

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO

Gustavo Simão Rodrigues (Universidade Estácio de Sá) E-mail: gustavosimao@uol.com.br
Rodrigo Outemuro Batista (Universidade Estácio de Sá) E-mail: outemuro@hotmail.com
Wagner Baia da Silva Universidade Estácio de Sá) E-mail: wagnebs_93@hotmail.com

Resumo: O tema abordado neste trabalho é o estudo das condições econômicas de usinagem pela análise experimental do desgaste de uma ferramenta de corte durante o torneamento cilíndrico externo do aço SAE 4340. É feita uma revisão sobre os tipos de desgaste das ferramentas de corte baseando-se em norma internacional que define os critérios de fim de vida de uma ferramenta e é observado experimentalmente qual desses critérios de fim de vida é alcançado primeiro. Uma vez identificado o critério que decreta o fim da vida da ferramenta, pode-se determinar a função do tempo de vida da ferramenta em relação à velocidade de corte e também pode-se determinar as condições ideais para realização do processo de fabricação compreendido pelo Intervalo de Máxima Eficiência para o par ferramenta-peça em estudo.

Palavras-chave: Processo de Fabricação por Usinagem; Desgaste de ferramenta de corte.

EXPERIMENTAL STUDY OF MACHINING ECONOMIC CONDITIONS ON CILINDRICAL EXTERNAL TURNING

Abstract: The topic discussed in this paper is the study of machining economic conditions by the experimental analysis of cutting tool wear for the external cylindrical turning of SAE 4340 steel. A review on the types of cutting tools wear is made based in international standard which defines the criteria for the end of tool life and it is observed experimentally which of these end of tool life criteria is reached first. Once identified the criteria which dictates the end of tool life, one can determine the function of the lifetime tool regarding to the cutting speed and one can also determine the ideal conditions to execute the manufacturing process between the Maximum Efficiency Interval for the pair tool-part under study.

Keywords: Machining Manufacturing Process; Cutting Tool Wear

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por usinagem é um dos processos mais utilizados na indústria em função da alta produtividade, da possibilidade de obtenção de geometrias complexas e da precisão alcançada nas peças fabricadas. Segundo a norma DIN (2003), a usinagem aplica-se a todos os processos de fabricação nos quais ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco, conferindo à peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três.

Ainda segundo a DIN (2003), a teoria aplicada na usinagem é baseada na mecânica (atrito, deformação), na termodinâmica (calor) e nas propriedades dos materiais. A partir de um dos parâmetros de corte importante da usinagem, que é a velocidade de corte, o estudo das condições econômicas de usinagem permite alcançar dois objetivos antagônicos: a máxima produção ou o mínimo custo. Dessa forma, entre a velocidade de corte de máxima produção e a velocidade de corte de mínimo custo define-se o intervalo de máxima eficiência (IME).

Um fator essencial para se determinar o IME é o tempo de vida da ferramenta e os critérios utilizados para se determinar o fim da vida da ferramenta são de acordo com os tipos de desgaste que a ferramenta pode apresentar, todos definidos na norma ISO (1993).

Esse trabalho pretende analisar experimentalmente um tipo de desgaste utilizando o aço SAE 4340, o qual será usinado até o fim da vida da ferramenta e dessa forma encontrar os valores ideais para delimitar o IME, definindo a velocidade de corte de máxima produção e a velocidade de corte de mínimo custo.

2. PRINCIPAIS PARÂMETROS

Os parâmetros de corte são as variáveis programáveis ou medidas que estabelecem os padrões adotados na usinagem do material. Estes dependem do material usinado, da ferramenta empregada e da máquina utilizada. Como exemplo de parâmetros de corte, pode-se citar: a velocidade de corte (V_c), o avanço (f), e a profundidade de corte (a_p). A V_c é a velocidade periférica da ponta da ferramenta, a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta. Essa taxa é normalmente expressa em [m/min]. No torneamento, essa taxa é controlada pela rotação da peça sob seu eixo, expressa em rotações por minuto [rpm]. O avanço (f), expresso em [mm/rev], é definido como a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça. A taxa que a ferramenta se move ao longo da peça é medida pela velocidade de avanço (V_f), expressa em [mm/min]. A profundidade de corte (a_p), expressa em [mm], é a profundidade de penetração da ferramenta na peça medida perpendicularmente ao plano de trabalho, o qual é definido pelas direções das velocidades de avanço e de corte da ferramenta. A seguir, são explicitadas as formulações da V_c e V_f .

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

onde (d) representa o diâmetro da peça, em [mm], (f) representa o avanço da ferramenta, em [mm/rotação] e (n) representa a rotação da peça, em [rpm].

Há ainda um parâmetro importante a ser analisado que é o percurso de avanço (l_f) expresso em [mm]. Este é o comprimento da trajetória (linear) que a ferramenta percorre durante a usinagem da peça.

3. DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

O desgaste é um processo natural que ocorre ao longo da vida de qualquer ferramenta de usinagem. Nos processos de usinagem, esse processo ocorre de forma variada para diferentes condições de corte. O desgaste na ferramenta é influenciado pelos parâmetros de corte: V_c , V_f e a_p . O principal influenciador é a velocidade de corte (V_c), isso se deve ao fato de que o aumento da V_c aumenta a taxa de material que passa por uma mesma área de contato da ferramenta na peça, aumentando o atrito na região de contato. Além disso, há um aumento de temperatura transferida ao processo, o que reduz a dureza da ferramenta. Dessa maneira, a diminuição da vida da ferramenta se a V_c for aumentada de uma determinada percentagem é maior do que se a V_f for aumentada na mesma proporção.

O desgaste é o fator limitador do grau de utilização das ferramentas de corte, que pelos custos e do tempo de corte, definem basicamente a economia de um processo de fabricação por usinagem. A aresta da ferramenta se desgasta com maior intensidade na superfície de saída e de folga, sendo dependente da forma e da duração da sollicitação térmica, mecânica e química da região de corte. A Figura 1 mostra as principais superfícies e arestas de uma ferramenta de corte monocortante.

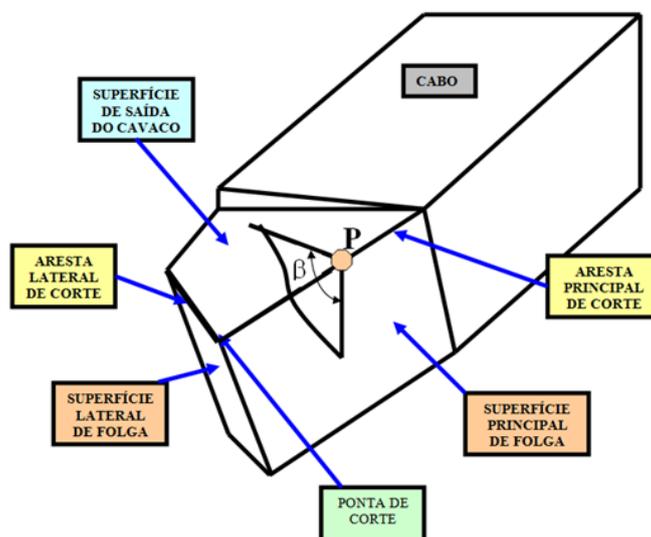


Figura 1 – Ferramenta monocortante
Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970)

Um motivo essencial para o desgaste consiste na combinação de altas temperaturas de usinagem e fortes carregamentos mecânicos. Entre os efeitos do desgaste da ferramenta pode-se citar: maiores forças e temperaturas de corte, piores acabamentos superficiais e precisões de acabamento.

Pode haver a redução do desgaste por meio do uso de lubrificantes e fluidos refrigerantes no processo de usinagem. Isso reduz o atrito e a temperatura, reduzindo as forças e redução do desgaste. Neste trabalho não será considerada a utilização de fluidos de corte no experimento.

3.1 Tipos de desgastes

É importante saber diferenciar desgaste de avaria. Desgastes e avarias são as duas causas que levam à troca da ferramenta. Desgaste é a perda contínua e microscópica de matéria da ferramenta e qualquer outro dano à ferramenta é denominado de avaria. A seguir serão classificados os principais tipos de cada caso.

- a) Desgaste frontal ou de flanco – Causado no contato entre a ferramenta e a peça e ocorre na superfície de folga e atinge a aresta principal, a secundária ou ambas. É o tipo de desgaste mais comum, pois todo processo de usinagem gera um desgaste frontal. Existe um desgaste que ocorre sempre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, indicado como b e c na Figura 2, este tipo de desgaste deteriora o acabamento superficial da peça, modificando totalmente a forma da aresta de corte original saindo da faixa de tolerância para a dimensão desejada. O aumento da velocidade de corte (V_c) é o fator mais influenciador para este desgaste.

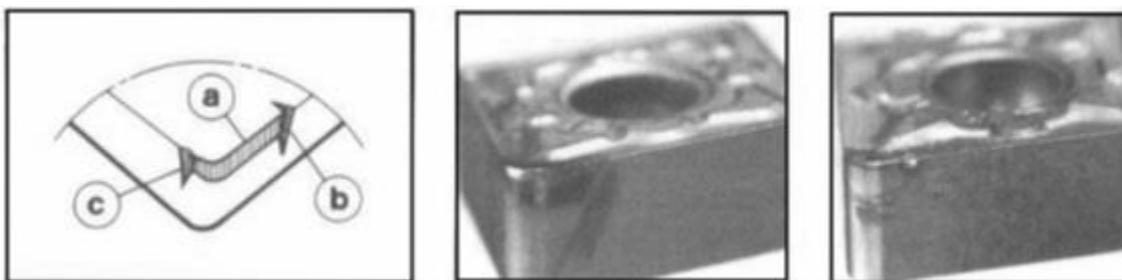


Figura 2 - Representação do desgaste de flanco e entalhe
Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 5ª Ed., 2006

- b) Desgaste de cratera – Causado pelo o atrito entre a ferramenta e o cavaco, ocorre na superfície de saída da ferramenta. Alguns processos de usinagem não ocorrem este tipo de desgaste, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal duro e cerâmicas, ou quando o material da peça é frágil, gerando cavacos curtos. Com o crescimento do desgaste de cratera, quando encontra o desgaste frontal, gera a quebra da ferramenta. A Figura 3 exemplifica o desgaste de cratera.

