

Análise econômica da usinagem de aço automotivo DIN 100Cr6

Enio Yamamotu Ferreira Soares

enio.soares@gmail.com; enio_soares@hotmail.com

Resumo. O presente trabalho tem por objetivo a análise do processo de torneamento do aço automotivo DIN 100Cr6, SAE 52100 ou ABNT 52100 em três diferentes condições de lubrificação/refrigeração, sendo estas condições: jorro de fluido abundante, mínima quantidade de lubrificante (MQL) e usinagem sem fluido (seco). Este estudo utiliza ferramentas de corte com uma única seleção para a determinação dos coeficientes da equação de Taylor, que possibilitam juntamente com a análise dos custos envolvidos na usinagem deste aço automotivo, a determinação do intervalo de máxima eficiência para cada condição de lubrificação/refrigeração. Esta condição de melhor desempenho do processo de usinagem é quantificada pelas velocidades de corte de mínimo custo (v_{co}) e as velocidades de corte de máxima produtividade (v_{mp}) determinando o intervalo de máxima eficiência do processo. Além das velocidades supra citadas, outros custos como: ferramentas, fluidos, equipamentos auxiliares, tratamento e descarte de resíduos, formam um panorama que determina o custo total da usinagem C_p e define economicamente a melhor condição de operação para o torneamento deste aço automotivo.

Palavras chave. Torneamento, Condições econômicas de usinagem, Aços automotivos, Equação de Taylor, Mínima quantidade de lubrificante (MQL).

1. Introdução

Atualmente o Brasil figura como um dos maiores produtores de aços especiais para construção mecânica do mundo, sendo destaque o fato de a maior parte desta demanda estar voltada para o mercado interno ^[1]. A produção deste tipo de aço para indústria automotiva chega a representar 70% da produção siderúrgica ^[1] nacional. Dentre estes aços figura com destaque o aço DIN 100Cr6, SAE 52100 ou ABNT 52100, por seu uso na fabricação de componentes de rolamentos ou quando há necessidade do uso de um aço com alta temperabilidade conforme citado por Chiaverini ^[6]. Este também é um material que possui alta dureza e boa resistência à corrosão ^[2].

Na constante procura por uma atuação mais competitiva, a indústria automotiva busca cada vez mais por processos produtivos eficazes e com os menores custos operacionais. Esta busca tem como resultado um aumento da produção, sendo uma das formas de aumentar a produção, o aumento dos parâmetros de corte no processo de usinagem. Porém, este aumento de velocidade acarreta em maiores temperaturas na região de interação entre a peça e a ferramenta ^[7]. Para minimizar este problema de altas temperaturas além das novas tecnologias de produção de ferramentas, também são empregados tradicionalmente fluidos de corte que tem função de refrigeração e lubrificação da zona de interação entre peça e ferramenta. Existem três tipos de refrigeração/lubrificação: refrigeração abundante, Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e ausência de refrigeração (seco). Deve se lembrar que o fluido de corte não pode ser simplesmente descartado no ambiente devido aos impactos ambientais causados por estes fluidos. O principal foco destes impactos são os danos à saúde do operador e aos recursos hídricos ^[8].

1.1 Objetivo

Neste trabalho será avaliado o desgaste da ferramenta de corte e as condições econômicas em torneamento cilíndrico do aço DIN 100Cr6 com diferentes sistemas de refrigeração/lubrificação e diferentes velocidades de corte, utilizando para isso a formulação matemática proposta por Frederik Winslow Taylor ^[9].

Utilizando esta avaliação será feita à análise econômica da usinagem do aço DIN 100Cr6, nas três diferentes condições de refrigeração/lubrificação, sendo elas jorro abundante de lubrificante, mínima quantidade de lubrificante (MQL) e usinagem sem refrigeração/lubrificação (seco).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Processos de fabricação por usinagem

Os processos de fabricação podem ser divididos em vários grupos como, por exemplo: fundição, soldagem, pintura, montagem, conformação e usinagem.

Usinagem é definida como a operação de conferir a uma peça formato dimensão, acabamento ou uma combinação de qualquer destes três itens por meio da retirada de material em forma de cavaco.

2.2. Torneamento

Torneamento é o processo de usinagem de uma peça com o objetivo de se obter perfil cilíndrico interno ou externo. No torneamento cilíndrico a peça gira em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta se desloca numa trajetória no mesmo plano no referido eixo. O torneamento utiliza tradicionalmente ferramentas monocortantes, podendo também ser executado com ferramentas de múltiplos fios de corte, brocas e alargadores ^[3].

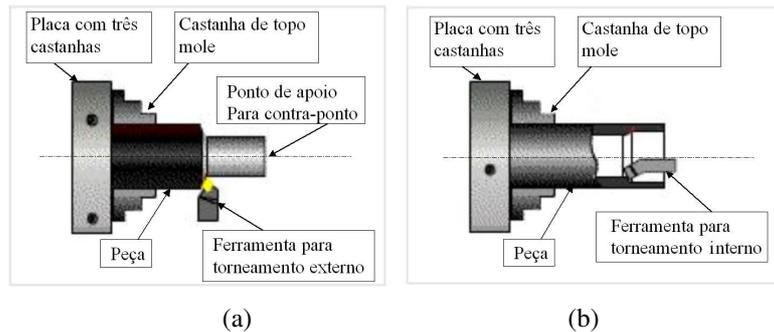


Figura 1. Ilustrações de torneamento. (a) cilíndrico externo e (b) torneamento cilíndrico interno, adaptado de [4].

