

10 – CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE CORTE.....	1
10.1 – Cálculo da velocidade de máxima produção (v_{mxp}).....	2
10.2 – Cálculo da velocidade econômica de corte (v_0).....	7
10.3 – Intervalo de máxima eficiência (I_{mef}).....	11

10 – CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE CORTE

A velocidade de corte tem uma grande influência sobre a vida da ferramenta de usinagem comparando-se com o avanço e profundidade de usinagem, de forma que ela influencia significativamente a economia do processo como um todo. Por exemplo, para uma mesma combinação de ferramenta e material sendo usinado, um aumento de 50% na velocidade de corte resulta em 90% de diminuição da vida da ferramenta. Um aumento de 50% no avanço resulta em 60% de diminuição no tempo de vida. Na mesma situação aplicando-se à profundidade de usinagem a diminuição é de apenas 15%. Isso indica que para a otimização de um processo de usinagem, de maneira geral, deve-se aumentar a profundidade de usinagem, em seguida o avanço e por último a velocidade de corte, observando-se a limitação de potência da máquina e a resistência mecânica da peça e ferramentas, naturalmente.

Na medida em que se aumenta a velocidade de corte o tempo de usinagem diminui, mas o desgaste da aresta se acelera significativamente, e esta deve ser repostada mais freqüentemente. Isso leva a uma situação em que, para se fabricar um lote de peças em uma produção seriada, o somatório dos tempos de troca de aresta será alto. Pode-se ter uma situação, por exemplo, onde o tempo de cada troca de aresta equivale ao tempo de corte de várias peças. Portanto, altas velocidades de corte induzem a freqüentes trocas de aresta contribuindo para alto tempo de fabricação do lote. Por outro lado, se a velocidade de corte utilizada for baixa o desgaste será pequeno e não haverá troca de aresta muito freqüentemente. Neste caso, no entanto o tempo de fabricação do lote também tende a ser alto, uma vez que o tempo de corte é alto. Desta forma, tudo leva a crer que há uma velocidade de corte “ideal” na qual o tempo de fabricação do lote e, por

consequente de cada peça seja mínimo, já que função $t_c = f(v)$ (tempo de corte como função da velocidade de corte) parece aumentar quando v aumenta ou diminui.

Os primeiros estudos econômicos sobre a usinagem foram realizados por Taylor nos EUA e por Schlesinger na Alemanha no início do século XX (Ferraresi, D., 1977). Desde esse tempo o desenvolvimento tecnológico tem sido intenso e alguns conceitos mudaram bastante. No início usavam-se definições de velocidade de corte de máxima produção como sendo aquela em que se produzia o máximo volume de cavacos num determinado tempo total de corte. Mais tarde esse conceito foi mais bem definido como sendo aquele onde o tempo produção de uma peça, em um lote, é mínimo. Neste capítulo somente serão apresentados os conceitos básicos e aplicados a ferramentas de aresta única em uma operação de torneamento cilíndrico externo. Os mesmos conceitos, no entanto poderão ser estendidos a outras ferramentas e operações. Para o presente desenvolvimento também se admite que já tenham sido escolhidos a seqüência de operações e o ferramental adequado. As possibilidades de redução de tempo por meio de decisões administrativas e financeiras também não são os objetivos deste texto.

10.1 – Cálculo da velocidade de máxima produção (v_{mxp})

Um ciclo básico e genérico de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, sendo executado em uma máquina CNC, pode ser constituído pelas seguintes fases:

- a) Preparo da máquina-ferramenta para a execução de Z peças;
- b) Colocação e fixação da peça para usinagem na máquina-ferramenta (carga);
- c) Aproximação ou posicionamento da ferramenta para o início do corte;
- d) Corte da peça;
- e) Afastamento da ferramenta;
- f) Soltura e retirada da peça usinada (descarga);

A redução de tempo correspondente à fase *a*) pode ser conseguida por meio de um adequado planejamento de processos, ou pelo emprego de dispositivos, etc. As fases *b*) e *e*) podem ser otimizadas por um adequado programa CNC. Mesmo as fases *b*) e *f*)

também podem ser otimizadas por dispositivos especiais de fixação, sistemas autômatos de carga/descarga, etc. A fase *d*), no entanto, deverá ser otimizada pelo presente estudo.

