

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

VELOCIDADE ECONÔMICA DE CORTE E  
INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

$v_o, I_{mx}$

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO

Maiο 2020

## Sumário

11 – CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE CORTE .....	3
10.2 – Cálculo da velocidade econômica de corte ( $v_0$ ).....	4
10.3 – Intervalo de máxima eficiência ( $I_{mef}$ ).....	8

## 11 – 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 conseguinte 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.

### ***10.2 – 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 conterá 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:

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

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:

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

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:

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

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:

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

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  $C_{p3}$ .

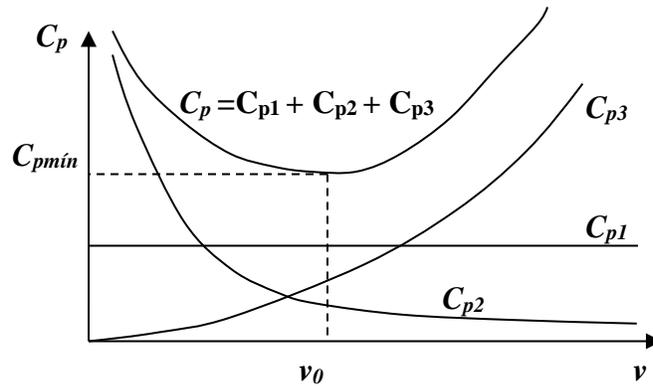


Figura 10.2 – Representação qualitativa das parcelas de custo segundo a Equação (10.33).

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.

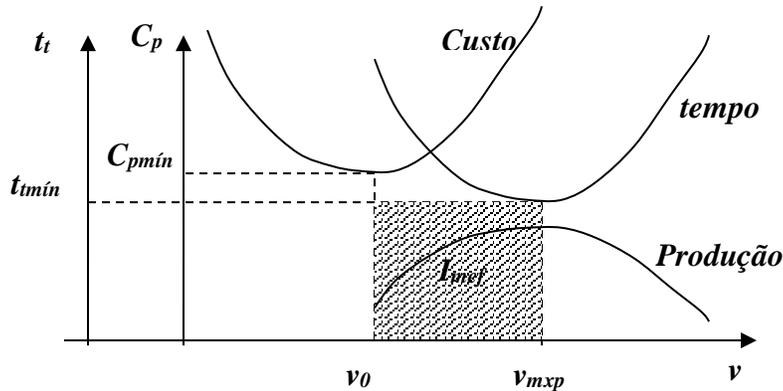


Figura 10.3 – Representação esquemática do intervalo de máxima eficiência.

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  $v_{m xp}$ , 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  $v_{m xp}$ , 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  $1 \times 10^8$  e  $1 \times 10^{10}$ , para a maioria dos ensaios realizados.