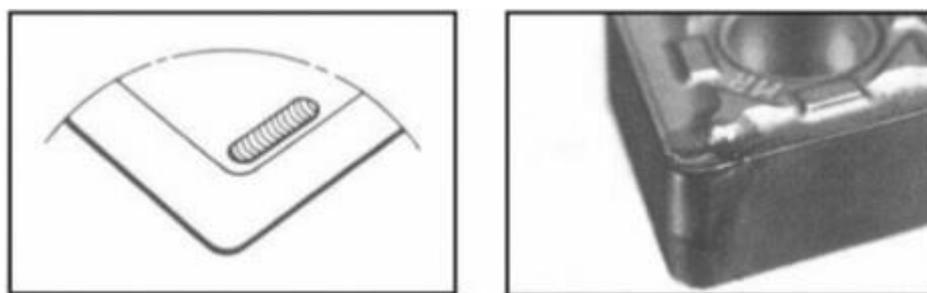


Figura 3 - Representação do desgaste de cratera
Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 5ª Ed., 2006

3.2 Critério de fim de vida da ferramenta

Como o desgaste de uma ferramenta acontece de forma contínua e progressiva, torna-se necessário se estabelecer critérios para definir até que ponto a ferramenta é adequada. Além deste ponto a ferramenta deve ser substituída e/ou reafiada.

A forma adotada para a determinação deste ponto de troca e/ou substituição é dada pela norma ISO (1993). Esta norma estabelece ensaios para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar de modo satisfatório. Esse tempo é denominado tempo de vida da ferramenta de corte (T), e é determinado pelo tempo de trabalho necessário para que a ferramenta desenvolva algum defeito crítico.

Segundo a norma ISO (1993), os critérios para que a ferramenta seja trocada ou reafiada são:

- Largura média de desgaste de flanco: $VB_m = 0,3 \text{ mm}$
- Largura máxima de desgaste de flanco: $VB_{m\acute{a}x} = 0,6 \text{ mm}$
- Profundidade de cratera: $KT = 0,06 + 0,3 \cdot f$
- Largura entre flanco e início da cratera: $KF = 0,02 \text{ mm}$

Ainda de acordo com a norma ISO (1993), quando qualquer um destes critérios for atingido por uma ferramenta de corte, recomenda-se a substituição da ferramenta.

3.3 Vida da ferramenta

A vida da ferramenta, ou tempo efetivo de corte que uma ponta cortante leva para atingir valores críticos de desgaste, depende das condições de usinagem do par ferramenta-peça. A função tempo de vida em relação à velocidade de corte ($T = f(V_c)$), chamada de curva de vida da ferramenta, foi deduzida primeiramente por Taylor (FERRARESI, 1970), sendo expressa pela equação (3):

$$T = K \cdot V_c^{-x} \tag{3}$$

A proposta de Taylor diz que o valor de x é relativamente constante para um determinado material de ferramenta, enquanto o valor de K depende do material da ferramenta, do material da peça e das condições de corte.

Um método para encontrar as constantes x e K resume-se em especificar um critério de fim de vida da ferramenta, impor uma velocidade de corte, usinar o corpo de prova até atingir o critério especificado e verificar qual o tempo de vida da ferramenta alcançado. Repete-se o procedimento para outras velocidades de corte, relacionando os respectivos tempos de vida até que se alcance o fim da vida da ferramenta, obtendo um gráfico semelhante à Figura 4.

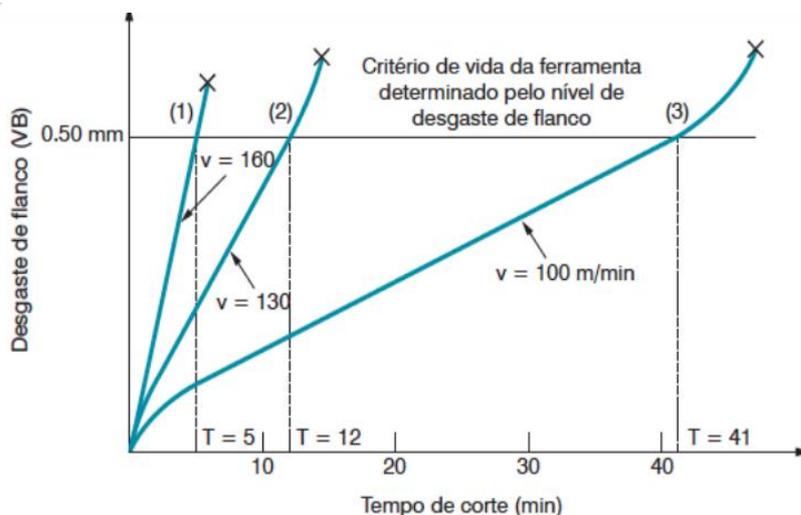


Figura 4 - Exemplo de gráfico desgaste x tempo para diferentes velocidades de corte
 Fonte: Mikell P. Groover, 4ª Ed., 2010

A partir do gráfico apresentado na Figura 4, pode-se resolver a equação (3) e obter os coeficientes, traçando assim a curva de vida da ferramenta em função da velocidade de corte, como exemplificado na Figura 5.