As operações de torneamento se dividem, na maioria das aplicações industriais como sendo: desbaste uma operação que utiliza alta profundidade de corte e avanço da ferramenta, resultando normalmente em uma baixa qualidade superficial (alta rugosidade média) e grande calor produzido. O pré-acabamento é uma operação intermediária que usualmente opera sob as mesmas condições de corte do acabamento, porém a ferramenta de corte remove uma parcela de material que ainda não permite a obtenção de acabamento ou dimensão adequada. E o acabamento é uma operação com baixa profundidade de corte e baixo avanço da ferramenta, proporcionando baixa rugosidade e com isto bom acabamento superficial, além de tolerância dimensional em um campo mais restrito.

2.3. Parâmetros de usinagem para o torneamento

Sejam as seguintes grandezas pertinentes ao processo de torneamento:

Velocidade de Corte (v_c): é a velocidade periférica (tangencial) da ponta da ferramenta em relação à peça. Esta velocidade é o resultado do deslocamento da ferramenta diante da peça, considerando o tempo, para operações como aplainamento e brochamento, no qual o movimento de corte e de avanço não ocorrem concomitantemente. Para processos nos quais os movimentos de avanço e de corte ocorrem concomitantemente, caso este do torneamento, fresamento ou furação, a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [\text{m/minuto}] \quad (1)$$

Onde: d = diâmetro da peça [mm]; n = rotação [rpm]

Avanço por volta (f): é o deslocamento que a ferramenta de corte ou a peça faz em uma volta ou em cada curso da ferramenta.

$$f = \frac{\Delta s}{\text{rotação}} \quad [\text{mm/rotação}] \quad (2)$$

Onde: Δs = percurso realizado longitudinalmente no intervalo de tempo corresponde a uma revolução da peça. [mm].

Velocidade de Avanço (v_f): é o produto do avanço pela rotação da ferramenta. Esta grandeza indica a velocidade de translação da ferramenta em função dos parâmetros tecnológicos v_c e f .

$$v_f = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} \quad [\text{mm/minuto}] \quad (3)$$

Profundidade de Corte (a_p): é a medida linear da profundidade ou largura de penetração que a ferramenta faz na peça em cada passe. No torneamento cilíndrico e de faceamento, fresamento e retificação, a_p é denominado profundidade de corte. Na furação em cheio a_p corresponde à metade do diâmetro da broca. Sendo “ D ” o diâmetro inicial e “ d ” o diâmetro final dados em mm. Conforme Fig. (2)

$$a_p = \frac{D - d}{2} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

Tempo de corte (t_c): este parâmetro resume a totalidade dos tempos ativos, pois ele representa o tempo em que os movimentos de corte e ou de avanço estão efetivamente ocorrendo.

$$t_c = \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot v_c} \quad [\text{min}] \quad (5)$$

Sendo l_f o percurso de avanço dado em mm.

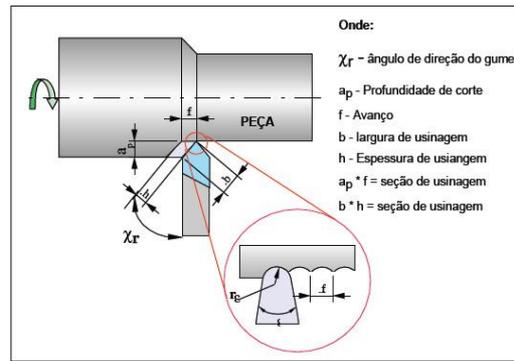


Figura 2. Superfícies, grandezas de corte e largura nominal de corte b no torneamento cilíndrico, conforme [10].

Força de corte (F_c): a força de corte pode ser expressa pela multiplicação da pressão específica de corte (K_s) que é uma constante relacionada com o material e a área da secção de corte (A). Força ilustrada na Fig. (3).

$$F_c = K_s \cdot A \quad [\text{N}] \quad (6)$$

Assumindo $\chi_r = 90^\circ$. A área calculada por: $A = b \cdot h = a_p \cdot f$

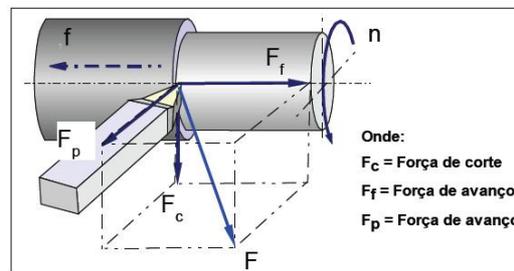


Figura 3. Forças de usinagem e suas diversas componentes na operação de torneamento, conforme [10].

Potência de corte (P_c): é a potência empregada pela máquina ferramenta para girar o eixo-árvore e executar o movimento de corte.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

Potência de avanço (P_f): é a potência empregada pela máquina ferramenta para girar o eixo-árvore e executar o movimento de avanço.