Para tornar o estudo analítico usam-se os seguintes símbolos para designar cada uma das parcelas de tempo durante o ciclo completo de usinagem:

t_t = Tempo de usinagem de uma peça (fases de *a* a *f*);

t_p = Tempo de preparo da máquina (fase *a*);

t_s = Tempo de carga e de descarga da máquina (fases *b* e *f*);

t_a = Tempo de aproximação e de afastamento da ferramenta (fases *c* e *e*);

t_c = Tempo de corte (fase *d*);

t_{tf} = Tempo de troca de ferramenta;

T = Tempo de vida de uma aresta;

n_t = Número de trocas de aresta na produção do lote de Z peças;

Z_T = Número de peças usinadas com uma aresta de corte no tempo T ;

Z = Número total de peças no lote;

O tempo de usinagem de uma peça no lote pode ser calculado da seguinte maneira:

$$t_t = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a + t_c + \frac{t_{tf} n_t}{Z} \quad (10.1)$$

Na expressão acima somente a quarta e a quinta parcelas têm relação com a velocidade de corte. O número de trocas de aresta, n_t , está relacionado ao tempo de corte, t_c , e este depende diretamente à velocidade de corte. O tempo de corte depende particularmente da operação de usinagem sendo executada e será calculado mais à frente. O número de trocas, no entanto, pode ser calculado no momento. As trocas de aresta deverão acontecer, no máximo, depois de decorrido o tempo de vida T . Sendo assim, o número de peças usinadas, Z_t , deve ser o número inteiro resultante da divisão do tempo de vida pelo tempo de corte:

$$Z_T = \text{int} \left(\frac{T}{t_c} \right) \quad (10.2)$$

Admitindo-se que ao final do lote haverá uma troca, pode-se escrever que:

$$n_t + 1 = \frac{Z}{Z_T} \quad (10.3)$$

Substituindo-se a equação (10.2) em (10.3) e re-arranjando, tem-se:

$$n_t = Z \cdot \frac{t_c}{T} - 1 \quad (10.4)$$

Substituindo-se agora (10.4) em (10.1) e re-arranjando, tem-se;

$$t_t = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a + t_c + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) t_{tf} \quad (10.5)$$

Para este exemplo o tempo de usinagem será calculado para uma operação de torneamento cilíndrico externo representado na Figura 10.1.

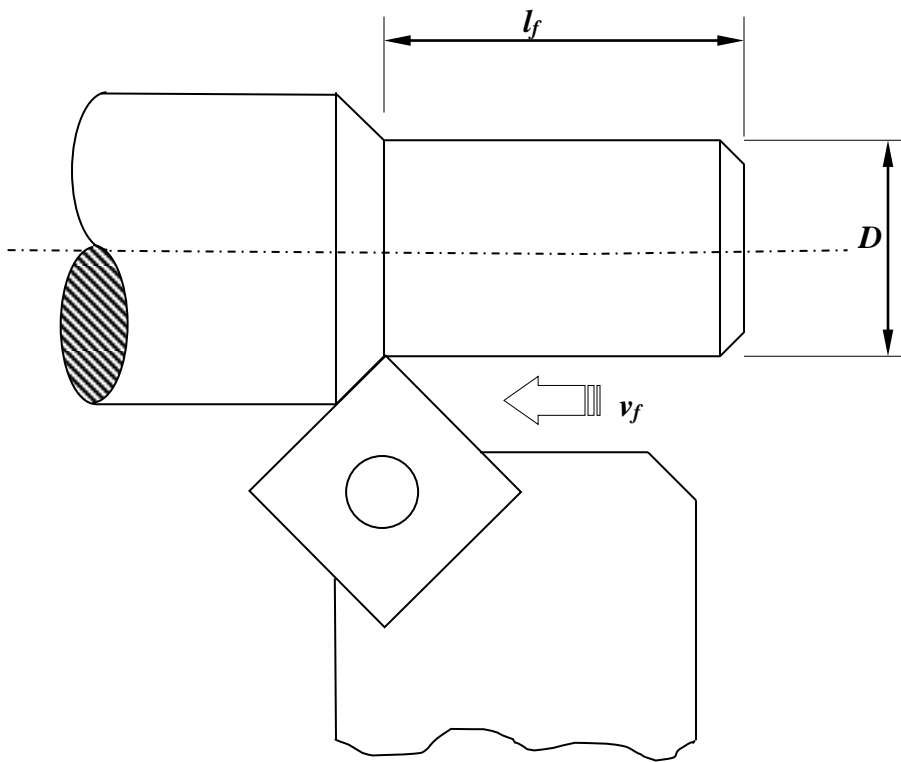


Figura 10.1 – Esquema de uma operação de torneamento cilíndrico externo, usado para calcular o tempo de corte.