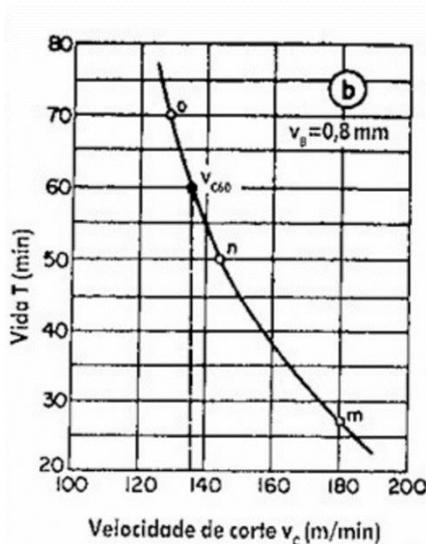


Figura 5 - Gráfico de vida da ferramenta x Velocidade de Corte
 Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 5ª Ed., 2006

3. CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM

Em 1907, Taylor já havia descoberto que velocidades de corte muito baixas ou muito altas são indesejáveis uma vez que as velocidades baixas resultam em uma produção muito baixa enquanto as velocidades de corte muito altas levam a muitas trocas de ferramenta. Existem outros critérios para se determinar as condições ideais para o processo de fabricação por usinagem, como por exemplo, o critério de máximo lucro proposto por Wu e Ermer (1966), porém os critérios mais usuais são os critérios de mínimo custo de produção e máxima taxa de produção.

3.1 Velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp})

A velocidade de corte de máxima produção é a velocidade de corte em que o tempo total de confecção de uma peça (t_t) é mínimo, admitindo-se o avanço e a profundidade de corte constante. Em operações nas quais o avanço da ferramenta segue uma trajetória retilínea e a velocidade de avanço é constante, o cálculo do tempo total de confecção de uma peça pode ser feita usando a Equação 4 (FERRARESI, 1970).

$$t_t = t_c + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot t_{ft} \right) + \frac{t_c}{T} \cdot t_{ft} \tag{4}$$

Onde,

- t_s = Tempo de manuseio da peça
- t_a = Tempo de aproximação e afastamento
- t_p = Tempo de preparo da máquina
- t_{ft} = Tempo de troca da ferramenta
- Z = Número do lote de peças fabricadas
- T = Tempo de vida da ferramenta
- t_c = Tempo de corte efetivo

O tempo de corte (t_c) é entendido como o tempo que efetivamente desgasta a ferramenta, pois é o considerado como o tempo em que a ferramenta está realmente removendo cavaco. Pode-se definir o t_c pela Equação 5.

$$l_f = v_f \cdot t_c = f \cdot n \cdot t_c \quad (5)$$

Onde (l_f) é o percurso de avanço em [mm]. Substituindo a rotação da peça obtida pela equação (1), tem-se que

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (6)$$

Onde:

d = Diâmetro da peça em mm

f = Avanço em mm/volta

V_c = Velocidade de corte em m/min

Substituindo (6) na (4), tem-se:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot t_{ft} \right) + \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c \cdot T} \cdot t_{ft} \quad (7)$$

Substituindo agora (3) em (7), tem-se:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right) + \left(\frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot k} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft} \quad (8)$$

A Equação (8) pode ser separada em três parcelas que constituem o tempo total de confecção de uma peça:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (9)$$

$$t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot t_{ft} \quad (11)$$

O gráfico mostrado na Figura 6 apresenta a variação destas três parcelas em função da velocidade de corte. Vê-se na figura que o t_c diminui com o crescimento da velocidade de corte, o tempo t_1 é independente da velocidade de corte e o tempo t_2 , relativo à troca da ferramenta, aumenta com a velocidade de corte.

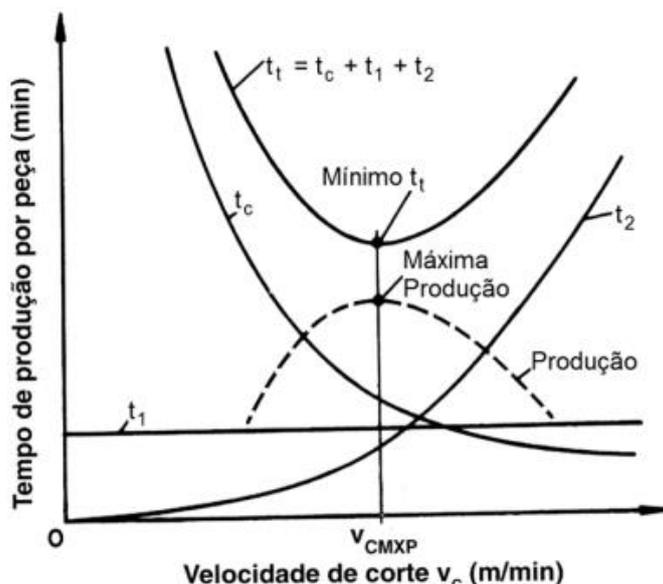


Figura 6 – Tempo de produção por Peça x Velocidade de corte
 Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 5ª Ed., 2006