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60 \cdot 10^6} \quad [\text{kW}] \quad (8)$$

2.4. Intervalo de máxima eficiência

Em manufatura por usinagem, tem-se a partir dos trabalhos de Taylor ^[9], uma relação definida entre os custos operacionais e a velocidade no qual a usinagem em seu stricto sensu ocorre. De maneira análoga, também pode observada uma relação entre esta mesma velocidade e a produtividade da operação. Uma vez que existe uma dependência da velocidade, é um fato afirmar que existirá uma faixa no qual esta velocidade irá operar e não um valor pontual da mesma. Tal condição de mínimo e máximo para esta velocidade condiciona a formação de um intervalo de máxima eficiência para o processo de usinagem. Conforme Fig. (4)

A figura 4 ilustra a composição das curvas de custo total de usinagem por peça, C_p e do tempo total de confecção, t_t , em relação à velocidade de corte. Sendo assim, define-se neste momento o intervalo de máxima eficiência (IME), que é o intervalo compreendido entre as velocidades de mínimo custo (v_{co}) e de máxima produção (v_{mp}) ^[5].

É importante que os valores de velocidade de corte estejam realmente dentro deste intervalo. Se os valores de velocidade de corte estiverem logo abaixo da velocidade de mínimo custo, o custo da peça vai ser próximo do mínimo, mas o tempo de fabricação será alto. No outro extremo, se os valores de velocidade de corte estiverem logo acima da velocidade de máxima produção, os tempos de confecção da peça será muito próximo do mínimo, mas o custo será alto.

Deve se levar em conta que toda esta análise foi baseada na escolha prévia do avanço, profundidade de usinagem e da ferramenta. Estes parâmetros foram escolhidos baseados nas condições de contorno do processo, tais como: tipo de operação (desgaste ou acabamento), potência da máquina, rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação, etc. E para concluir, deve-se afirmar um princípio que nem sempre é bem, compreendido, que

resulta da análise da Fig. (4): O aumento da velocidade de corte nem sempre resulta no aumento da produção horária de peças e nem sempre diminuir a velocidade de corte significa diminuir os custos de produção.

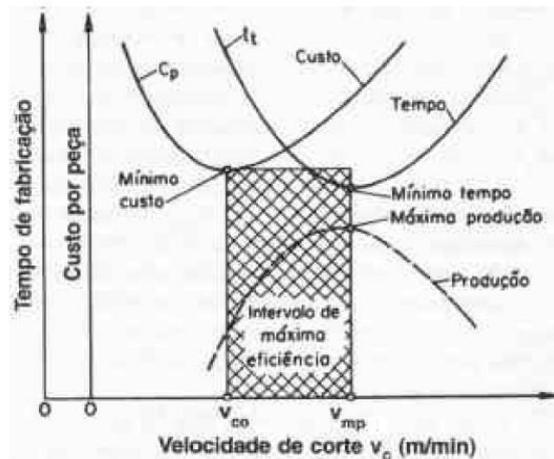


Figura 4. Intervalo de Máxima Eficiência, conforme [5]. v_{co} é a velocidade de corte de mínimo custo. v_{mp} é a velocidade de corte de máxima produção.

2.5. Modelagem da produtividade como função da velocidade de corte

O ciclo de usinagem pertence a um lote Z de peças e é constituído diretamente pelas seguintes fases:

1. Colocação e fixação da peça; 2. Aproximação e posicionamento da ferramenta; 3. Corte; 4. Afastamento da ferramenta; 5. Inspeção (quando necessário) e retirada da peça.

Além destas fases, fazem parte indiretamente no ciclo de usinagem:

Preparo de máquina; Remoção da ferramenta para sua substituição; Recolocação e ajuste da nova ferramenta.

A equação de Taylor é definida como:

$$T \cdot v_c^x = K \Rightarrow T = \frac{K}{v_c^x} \quad (9)$$

A equação do tempo total é definida como:

$$t_t = t_1 + \frac{L \cdot \pi \cdot d}{f \cdot v_c \cdot 1000} + \frac{L \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^x}{f \cdot v_c \cdot 1000 \cdot K} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) - \frac{t_{ft} + t_{fa}}{Z} \quad (10)$$

É intuitivo pensar que o tempo de corte diminui com o crescimento da velocidade de corte. O tempo t_1 é independente da velocidade de corte, o tempo t_2 é relativo à troca de ferramenta, ou seja, aumenta com a velocidade de corte.

O valor da velocidade de máxima produção é o ponto de mínimo da função do tempo total de corte t_t . Admitindo o avanço e a profundidade de corte constante, para se obter o mínimo desta função, faz-se:

$$dt_t = \frac{\partial t_t}{\partial f} df + \frac{\partial t_t}{\partial v_c} dv_c = 0 \quad (11)$$

Onde $f = \text{cte}$

Sendo assim a velocidade de máxima produção é dada por:

$$v_{mp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot (t_{ft} + t_{fa})}} \quad (12)$$

2.6. Modelagem dos custos de produção como função da velocidade de corte

Diversos são os custos envolvidos na produção de uma peça. No entanto para a análise dos custos com o fim de se obter a velocidade econômica de corte (velocidade de mínimo custo), só é necessário considerar os custos devidos ao processo propriamente dito, como custos das ferramentas e custos de ocupação das máquinas e dos operadores.

Assim o custo total da usinagem é definido como:

$$C_p = C_1 + \frac{L \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} \cdot \frac{C_2}{60} + \frac{L \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot v_c^{x-1} \cdot C_3 \quad (13)$$

Onde:

C_1 = custos independentes da velocidade de corte em R\$/lote.