Para este exemplo o tempo de corte pode ser escrito como:

$$t_c = \frac{v_f}{l_f} \quad (10.6)$$

A velocidade de avanço, por sua vez, pode ser escrita como:

$$v_f = f \cdot n \quad (10.7)$$

onde n pode ser escrito como:

$$n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (10.8)$$

substituindo a Equação (10.8) em (10.7) e então em (10.6) tem-se o tempo de corte escrito como função da velocidade de corte:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot v} \quad (10.9)$$

Substituindo-se então a Equação (10.9) em (10.5):

$$t_t = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a + \frac{l_f \pi D}{1000 f v} + \frac{t_{tf}}{T} \frac{l_f \pi D}{1000 f v} - \frac{t_{tf}}{Z} \quad (10.10)$$

Tem-se ainda que o tempo de vida da aresta, T , é também função da velocidade de corte, segundo a equação de Taylor para vida de ferramentas, já apresentada no Capítulo 8, como Equação (8.5). Para utilização no presente desenvolvimento será escrita na forma:

$$T v^x = K \quad (10.11)$$

a qual substituída em (10.10) resulta, após re-arranjo:

$$t_t = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a - \frac{t_{tf}}{Z} + \left(\frac{l_f \pi D}{1000 f} \right) v^{-1} + \left(\frac{t_{tf} l_f \pi D}{1000 K f} \right) v^{x-1} \quad (10.12)$$

A equação (10.12) pode ser dividida em três parcelas distintas de tempo:

$$t_1 = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a - \frac{t_{tf}}{Z} \quad (10.13)$$

$$t_2 = \left(\frac{l_f \pi D}{1000 f} \right) v^{-1} \quad (10.14)$$

$$t_3 = \left(\frac{t_{tf} l_f \pi D}{1000 K f} \right) v^{x-1} \quad (10.15)$$

Na Figura 10.2 representa-se, qualitativamente o comportamento de cada uma das parcelas de tempo designadas acima por t_1 , t_2 e t_3 .

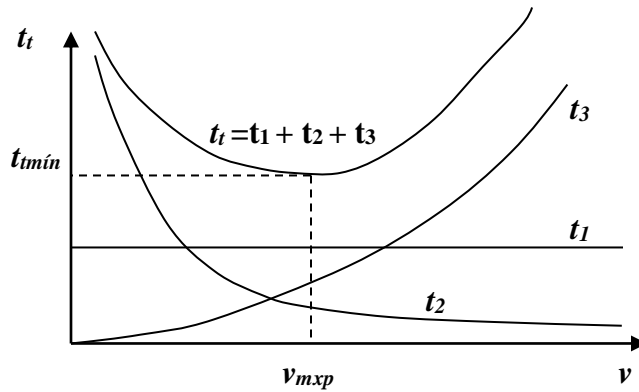


Figura 10.2 – Representação qualitativa das parcelas de tempo segunda a Equação (10.12).

Observa-se que a primeira parcela, t_1 , terá sempre uma forma constante independente da velocidade de corte. A segunda parcela, t_2 , por sua vez, tem um comportamento inverso com relação à velocidade de corte, ou seja, diminui com o aumento da velocidade de corte. Já a terceira parcela, t_3 , aumenta exponencialmente com a velocidade de corte. Desta forma, o comportamento da soma dessas três parcelas conterá um ponto de mínimo à medida que se aumenta a velocidade de corte, como já era de se esperar.

Analisando-se a Equação (10.12) pode-se perceber que o tempo total de usinagem de uma peça é função de v e f . Pode-se perguntar se não haveria um mínimo desta função com relação a essas duas variáveis, ou apenas com relação ao avanço. Pode-se demonstrar que este mínimo não existe, do ponto de vista matemático e isto está demonstrado em Ferraresi, D., 1979. O efeito do aumento avanço, f , no tempo de corte, t_c , é uma diminuição de tempo contínuo. Praticamente, o aumento do avanço causa uma diminuição do tempo de corte, porém também acarreta um aumento da força de corte, a qual pode atingir o limite de resistência da aresta de corte, ou da própria peça. Um valor de avanço muito alto pode também causar flexões na peça prejudicando suas dimensões finais usinadas. Por outro lado, o avanço é diretamente proporcional à rugosidade superficial, a qual pode atingir os limites aceitáveis para a especificação da peça. Sendo assim, o avanço não é uma variável de usinagem que possa ser usada para minimizar o

tempo de corte, mas deve ser fixada em um máximo valor aceitável, levando-se em conta as limitações de resistência da peça, qualidade superficial e dimensional.