O valor da velocidade de máxima produção (V_{cmxp}), que representa o mínimo tempo de produção, é o ponto de mínimo da curva do tempo total de confecção de uma peça (t_t). Como foi mencionado, admite-se o avanço e a profundidade de usinagem constante e dessa forma obtém-se o valor mínimo desta função quando

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x - 1) \cdot t_{ft}}} \tag{12}$$

Substituindo-se o valor de V_{cmxp} obtido na Equação 12 na fórmula de Taylor (Equação 3), obtém-se o tempo de vida da ferramenta para a máxima produção:

$$T_{m xp} = (x - 1) \cdot t_{ft} \tag{13}$$

3.2 Velocidade de corte de mínimo custo (V_0)

A velocidade de corte de mínimo custo é dependente, dentre outros fatores, do tempo total de confecção de uma peça (t_t), definido na Equação 4. Segundo Ferraresi (1970), o custo da produção por peça é dado por

$$K_p = \left(\frac{S_h + S_m}{60}\right) \cdot t_t + \frac{K_{ft}}{Z_T} \tag{14}$$

Onde:

S_h = Custo do homem-hora

S_m = Custo da hora-máquina

K_{ft} = Custo da ferramenta por vida de cada aresta

Z_T = número de peças usinadas por vida de cada aresta

Substituindo o tempo total de confecção de uma peça na Equação 14 e fazendo procedimento análogo à manipulação para se determinar a velocidade de corte de máxima produção, chega-se a velocidade de corte de mínimo custo (V_0)

$$V_0 = \sqrt[x]{\frac{K}{T_0}} \quad (15)$$

onde T_0 é o tempo de vida da ferramenta para a velocidade de mínimo custo, definido pela Equação 16

$$T_0 = T_{mxp} + 60 \cdot \frac{(x-1)K_{ft}}{(S_h + S_m)} \quad (16)$$

e o custo da ferramenta por vida de cada aresta (K_{ft}) é definido pela Equação 17

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{400} + \frac{K_s}{n_s} \quad (17)$$

onde V_{si} é o valor da aquisição do porta ferramenta e K_s é o valor da ferramenta, ambos fornecidos pelo o fabricante (Lamina Technologies, 2015), e n_s é número de arestas da ferramenta. Substituindo valores na equação (17), chega-se a:

$$K_{ft} = \frac{200}{400} + \frac{30}{6} = R\$ 5,50 \quad (18)$$

Para se calcular o tempo de vida da ferramenta para a velocidade de mínimo custo (V_0) e o tempo de vida da ferramenta para a máxima produção (T_{mxp}) é necessário conhecer os coeficientes da fórmula de Taylor x e K , a serem determinados experimentalmente.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado utilizando um torno da marca Clark Machine, modelo CO 36. O corpo de prova utilizado foi uma peça cilíndrica de aço SAE 4340 de diâmetro inicial de 102,5 mm e comprimento de 329 mm.

A ferramenta de corte utilizada neste experimento foi a pastilha TNMG 160408 (nomenclatura de acordo com a norma ISO (2012)) do fabricante Lamina Technologies. Esta ferramenta é de metal duro com recobrimento de AlTiN (Nitreto de Titânio e Alumínio), fabricada pelo processo de PVD (deposição física à vapor). Esta ferramenta foi selecionada, pois é uma ferramenta para usinagem média, ou seja, serve para processos de desbastes e acabamento, portanto uma ferramenta com aplicação mais abrangente.

4.2 Organização do experimento

Os parâmetros de corte (a_p , f e V_c) foram selecionados respeitando os limites impostos pelo fabricante da ferramenta (Lamina Technologies, 2015), sendo selecionados os valores próximos ao mínimo recomendado frisando a segurança do operador da máquina convencional utilizada.

Como o experimento está sendo realizado em uma máquina convencional, não será possível obter uma velocidade de corte constante. Conforme o diâmetro da peça varia, a velocidade de corte também varia como é possível ver na Equação 1. Logo, será usada a média das velocidades para definir a velocidade de corte. Esta é igual a:

$$V_c = V_{cmédia} = \frac{(V_{cinicial} + V_{cfinal})}{2} \quad (19)$$

Os parâmetros utilizados para a usinagem estão na tabela 1 e serão considerados constantes para todo o experimento:

Tabela 1 – Especificações do parâmetro utilizado

Avanço f [mm/revolução]	0,24
Profundidade a_p [mm]	0,5
Percurso de avanço L_f [mm]	300

Fonte: Feita pelo o autor

A fim de padronizar as medições e assegurar resultados precisos, a peça bruta foi usinada em 3 passes com os mesmos parâmetros da Tabela 1 para que fosse realizada uma usinagem uniforme e não houvesse incidência de corte interrompido, evitando assim esforços não levados em consideração nas arestas de corte estudadas.

