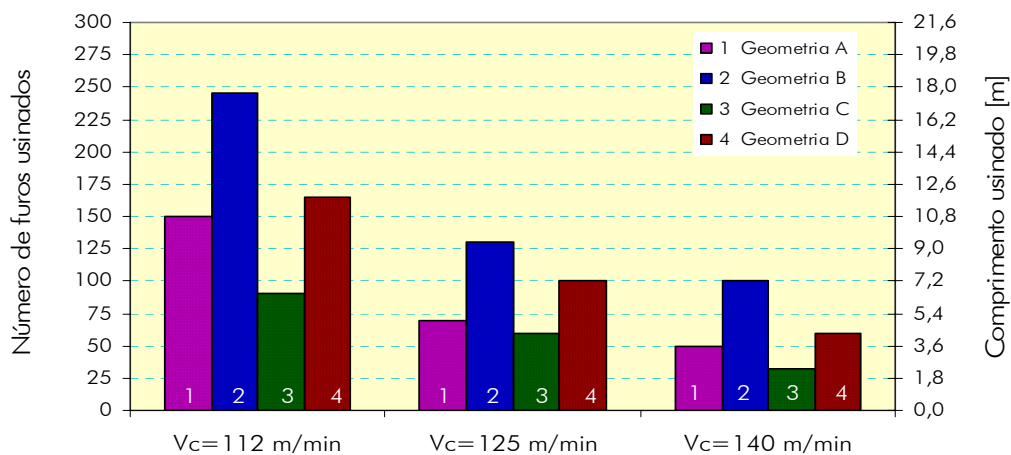


Figura 6 – Comparação da vida das ferramentas com diferentes geometrias

A comparação entre as brocas evidencia o desempenho superior da ferramenta com geometria B, em todas as condições de velocidade testadas. Depois dessa geometria, o melhor resultado foi obtido com a ferramenta de geometria D. A broca com geometria C apresentou a menor vida entre o grupo das quatro geometrias.

Os melhores resultados para todas as geometrias foram constatados com a utilização da velocidade de corte mais baixa (112 m/min), onde os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando um maior tempo de vida para as ferramentas.

A partir dos dados de desgaste obtido, foi possível construir as curvas de vida para as ferramentas com geometrias A, B, C e D, nas condições específicas do ensaio (condições de velocidade e avanço, fluido de corte, geometria da ferramenta, critério de fim de vida etc.), Figura 7.

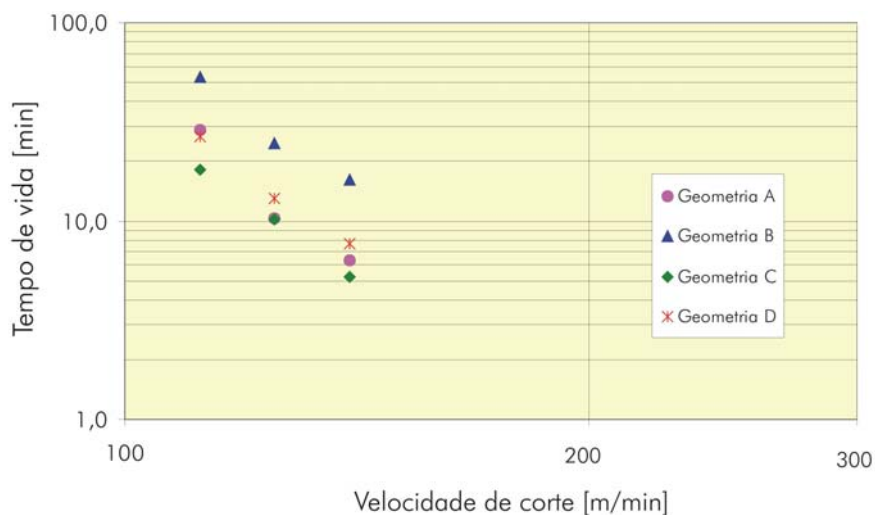


Figura 7 – Curvas de vida das geometrias A, B, C e D

De posse da curva de desgaste das ferramentas, foi possível extrair as constantes da equação de Taylor. Os dados utilizados para calcular as constantes, bem como os respectivos resultados, são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo das constantes da equação de Taylor

Geometria	V_{c1} (m/min)	T_1 (min)	V_{c2} (m/min)	T_2 (min)	V_{c3} (m/min)	T_3 (min)	k	C_v (min)
A	112	28,7	125	10,4	140	6,4	-6,73	1,65E15
B	112	53,0	125	24,8	140	16,2	-5,31	3,74E12
C	112	18,1	125	10,2	140	5,2	-5,58	4,98E12
D	112	26,5	125	13,0	140	7,7	-5,53	5,45E12

A Tabela 5 descreve os resultados da análise econômica realizada para as quatro geometrias, utilizando os resultados das constantes da equação de Taylor anteriormente calculadas e apresentadas na Tabela 4. Os resultados mostram que a geometria B supera as demais em relação à velocidade de mínimo tempo de fabricação, o que se reflete diretamente em um menor tempo de fabricação por peça. Além disso, em relação ao custo mínimo de produção, a geometria B também se mostrou mais favorável, com o menor valor entre as quatro geometrias.