C_2 = soma dos custos com mão de obra e com máquina em R\$/hora.

C_3 = custos relativos à ferramenta.

Que serão expressos por:

$$C_1 = \left(\frac{2 \cdot sal}{60} + \frac{C_m}{60 \cdot H} \right) \cdot \left(t_1 - \frac{t_{f1}}{Z} - \frac{t_{f2}}{Z} \right) \quad (14)$$

$$C_2 = C_H + C_m \quad (15)$$

$$C_3 = t_{f1} \cdot \frac{C_2}{60} + C_{Fi} \quad (16)$$

$$C_m = \frac{1}{H} \cdot \left[\left(v_{mi} - \frac{m}{M} \cdot v_{mi} \right) \cdot J + \frac{v_{mi}}{M} + E_m \cdot C_c + E_c + C_{mc} \right] \quad (17)$$

$$C_H = 2 \cdot sal + C_m + C_F + C_i \quad (18)$$

Analogamente a equação de tempo total de usinagem por peça, o custo de usinagem de uma peça C_p é composto por 3 parcelas. O termo C_1 é independente da velocidade de corte, o segundo termo diminui à medida que a velocidade de corte cresce e o terceiro termo aumenta à medida que a velocidade de corte aumenta, já que $(x-1)$ o expoente a que a velocidade de corte está elevada é sempre maior que zero.

O valor mínimo de C_p é obtido quando a derivada de C_p é igual a 0, assim:

$$dC_p = 0 = \frac{\partial C_p}{\partial v_c} \cdot dv_c + \frac{\partial C_p}{\partial f} \cdot df \quad (19)$$

Admitindo avanço (f) constante:

$$v_{co} = \sqrt[3]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (20)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Para a realização dos ensaios houve a necessidade de uma padronização dos corpos de prova, que foram usinados no mesmo torno, utilizando o mesmo sistema de fixação, esta padronização é necessária para que haja a diminuição de possíveis interferências que possam causar variabilidade nos resultados.

Condições operacionais dos ensaios realizados:

Máquina: Torno Gildemeister CTX 200 Serie 2 (5000 min⁻¹);

Corpo de prova: barra de DIN 100Cr6 dimensões Ø 67,78mm x 310mm, composição química na Tab. (1).

Fixação do corpo de prova: Fixado em castanha de topo mole com pressão de 20 Bar e utilização de contra ponto hidráulico.

Sistemas de refrigeração/lubrificação:

- Sistema de jorro abundante com emulsão semi-sintética, na concentração de 8 – 10%, com vazão de 0,3 L/min. O produto aplicado foi o Vasco Mil, da empresa Blaser Fluids.

- Bomba pulsante de mínima quantidade de lubrificante utilizando vazão de 92,1 ml/h do fluido vegetal BioG 830 da empresa Microquímica.

Meio de medição: Microscópio ótico Bx60M com ampliações de 20, 50 100, 200 e 500X.

Tabela 1. Propriedades químicas médias para o aço DIN 100Cr6 conforme a referência [2].

Elemento Químico	Composição em massa (%)
Carbono (C)	0,98
Manganês (Mn)	0,35
Fósforo (P)	0,025
Estanho (S)	0,015
Silício (Si)	0,25
Cromo (Cr)	1.45

3.2. Metodologia experimental

Os experimentos foram divididos em 4 diferentes velocidades de corte. Duas foram determinadas pelo fabricante da ferramenta de corte (275 e 425 m/min). As demais velocidades foram fixadas para dividir a faixa de velocidades em intervalos iguais.

O critério de fim de vida foi o desgaste v_b , medido através de microscópio ótico. O valor de v_b considerado como fim de vida foi 0,8mm. Os desgastes foram fotografados com ampliação condizente com a nitidez e clareza necessária para interpretação do tipo de desgaste. Em seguida, com o auxílio de um programa de tratamento de imagens, a escala da fotografia foi convertida em pixels, possibilitando a mensuração do v_b .

Tabela 2. Procedimento experimental executado.

Experimento	v_c [m/min]	f [mm/rev]	Material	Ferramenta	a_p [mm]	Refrigeração/ Lubrificação
1	425	0,25	Aço 100Cr6	WNMG080408- PM Classe 4225 Substrato de metal duro multi camadas Al ₂ O ₃ + TiCN (CVD)	1,5	Abundante
2						MQL
3						Seco
4	375					Abundante
5						MQL
6						Seco
7	325					Abundante
8						MQL
9						Seco
10	275					Abundante
11						MQL
12						Seco

4. RESULTADOS

A figura 5 apresenta a evolução do desgaste da superfície de folga (v_b) para ensaios com lubrificação/refrigeração com jorro abundante, MQL e sem lubrificação/refrigeração para uma mesma velocidade de corte.

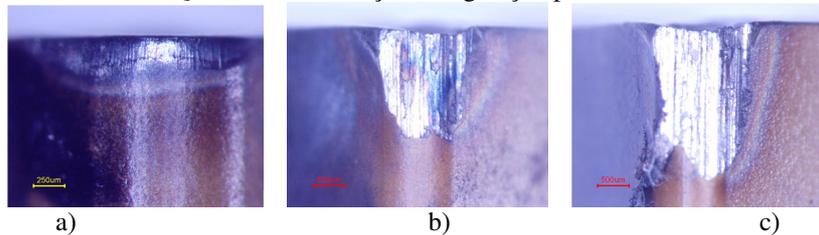


Figura 5. Evolução do desgaste para $v_c = 425$ m/min a) com jorro de fluido abundante b) MQL c) sem fluido

A tabela 3 a seguir apresenta o valor do desgaste v_b médio obtido para os ensaios realizados conforme item 3.2

Tabela 3. Cálculo do desgaste V_b real para cada ensaio.