O desgaste de cratera ou craterização foi identificado durante os ensaios como o desgaste que causou o fim da vida da ferramenta devido às imperfeições na superfície do aço usinado, como de mostra na (Figura 7). Utilizando a definição para o cálculo da profundidade de cratera (KT), usando o avanço de 0,24 mm/rot, foi calculada a profundidade de cratera da seguinte forma: $KT = 0,06 + 0,3 \cdot 0,24 = 0,132$ mm. Este foi o valor admitido como critério do fim da vida da ferramenta.

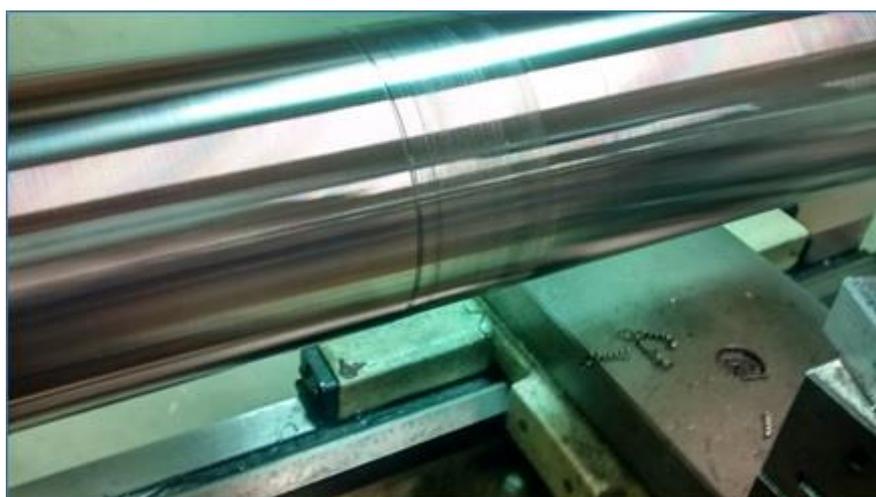


Figura 7 – Imperfeição na superfície do aço

Fonte: Dos autores

4.3 Realização do primeiro ensaio:

Os dados do primeiro ensaio estão resumidos na Tabela 2:

Tabela 2 – Dados do primeiro ensaio

Rotação [rpm]	460
Diâmetro inicial da peça [mm]	101
Diâmetro final da peça [mm]	80
Velocidade de corte inicial [m/min]	146
Velocidade de corte final [m/min]	115,6
Velocidade de corte média [m/min]	130,8
Número de passes	21
Tempo de corte por passe [min]	2,7 ou 2 minutos e 43 segundos
Tempo total de corte [min]	56,7 ou 56 minutos e 43 segundos
Desgaste KT [mm]	0,132 mm

Fonte: Feito pelo o autor

O gráfico mostrando a evolução do desgaste de cratera ao longo do tempo para a velocidade de corte de 130,8 m/min está mostrado na Figura 8.

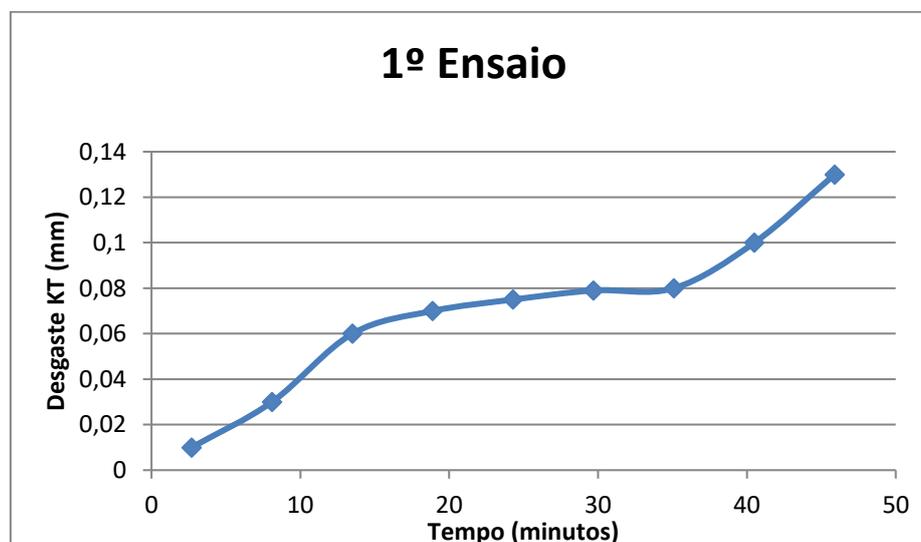


Figura 8 – Gráfico Desgaste x Tempo de corte ($V_c = 130,8$ m/min)

Fonte: Dos autores

4.4 Realização do segundo ensaio:

Os dados do segundo ensaio estão mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 – Dados do segundo ensaio

Rotação [rpm]	1255
Diâmetro inicial da peça [mm]	80
Diâmetro final da peça [mm]	75
Velocidade de corte inicial [m/mim]	315,4
Velocidade de corte final [m/mim]	295,7
Velocidade de corte média [m/min]	305,6
Número de passes	5
Tempo de corte por passe [min]	1 minuto, aproximadamente
Tempo total de corte [min]	5 minutos
Desgaste KT [mm]	0,132 mm

Fonte: Dos autores

O gráfico mostrando a evolução do desgaste de cratera ao longo do tempo para a velocidade de corte de 305,6 m/min está mostrado na Figura 9.