Para encontrar, o ponto de mínimo da Equação (10.12), com relação a v , usa-se então a derivada:

$$\frac{dt_c}{dv} = -\frac{l_f \pi D}{1000 f} v^{-1} + (x-1) \frac{l_f t_{ff} \pi D}{1000 K f} v^{x-2} = 0 \quad (10.16)$$

resultando em:

$$v_{mxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{t_{ff}(x-1)}} \quad (10.17)$$

onde v_{mxp} é a velocidade de máxima produção, ou seja, aquela onde a fabricação do lote de Z peças será em um tempo mínimo. Re-escrevendo-se a Equação (10.17) da seguinte forma, pode-se avaliar o tempo de vida da ferramenta neste tempo:

$$[t_{ff}(x-1)] v_{mxp}^x = K \quad (10.18)$$

$$T = [t_{ff}(x-1)] \quad (10.19)$$

10.2 – Cálculo da velocidade econômica de corte (v_0)

Para os cálculos da velocidade econômica de corte, necessita-se determinar primeiramente o custo da operação de usinagem. Custo, em uma empresa, é um assunto de extrema delicadeza, pois envolve aspectos econômicos, lucratividade, etc., geralmente tratados com bastante cautela e mantidos em segredo, tanto quanto possível. Adicionalmente, a sua determinação precisa é muito complexa, tanto que há extensos estudos a respeito, com contínuos melhoramentos para sua determinação. Neste texto pretende-se introduzir uma metodologia para determinação de custo de uma operação de usinagem apenas, a qual pode-se aplicar a situações reais, certamente mais complexas. Com essa metodologia chega-se a uma equação de custos, que pode ser tão completa quanto se deseja, dependendo das parcelas incluídas. Essa equação conterà parcelas relacionadas às variáveis de usinagem e somente estas serão analisadas, assumindo-se as demais constantes. Com esse objetivo em mente, definem-se algumas parcelas de custo como sendo:

C_p = Custo de usinagem de uma peça de um lote de Z peças;

C_m = Custo de matéria-prima para uma peça (ou da peça antes da operação);

C_c = Custo do corte em usinagem;

C_{mq} = Custo de operação da máquina (Juros, depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida, etc.);

C_f = Custo da ferramenta de corte;

C_{tf} = Custo de uma troca de ferramenta;

Desta forma definidas as parcelas, pode-se calcular o custo da operação como sendo:

$$C_p = C_m + C_c + C_{mq} + C_f \quad (\text{R}\$) \quad (10.20)$$

A parcela de custos C_m é constante em relação às condições de usinagem. A parcela C_c pode ser calculada como:

$$C_c = \frac{t_r S_h}{60} \quad (\text{R}\$) \quad (10.21)$$

onde S_h é o custo do operador da máquina, incluindo-se todos os encargos em R\$ por hora. A parcela C_{mq} pode ser calculada como:

$$C_{mq} = \frac{t_r S_{mq}}{60} \quad (\text{R}\$) \quad (10.22)$$

onde S_{mq} é o custo de operação da máquina em R\$ por hora. A parcela de custo da ferramenta, C_f , envolve o custo da aresta de corte, do porta-ferramentas e também do tempo de troca de aresta. O custo de uma troca de ferramenta pode ser expresso da seguinte forma:

$$C_{tf} = \frac{C_{pf}}{n_{pf}} + \frac{C_{is}}{n_a} \quad (\text{R}\$) \quad (10.23)$$

onde:

C_{pf} = Custo do porta-ferramentas (R\$);

n_{pf} = Número máximo de vezes que o porta-ferramentas suporta a troca de aresta;

C_{is} = Custo do inserto (R\$);

n_a = Número de arestas úteis no inserto;

Substituindo-se as Equações (10.21), (10.22) e (10.23) em (10.20), obtém-se:

$$C_p = C_m + \frac{t_r S_h}{60} + \frac{t_r S_{mq}}{60} + \frac{C_{tf}}{Z_T} \quad (10.24)$$