Ensaio	Descrição	Escala foto (microns)	Escala foto medida (mm)	V_b foto medida (mm)	V_b real (mm)
1	$v_c=425$; Com fluido	250	27,18	34,81	0,32
2	$v_c=425$; MQL	500	29,57	102,06	1,73
3	$v_c=425$; Sem fluido	500	30,04	142,59	2,37
4	$v_c=375$; Com fluido	1000	27,23	35,3	1,30
5	$v_c=375$; MQL	1000	26,71	80,12	3,00
6	$v_c=375$; Sem fluido	1000	25,44	63,6	2,50
7	$v_c=325$; Com fluido	1000	27,18	36,24	1,33
8	$v_c=325$; MQL	1000	28,74	47,21	1,64
9	$v_c=325$; Sem fluido	1000	29,76	23,6	0,79
10	$v_c=275$; Com fluido	250	28,61	43,87	0,38
11	$v_c=275$; MQL	500	29,09	61,52	1,06
12	$v_c=275$; Sem fluido	500	29,09	64,38	1,11

A partir dos valores do tempo de vida, em minutos para cada ensaio, foi possível calcular os parâmetros x e K , utilizando a equação de Taylor como função interpoladora para cada condição de lubrificação/refrigeração.

Tabela 4. Cálculo do coeficiente K e do expoente x para os três sistemas.

Sistema	V_{c1}	T1	V_{c2}	T2	x	K
Jorro Abundante	275	20,07	425	3,66	3,91	6,97E+10
MQL	275	12,90	425	2,39	3,88	3,70E+10
Sem fluido	275	10,41	425	2,51	3,27	9,88E+08
-	[m/min]	[min]	[m/min]	[min]	-	-

Foi possível calcular as velocidades de corte de máxima produtividade, tomando a parcela do tempo de troca e reafiação da ferramenta (t_{ft} e t_{fa}) como constantes, igual a 3 min. A Tab. (5) apresenta o valor da v_{mp} para as três condições de lubrificação/refrigeração utilizando os valores de x e K conforme a Tab. (4): Para o cálculo da velocidade de corte de mínimo custo dada fez-se necessário o computo de alguns valores para definir as parcelas que compõem o custo C_2 e C_3 . A Tab. (8) apresenta os valores médios obtidos no mercado.

Tabela 5. Velocidade de corte de máxima produtividade.

<i>Condição de lubrificação / refrigeração</i>	<i>Velocidade de máxima produtividade</i>
Jorro abundante	340,30 m/min
MQL	305,00 m/min
Sem fluido	312,74 m/min

Tabela 6. Compuo de valores para cálculo de C_2 e C_3 .

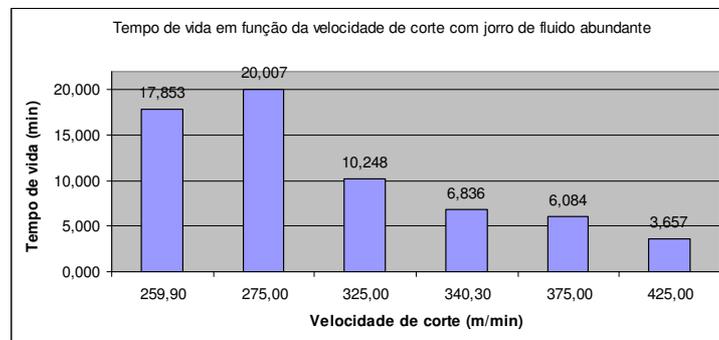
<i>Item</i>	<i>Valor</i>
H – horas trabalhadas por ano	4224 horas
v_{mi} – valor inicial da máquina	R\$ 250.000,00
m – idade da máquina	3 anos
M – idade da máquina	25 anos
J – juros anuais	12 % a.a.
E_m – espaço ocupado pela máquina	10 m ²
C_c – custo do espaço ocupado (impostos)	R\$ 200,00
E_c – energia consumida por ano	R\$ 15.000,00
C_{mc} – custo anual de manutenção	R\$ 15.000,00
sal – salário do operador	R\$ 7,5/hora
C_i – custos administrativos	R\$0,05/peça
C_F – custo de ferramenta por peça	R\$0,013/peça
C_{Ft} – custo da ferramenta por reafiação (por aresta)	R\$ 5,2/reafiação

Com estes valores é possível calcular o custo com máquina por hora $C_m = R\$ 16,19$ e o custo de uma hora de máquina $C_H = R\$ 31,26$. Calcula-se a soma dos custos com mão de obra e com máquina $C_2 = R\$ 47,45$ para uma hora de máquina disponibilizada e os custos com ferramenta $C_3 = R\$ 6,71$. A Tab. (7) apresenta o valor de v_{co} :

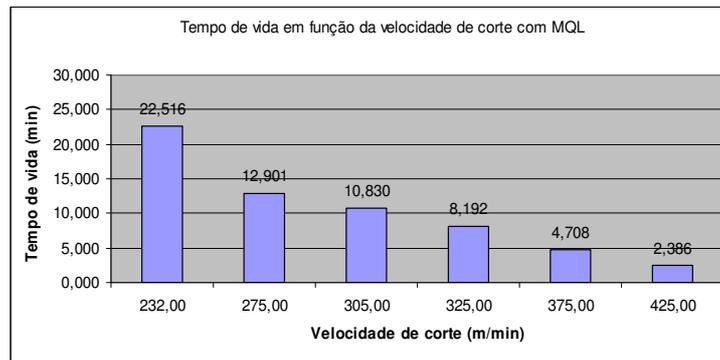
Tabela 7. Velocidade de corte de mínimo custo.