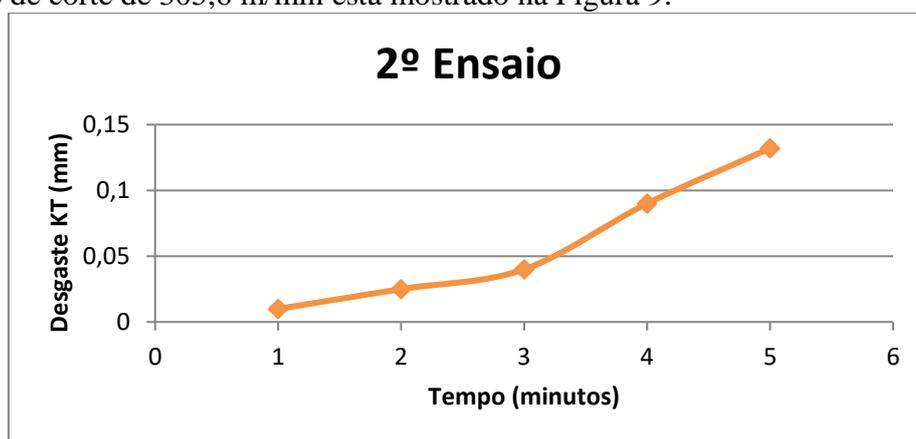


Figura 9 – Gráfico Desgaste KT x Tempo de corte ($V_c = 305,6$ m/min)

Fonte: Dos autores

5. INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

Pelos valores de tempo de vida da ferramenta obtidos para o desgaste de cratera alcançado e utilizando a Equação 3, chega-se aos coeficientes de Taylor conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do coeficiente de Taylor

Coeficientes de Taylor	
K	$6,462 \times 10^7$
X	2,861

Fonte: Dos autores

A Figura 10 mostra o gráfico da curva de vida da ferramenta em função da velocidade de corte para o desgaste de cratera especificado, destacando os dois pontos do gráfico utilizados para calcular os coeficientes x e K .

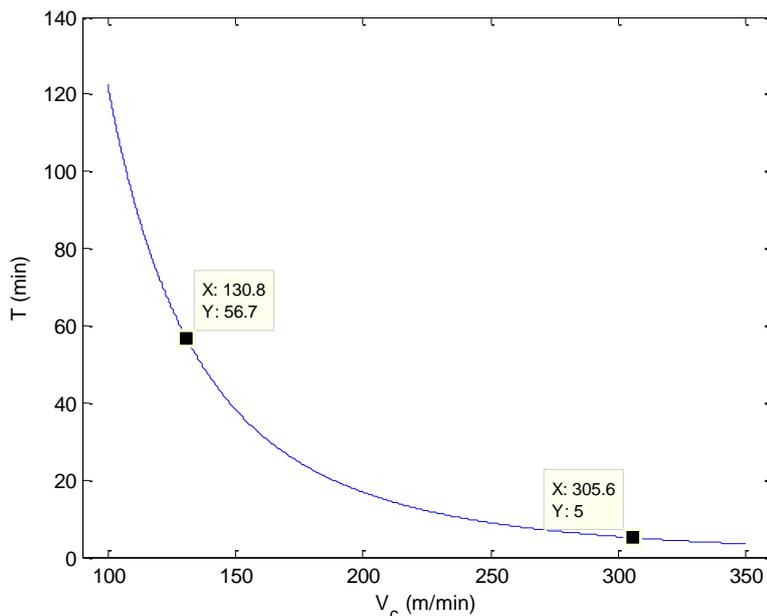


Figura 10 – Curva de vida da ferramenta para o desgaste (KT = 0,132 mm)
 Fonte: Dos autores

Para estes coeficientes de x e K encontrados, pode-se fazer a análise das condições econômicas para verificar se a usinagem encontra-se dentro da faixa de máxima eficiência. Levando em consideração o tempo de troca da ferramenta (t_{ft}) como 2 minutos (MAIA, 2012) e utilizando a equação (13) para o cálculo do tempo de vida da ferramenta para máxima produção e a equação (12) para a velocidade de corte para máxima produção, respectivamente, chega-se a

$$T_{m\text{xp}} = (x - 1) \cdot t_{ft} \tag{20}$$

$$T_{m\text{xp}} = (2,861 - 1) \cdot 2 = 3,722 \text{ min}$$

$$V_{c\text{m\text{xp}}} = \sqrt[2,861]{\frac{6,462 \times 10^7}{3,72}} \tag{21}$$

$$V_{c\text{m\text{xp}}} = 339,2 \text{ m/min}$$

Utilizando os valores de ($S_h + S_m$) retirados de Maia (2012) e substituindo os dados na equação (16), chega-se ao tempo de vida da ferramenta para mínimo custo

$$T_0 = 3,722 + 60 \cdot \frac{(1,86) \cdot 5,50}{(34,10)} \tag{22}$$

$$T_0 = 21,71 \text{ min}$$

Substituindo valores na equação (15), chega-se finalmente à velocidade de corte de mínimo custo:

$$V_0 = \sqrt[2,861]{\frac{6,462 \times 10^7}{21,71}} = 182,84 \text{ m/min} \tag{23}$$

Uma vez calculadas as velocidades de máxima produção e mínimo custo, pode-se determinar o IME conforme mostrado na Figura 11.