Usando-se a Equação (10.2) pode-se escrever que:

$$C_p = C_m + \frac{t_t S_h}{60} + \frac{t_t S_{mq}}{60} + \frac{t_c}{T} C_{tf} \quad (10.25)$$

Usando-se agora a Equação (10.5) pode-se substituir o t_t em (10.25). Porém, para simplificar o raciocínio, a Equação (10.25) será abreviada agrupando-se as parcelas de tempo que independem das condições de usinagem em uma única parcela, t_f :

$$t_t = t_f + t_c + \left(\frac{t_c}{T} + \frac{1}{Z} \right) t_{tf} \quad (10.26)$$

onde:

$$t_f = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a \quad (10.27)$$

Substituindo-se:

$$C_p = C_m + \frac{t_c}{60} (S_h + S_{mq}) + \frac{t_c}{T} \left[C_{tf} + \frac{t_{tf}}{60} (S_h + S_m) \right] \quad (10.28)$$

Para simplificar ainda criam-se mais três constantes C_1 , C_2 e C_3 como sendo:

$$C_1 = C_m \quad (10.29)$$

$$C_2 = (S_h + S_{mq}) \quad (10.30)$$

$$C_3 = \left[C_{tf} + \frac{t_{tf}}{60} (S_h + S_{mq}) \right] \quad (10.31)$$

Sendo assim a Equação (10.28) é:

$$C_p = C_1 + \frac{t_c}{60} C_2 + \frac{t_c}{T} C_3 \quad (10.31)$$

Para o caso do torneamento cilíndrico externo, acima já utilizado como exemplo, pode-se calcular o tempo de corte por meio da Equação (10.19) a qual será substituída em (10.31), resultando em:

$$C_p = C_1 + C_2 \frac{\pi D l_f}{60 \cdot 1000 f} v^{-1} + C_3 \frac{\pi D l_f}{1000 \cdot f \cdot T} v^{-1} \quad (10.32)$$

Usando-se novamente a equação de Taylor e substituindo-se:

$$C_p = C_1 + C_2 \frac{\pi D l_f}{60000 f} v^{-1} + C_3 \frac{\pi D l_f}{1000 K f} v^{x-1} \quad (10.33)$$

De forma semelhante à análise realizada para a Equação (10.12) divide-se a Equação (10.32) em três parcelas distintas:

$$C_{p1} = C_1 \quad (10.34)$$

$$C_{p2} = \frac{\pi D l_f}{60000 f} v^{-1} \quad (10.35)$$

$$C_{p3} = \frac{\pi D l_f}{1000 K f} v^{x-1} \quad (10.36)$$

Na Figura 10.3 representa-se, qualitativamente o comportamento de cada uma das parcelas de custo designadas acima por C_{p1} , C_{p2} e C_{p3} .

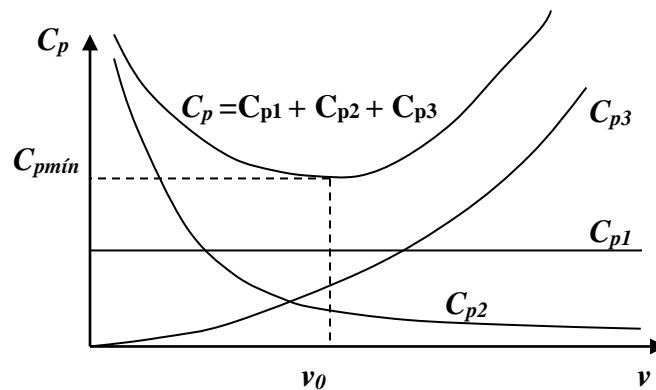


Figura 10.2 – Representação qualitativa das parcelas de custo segundo a Equação (10.33).