<i>Condição de lubrificação / refrigeração</i>	<i>Velocidade de mínimo custo</i>
Jorro abundante	259,90 m/min
MQL	232,00 m/min
Sem fluido	226,85 m/min

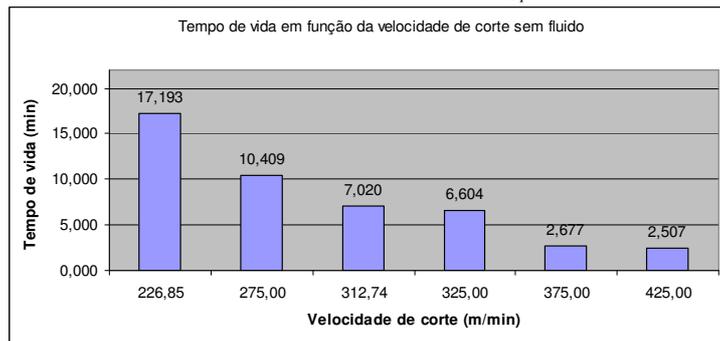
Os gráficos a seguir apresentam o tempo de vida da ferramenta em minutos em função da velocidade de corte em m/min para os três sistemas de lubrificação/ refrigeração, utilizando v_{co} e v_{mp} .



a) jorro de fluido abundante. Com $v_{co} = 259,90$ m/min e $v_{mp} = 340,30$ m/min;



b) sistema MQL. Com $v_{co} = 232,00$ m/min e $v_{mp} = 305,00$ m/min;



c) usinagem sem sistema de lubrificação/refrigeração. Com $v_{co} = 226,85$ m/min.

Figura 6 a); b); c). Tempo de vida da ferramenta em função da velocidade de corte para os três sistemas:

5. Análise econômica

5.1. Análise econômica comparativa entre os sistemas de lubrificação/refrigeração

Assume-se um lote de $Z = 4000$ peças. Um custo com ferramenta para produção do lote de $C_{an} = R\$52,00$. Este custo substituirá o custo com reafiação, e o mesmo é introduzido na equação de C_3 . Adotando como parâmetros comuns o tempo de posicionamento, fixação, inspeção e retirada da peça $t_s = 15$ min, tempo de preparação da máquina $t_p = 10$ min, comprimento usinado $L = 280$ mm, diâmetro da peça $d = 67,8$ mm, avanço $f = 0,25$ mm/rev, x e K pertinentes a cada velocidade. Sendo os custos improdutivos $C_1 = R\$ 225,03$ para os três sistemas de lubrificação/refrigeração. O custo C_2 freqüenciado para uma hora.

- **Usinagem utilizando jorro de fluido abundante:** Deve-se considerar: o C_{troca} [R\$/ano] custo de troca do fluido e C_{rep} [R\$/ano] custo de reposição adicionados ao custo de manutenção da máquina (C_{mc}). Independentes da velocidade.

$$C_{troca} = R\$ 681,25.$$

$$C_{rep} = R\$ 332,55.$$

Logo para $v_{co} = 259,9$ m/min tem-se que o custo de usinagem $C_p = R\$ 229,36$ por lote e para $v_{mp} = 340,3$ m/min tem-se que o custo de usinagem $C_p = R\$ 230,03$ por lote.

- **Usinagem utilizando sistema MQL**

No computo do custo de usinagem C_p é necessário adicionar o custo de óleo consumido (C_{cons}) e o custo do investimento e manutenção do sistema de exaustão (C_{inv}) e (C_{man}).

Para $v_{co} = 232,0$ m/min tem-se que $C_{cons} = R\$ 6,59$ e para $v_{mp} = 305$ m/min tem-se $C_{cons} = R\$ 3,17$.

Um sistema de exaustão industrial NON4 da empresa Nederman & Co. com sistema de filtragem para óleo e posteriormente (em série) um sistema de retenção de fumos específico para usinagem tem-se $C_{inv} = R\$23.000,00$ e um $C_{man} = R\$4.666,67$ /ano, independentes da velocidade.

Logo para $v_{co} = 232$ m/min tem-se que o custo de usinagem $C_p = R\$ 231,18$ por lote e para $v_{mp} = 305$ m/min tem-se que o custo de usinagem $C_p = R\$ 231,74$ por lote.

- **Usinagem sem fluido lubrificante/refrigerante**

Este é o mais simples dos três sistemas de lubrificação/refrigeração, pois não necessita de acréscimo de nenhum custo específico na equação que define C_p .