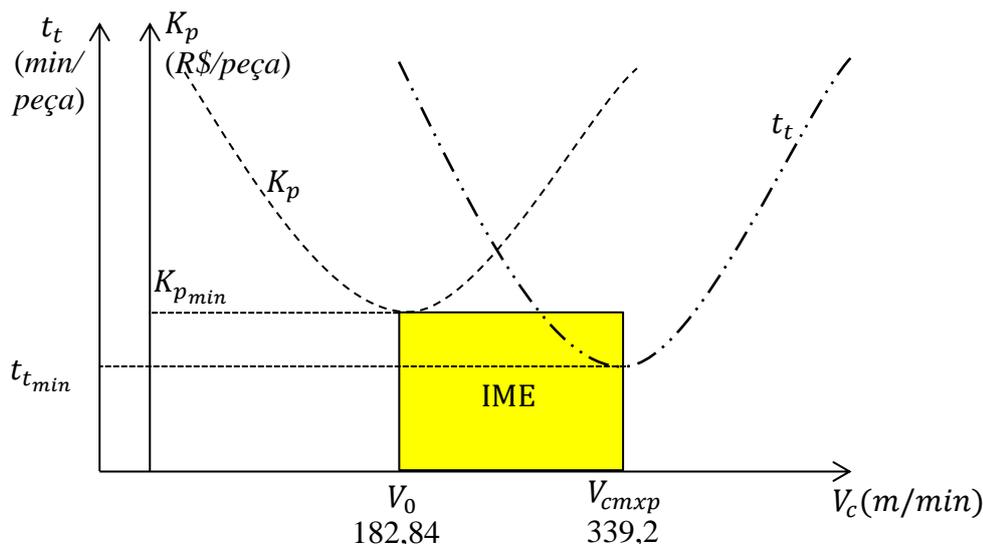


Figura 11 – Intervalo de Máxima Eficiência
Fonte: Dos autores

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou-se bastante interessante por permitir a obtenção de dados reais a partir da usinagem do corpo de prova utilizado.

O IME foi determinado, sendo a velocidade de corte de mínimo custo de 182,84 m/min e a velocidade de corte de máxima produção de 339,2 m/min. Como a velocidade de corte de mínimo custo depende de fatores como custo da mão de obra, custo do porta-ferramenta e custo da ferramenta, é um valor que pode haver uma divergência da realidade. Entretanto, a velocidade de corte utilizada no primeiro ensaio (130,8 m/min) encontra-se bastante abaixo do mínimo no IME, o que leva a crer que a usinagem realizada neste ensaio resultaria em um custo de produção elevado para um tempo de produção já elevado (aproximadamente 57 minutos). Se a usinagem fosse realizada com a velocidade de corte de mínimo custo, o tempo de produção até a o fim da vida da ferramenta seria de aproximadamente 22 minutos, ou seja, um aumento da velocidade de corte de 40% reduz o tempo de produção em 62%, levando o custo para o mínimo possível.

Acredita-se que esse valor de velocidade de corte utilizado no primeiro ensaio deve estar fora do IME seja em função dos parâmetros utilizados fornecidos pelo fabricante encontrarem-se no limite inferior da faixa disponível.

Com relação a velocidade de corte de máxima produção com um aumento de 11% da velocidade (305,6 para 339,2 m/min), há uma redução de 25,5% no tempo de produção (5 min para 3 min e 46 s).

Conclui-se que o tempo de produção e conseqüentemente o custo de produção são sensíveis à variação da velocidade de corte. Dessa forma, um estudo detalhado das condições econômicas de usinagem podem resultar em uma economia significativa da produção assim como um aumento na taxa de produção, fatores que podem ser determinantes na disputa pelo mercado.

REFERÊNCIAS

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 8580: Manufacturing Process – Terms and definitions. Alemanha, 2003. 33 p.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 5º ed. São Paulo: Art Liber Ltda, 2006. 255 p.

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 12 ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1970. 751 p.

GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. 4º ed. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1832: *Indexable inserts for cutting tools - Designation*. Estados Unidos, 2012. 25 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3685: *Tool-life testing with single-point turning tools*. Estados Unidos, 1993. 44 p.

LAMINA TECHNOLOGIES. Catálogo de ferramentas – 2015. Yverdon-les-Bains, 2015. 190 p.

MAIA, N. A. D. *Estudo de caso: formulação de custo de um produto de usinagem em uma pequena empresa*. 2012. 1 CD-ROM. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

TAYLOR. F. W. *On the art of cutting metals*, Transactions of the ASME, 28, págs. 31-58, 1907.

WU, S.M.; ERMER, D.S. *Maximum Profit as the Criterion in the Determination of the Optimum Cutting Conditions*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Nov., págs.435-442. 1966