Observa-se que a primeira parcela, C_{p1} , terá sempre uma forma constante independente da velocidade de corte. A segunda parcela, C_{p2} , por sua vez, tem um comportamento inverso com relação à velocidade de corte, ou seja, diminui com o aumento da velocidade de corte. Já a terceira parcela, C_{p3} , aumenta exponencialmente com a velocidade de corte. Desta forma, o comportamento da soma dessas três parcelas conterà um ponto de mínimo à medida que se aumenta a velocidade de corte, como já era de se esperar. Se a velocidade de corte usada for muito alta os custos de troca de

ferramenta serão dominantes contribuindo para aumentar o custo total. Se, ao contrário, utiliza-se uma velocidade de corte muito baixa os custos de operação serão altos contribuindo também para o aumento de custo total. Para encontrar-se o mínimo custo, usa-se a mesma técnica já descrita para encontrar-se a velocidade de máxima produção. Da mesma forma, faz-se a análise de custos em função do avanço, como na discussão acima para a velocidade de máxima produção. Uma abordagem mais detalhada pode se encontrada em Ferraresi, D., 1979. Buscando-se o mínimo custo, tem-se:

$$\frac{dC_p}{dv} = -C_2 \frac{\pi D l_f}{60000 f} v^{-2} + (x-1) C_3 \frac{\pi D l_f}{1000 K f} v^{x-2} = 0 \quad (10.37)$$

Resolvendo-se:

$$v_0 = \sqrt[x]{\frac{C_2 K}{60(x-1)C_3}} \quad (10.38)$$

onde v_0 é a velocidade de mínimo custo.

10.3 – Intervalo de máxima eficiência (I_{mef})

Na Figura 10.3 representam-se as curvas de custo de usinagem de uma peça e do tempo de usinagem, ambas em função da velocidade de corte.

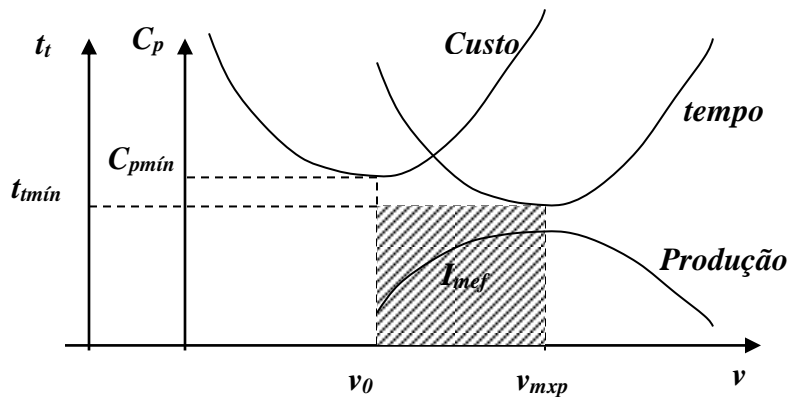


Figura 10.3 – Representação esquemática do intervalo de máxima eficiência.

Define-se o intervalo de máxima eficiência como sendo compreendido entre a velocidade de mínimo custo e a de máxima produção. É primordial para a eficiência de

usinagem de uma fábrica esteja dentro deste intervalo. Para velocidades menores que v_0 tem-se um aumento de custos devido a uma significativa parcela referente à longos tempos de corte fazendo pesar os custos de operação das máquinas e dos operadores, além de uma queda de produção. Ao contrário, trabalhando-se acima da velocidade v_{mxp} , tem-se o peso de custos de ferramentas, e de operadores e máquinas devido à alta frequência de paradas referentes a trocas de ferramentas, com adicional redução da produção. Dentro do intervalo de máxima eficiência, aumentando-se a velocidade desde v_0 até v_{mxp} , haverá um aumento de custos, porém um correspondente aumento de produção. Este recurso pode ser utilizado sempre que a produção deva ser maior, em número de peças, porém sem ultrapassar o limite de v_{mxp} a partir do qual a produção volta a cair, neste caso com a agravante de aumento de custos.

O raciocínio acima deve ser empregado com cautela e as variáveis fundamentais para a análise são as constantes da equação de Taylor. Estas podem ser obtidas por métodos experimentais para cada par ferramenta-peça e para condições de corte constantes. Estimativas podem ser feitas através de tabelas como as fornecidas no APÊNDICE IV, porém sua utilização deve ser com bastante cautela, já que são muito dependentes das condições de usinagem. Preferencialmente, os valores de velocidades de mínimo custo de máxima produção devem estar dentro dos valores usados em ensaios experimentais para obtenção das constantes da equação de Taylor. Extrapolações podem ser arriscadas uma vez que a relação entre tempo de vida e velocidade de corte é exponencial, com expoente x , geralmente entre 2 e 4 e valores de K da ordem 1×10^8 e 1×10^{10} , para a maioria dos ensaios realizados.