Analisando a velocidade de ótimo custo, os valores calculados foram bastante semelhantes para as geometrias A, C e D, com a velocidade de ótimo custo da geometria B apresentando valores superiores. Por outro lado, em relação à vida para ótimo custo, a geometria A mostrou-se consideravelmente superior às demais geometrias, que apresentam valores de vida para ótimo custo similares. Esse resultado teórico obtido a partir da extrapolação das curvas de vida parte do pressuposto que o comportamento da vida das ferramentas é linear (em escala bilogarítmica) na

faixa de velocidades testadas. Conseqüentemente, a maior inclinação da curva de vida da geometria A apresenta um valor maior de vida para a velocidade de ótimo custo (361 min), o qual está fora da faixa de velocidades que foram testadas, Figura 7. Neste caso seria necessário fazer um ensaio prático para verificar o comportamento da vida das geometrias na condição de velocidades ótimas de produção.

Tabela 5 – Resultados da análise econômica

Geometria	T_{oz} [min]	v_{oz} [m/min]	t_e [min]	K_{foz} [R\$/p]	K_{fok} [R\$/p]	v_{cok} [m/min]	T_{ok} [min]
A	5,73	141	0,34	1,25	0,25	76	361
B	4,31	177	0,28	1,22	0,25	81	271
C	4,58	143	0,32	1,37	0,28	68	288
D	4,53	153	0,30	1,31	0,26	77	285

Através dos resultados obtidos pode-se observar que geometria B apresentou os melhores resultados do ponto de vista econômico. Essa geometria admite velocidades de corte de máxima e ótima produção maiores a um baixo custo, em relação às outras geometrias testadas.

O desempenho econômico menos favorável foi verificado na geometria C, visto que as velocidades de máxima e ótima produção para esta geometria foram as mais baixas. De igual forma os custos de mínima e máxima produção foram os mais elevados.

De maneira geral os resultados das geometrias A e D foram apresentaram bastante semelhança, em relação aos tempos e custos ótimos de produção. Já em relação aos tempos e custos de mínimo tempo de fabricação, apresentam uma maior discrepância entre si.

7. CONCLUSÕES

O efeito da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas mostrou-se, como esperado, bastante forte em todas as geometrias, pois à medida que a velocidade de corte aumenta, a taxa de desgaste torna-se consideravelmente maior. Assim, os melhores resultados de vida em todas as geometrias foram verificados para velocidades de corte mais baixas, nas quais os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando assim um maior tempo de vida para as ferramentas.

Dentre as ferramentas testadas na análise comparativa, as ferramentas com geometria B apresentaram as melhores taxas de vida. Na condição 1, com velocidade de corte de 112 m/min, a geometria A mostrou um rendimento aproximadamente 40% menor que os tempos de vida obtidos com a ferramenta com geometria B. A respeito da ferramenta C, o desempenho foi em torno de 65% inferior à ferramenta B. Já a ferramenta C apresentou uma vida aproximadamente 35% menor em relação à ferramenta B. Nas demais condições de velocidades testadas, a tendência dos resultados se manteve muito próxima da condição 1, com uma sensível redução na vida das ferramentas, principalmente na geometria C, decorrente do aumento da velocidade de corte.

A análise econômica revelou que a geometria B supera as demais geometrias em relação à velocidade de mínimo tempo de fabricação, o que implica diretamente em um menor tempo de fabricação por peça. Além disso, em relação ao custo mínimo de produção, a geometria B também se mostrou mais favorável, com o menor valor das quatro geometrias.

O desempenho econômico menos favorável foi verificado na geometria C. As velocidades de máxima produção e ótimos custos nesta geometria foram as mais baixas dentre todas as geometrias testadas. De igual forma os custos de mínimo tempo e máxima produção foram os mais elevados.

8. REFERÊNCIAS

- [1] CASTILLO, W. J. **Furação profunda de ferro fundido GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. 2005. 135 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [2] MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta**. 2. Ed. Barcelona: Blume, 1980, 426 p.
- [3] DINIZ, A. E. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo, Art. Líber Editora, 2000, 256 p.
- [4] KÖNIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5. ed. Berlin: Springer, 1997, 471 p.
- [5] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977, 751 p.
- [6] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 5. Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, 249 p.
- [7] CHILDS T *et al.* **Metal machining theory and applications**. 1. ed. Londres: Arnold, 2000. 400 p.
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.v. Preferred numbers and series of preferred numbers; basic values, calculated values, rounded values. **DIN 323.1**, 1974.

ECONOMIC ASPECTS OF GRAY CAST IRON DRILLING

Willian Jefferson González Castillo

Federal University of Santa Catarina – UFSC – Department of Mechanical Engineering
Campus Universitário Trindade – P.O. Box: 476 – Florianópolis SC – 88.010-970 – Brazil
castillo@imp.ufsc.br

Rolf Bertrand Schroeter

Federal University of Santa Catarina – UFSC – Department of Mechanical Engineering
Campus Universitário Trindade – P.O. Box: 476 – Florianópolis SC – 88.010-970 – Brazil
rolf@imp.ufsc.br

Abstract. *The economic machining conditions determination is fundamental for optimization of chip removal manufacturing processes. Nowadays, the optimization constitutes an essential tool to confront more and more competitive markets. Since drilling represents a high cost in the automotive industry, with a significant volume of all metal-cutting material removed in machining processes, an economic approach becomes necessary when the optimization of production costs is intended. This paper presents an economic analysis of gray cast iron drilling using carbide straight drills. Uncoated drills with four different geometries were evaluated using different cutting parameters. Using the tool life curves and an analysis methodology, it was possible to determine times, costs and cutting parameters that showed the better performance of one of the geometries. The results allowed the geometry and cutting parameters to be optimized for gray cast iron drilling using carbide straight drills.*

Keywords: *Drilling, economic aspects, tool life, gray cast iron.*