Logo para $v_{co} = 226,85$ m/min tem-se que o custo de usinagem $C_p = R\$ 230,57$ por lote e para $v_{mp} = 312,7$ m/min tem-se que $C_p = R\$ 231,84$ por lote.

5.2. Comparativo das velocidades

Tendo em mãos os custos calculados no item 5.1 é possível gerar uma tabela comparativa dos custos adicionais calculados para cada um dos sistemas de lubrificação/refrigeração Tab. (8).

Tabela 8. Custos adicionais para cada sistema de lubrificação/refrigeração.

Item	Jorro abundante		MQL		Sem fluido	
	v_{co}	v_{mp}	v_{co}	v_{mp}	v_{co}	v_{mp}
v_c [m/min]	259,90	340,30	232,00	305,00	276,85	312,74
β [horas]	2,95	1,14	3,75	1,81	2,87	1,17
C_1	225,03	225,03	225,03	225,03	225,03	225,03
C_2	142,61	54,61	192,25	92,50	135,97	55,52
C_3	59,13	54,73	68,21	59,80	58,79	54,78
C_{troca}	681,25	681,25	-	-	-	-
C_{rep}	332,55	332,55	-	-	-	-
C_{cons}	-	-	6,59	3,17	-	-
C_{inv}	-	-	23.000,00	23.000,00	-	-
C_{man}	-	-	4.666,67	4.666,67	-	-
C_{mc}	16.013,80	16.013,80	19.666,67	19.666,67	15.000,00	15.000,00
C_p	229,36	230,03	231,18	231,74	230,57	231,84

Sendo possível também traçar o gráfico simplificado do custo total de usinagem por peça em função da velocidade de corte representado na Fig. (9).

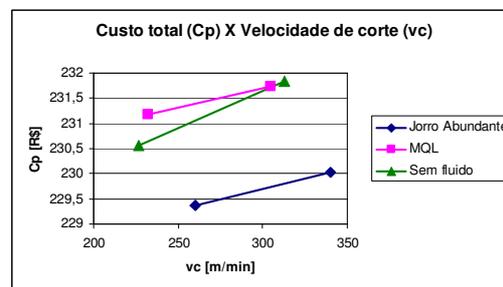


Figura 7. Custo de usinagem por peça C_p em função da velocidade de corte para os três sistemas de lubrificação/refrigeração. Para v_{co} e v_{mp} .

6. Discussões e conclusões

A figura (8a), (8b) e (8c) demonstram que a tendência de manipulação de v_c , em ordem crescente, representa uma queda no tempo de vida, conforme esperado e visto em literatura. Exceto pelo tempo de vida proporcionado por $v_c = 275$ m/min com fluido abundante, todos os demais pontos respeitam o comportamento inversamente proporcional da curva de tempo de vida (t) versus v_c . Uma explicação para este desvio de comportamento está associada ao valor de tempo obtido com a velocidade de 275 m/min. É relevante considerar algumas condições metalúrgicas como “ponta de barra” e “casca de laminação” para justificar a distorção deste valor. Dos ensaios, o sistema com jorro de fluido abundante proporcionou maior vida em todas as velocidades. O corte sem fluido acima de 375 m/min possui uma baixa expectativa de vida, pois estas velocidades estão acima da faixa usual de mercado.

A tabela 6 foi compilada com informações teóricas que valem de maneira idêntica para a análise de custo para os três sistemas de lubrificação/refrigeração.

Para uma análise mais completa dos custos envolvidos no processo de usinagem, alguns termos referentes aos custos foram incorporados à equação do custo total de usinagem C_p . Todo o equacionamento foi feito de modo a obter o custo total para um lote de $Z = 4000$ peças. A Tab. (8) compila os custos descritos e mensurados no item 5.1.

Pode se verificar que os custos independentes da velocidade de corte C_1 são exatamente iguais para os três sistemas de lubrificação/refrigeração. Já o custo com mão de obra e maquinário (C_2) é um custo que tem uma variação sensível com a mudança de sistema de lubrificação. O fator mais relevante para esta variação é a multiplicação deste custo, que originalmente é dado em R\$/hora, por β que é o tempo, para a fabricação do lote, assim obtendo C_p [R\$]. Outra observação importante é a pouca variação nos valores de C_3 , custo com ferramenta. Esta variação não é relacionada custo com ferramentas C_{an} , uma vez que o número de arestas para a produção do lote é fixado, esta variação é consequência do tempo de corte que está implícito no cálculo de C_3 por meio de C_2 .

Os demais custos adicionais são específicos de cada sistema de lubrificação e com exceção do custo com óleo consumido por MQL (C_{cons}), os custos se são constantes com as mudanças de velocidade.

Do gráfico da Fig. (7) pode se verificar o comportamento das curvas de custo (C_p) no intervalo de máxima eficiência (IME) para cada sistema de lubrificação/refrigeração de forma bem simplificada.

O sistema de lubrificação/refrigeração via jorro abundante é o sistema que representa, na velocidade de mínimo custo (v_{co}), o menor custo, $C_p = R\$ 229,36$ para $v_{co} = 259,90$ m/min, mantendo este padrão de menor custo até o outro extremo do IME, com $C_p = R\$ 230,03$ para $v_{mp} = 340,3$ m/min. O sistema MQL apresenta o maior custo na velocidade de mínimo custo para $v_{co} = 232,0$ m/min com $C_p = R\$ 231,18$, mantendo este padrão de maior custo até o outro extremo do IME, com $C_p = R\$ 231,74$ para $v_{mp} = 305,00$ m/min. Apesar de o sistema MQL necessitar de um

investimento inicial na máquina, este não é o fator mais relevante para justificar este maior custo. Analisando a Tab. (8) pode se verificar que em v_{co} o tempo de uso da máquina é o maior quando comparado aos outros sistemas, o mesmo comportamento acontece com v_{mp} . Este maior tempo de utilização resulta nos maiores custos C_2 e assim resultando nos maiores custos C_p . O sistema sem fluido é o sistema que representa, na velocidade de mínimo custo (v_{co}), o segundo menor custo, $C_p = R\$ 230,57$ para $v_{co} = 276,85$ m/min, já no outro extremo do IME tem se $C_p = R\$ 231,84$ para $v_{mp} = 312,70$ m/min. Apesar de este sistema apresentar o maior custo $C_p (v_{mp}) = R\$ 231,84$ global, a velocidade a qual os dois custos (MQL e seco) se igualam é $v_c = 307,07$ m/min, portanto estando fora do IME do sistema MQL. Assim levando em consideração que o IME do sistema MQL tem sua velocidade mais alta em $v_{mp} = 305,00$ m/min, o custo C_p do sistema sem fluido até esta velocidade de corte mantém se como sendo o segundo menor.

A ausência de qualquer sistema de lubrificação/refrigeração, durante a usinagem, causa uma degradação muito acentuada da ferramenta, o que torna as velocidades de v_{co} e v_{mp} menores, resultando em um maior valor de C_p .

A partir das análises relativas aos custos, conclui se que para velocidades dentro dos intervalos de máxima eficiência (IME), o custo total da usinagem C_p , descrito na Tab. (8), é quantitativamente igual para os três sistemas de lubrificação/refrigeração. No entanto, a partir de uma análise qualitativa do gráfico da Fig. (7), levando em consideração a velocidade de máxima produtividade, verifica-se que para o mesmo custo o sistema de jorro abundante é 3% mais rápido que o sistema sem fluido para produção de 4000 peças e 37% mais rápido que o sistema MQL para a produção do mesmo lote. Logo a aplicação do sistema de jorro abundante além de apresentar o menor custo total de usinagem C_p para as condições determinadas nas Tab. (6) e (8) tendo seu IME limitado pelas velocidades: $v_{co} = 259,9$ m/min e $v_{mp} = 340,3$ m/min, agrega ao processo um ganho de produtividade, sendo o mais rápido para custos quantitativamente iguais. Sendo portanto o sistema de jorro abundante o sistema economicamente mais interessante para este tipo de usinagem.

7. Referências bibliográficas

- [1] – http://www.automotivebusiness.com.br/noticia_det.asp?id_noticia=311 publicada 12/11/2008 – visitado em 02/06/2009
- [2] - http://www.gerdau.com.br/gerdauacosespeciais//port/produtos/construcao_mecanica/pdfs/20.pdf - visitado em 02/06/2009
- [3] - <http://www.fei.edu.br/mecanica/me733/Me733a/ApTorneamento01.pdf> - visitado em 07/06/2009
- [4] - http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/3351 visitado em 07/06/2009
- [5] – DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., “Tecnologia da usinagem dos materiais” Artliber editora 2000, 2ª edição.
- [6] – CHIAVERINI, V., “Tecnologia Mecânica – Processos de fabricação e tratamento” editora McGraw-Hill 1986 volume 3, 2ª edição.
- [7] – COSTA, É. S., “Apostila de Processo de Usinagem”, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, 2006.
- [8] – OLIVEIRA, J.F.G. DE, ALVES, S. M. “Novos Fluidos de corte adequado ao desempenho mecânico da retificadora e ao meio ambiente”. Revista Máquinas e Metais, p. 28 - 43, abril 2001.
- [9] – TAYLOR, F.W., “On the art of cutting metals”. Transactions of ASME, vol. 28 (1907) 31-58
- [10] – STOETERAU, R. L. “Fundamentos da usinagem – Geometria da ferramenta monocortante”, Florianópolis, 2007

8. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

Economics Analysis of usinability of automotive steel DIN 100Cr6

Enio Yamamotu Ferreira Soares

enio.soares@gmail.com; enio_soares@hotmail.com

Abstract. The present work has to aim analyses the process of turning of automotive steel DIN 100Cr6, SAE 52100 or ABNT 52100 in three different conditions of lubricating/cooling, related as: abundant outflow of fluid, Minimal Lubricating Quantity (MQL) and machining without fluids (dry machining). This study use only one selection of cutting tool to determinates the Taylor's coefficient, together of the costs involved on the machining of this automotive steel, make possible to define the maximum efficient interval (IME), for each condition of lubricating/cooling. This condition of best performance in machining is quantified by minimum cost cutting velocity (v_{co}) and the maximum productive cutting velocity (v_{mp}) defining the maximum efficient interval on the process. Over the velocities cited, other costs like: cutting tools, fluids, auxiliary equipments, treatment and discard of leavings, makes the scenery that determinate the total cost on machining C_p and define the economic best condition of turning operation for this automotive steel.

Keywords: Turning, economic conditions of machining, automotive steel, Taylor's equation, minimal lubricating quantity (MQL)