



**ANÁLISE ECONÔMICA DA INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NO
TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DO AÇO INOX 304L**

SÁVIO BORBA DE MAGALHÃES

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRA MECÂNICA.

Aprovado por:

Prof. José Luís Lopes da Silveira

Prof. Albino José Kalab Leiróz

Prof.^a Anna Carla Monteiro de Araújo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 2013

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivo	1
1.2.	Motivação.....	2
1.3.	Estrutura do trabalho.....	2
2.	Embasamento Teórico.....	3
2.1.	Torneamento	3
2.2.	Grandezas físicas no torneamento.....	3
2.2.1.	Grandezas de corte.....	4
2.2.2.	Velocidades	4
2.2.3.	Conceitos auxiliares	5
2.3.	Ferramenta de usinagem	5
2.4.	Desgastes e avarias da ferramenta.....	5
2.5.	Vida da ferramenta.....	8
2.6.	Fluidos de corte	9
2.6.1.	Fluidos de corte e suas funções	9
2.6.2.	Tipos de fluidos de corte	10
2.6.3.	Manutenção dos fluidos de corte	11
2.7.	Condições econômicas de usinagem.....	12
2.7.1.	Tempos de usinagem	13
2.7.2.	Velocidade de corte para máxima produção.....	14
2.7.3.	Custos de produção	16
2.7.4.	Velocidade econômica de corte	18
2.7.5.	Intervalo de máxima eficiência	21
3.	Condições econômicas de usinagem na presença do fluido de corte	22
3.1.	Tempos de usinagem	22
3.2.	Velocidade de corte para máxima produção.....	26

3.3.	Custos de produção	28
3.4.	Velocidade econômica de corte	30
4.	Influência do fluido de corte nas condições econômicas de usinagem do aço inox 304L.....	32
4.1.	Parâmetros de corte, tempos e custos utilizados.....	32
4.2.	Velocidade de corte, vida da ferramenta, tempo e custo de fabricação por peça para máxima produção	34
4.3.	Velocidade de corte, vida da ferramenta, tempo e custo de fabricação por peça para mínimo custo	40
5.	Considerações finais.....	46
6.	Bibliografia	48

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar a influência do fluido de corte nas condições econômicas de usinagem do torneamento cilíndrico externo do aço inox 304L. Para isso, foi feita uma comparação do número de peças produzidas e dos custos na presença e na ausência do fluido de corte nesta operação.

Para que tal comparação fosse feita, foi necessário adaptar as equações já existentes de tempo e custo total de usinagem por peça para o caso onde há presença do fluido. Por consequência disto, foram modificadas também as equações de velocidade de corte e vida da ferramenta para os casos de máxima produção e mínimo custo.

Por fim, a partir das equações das condições econômicas de usinagem com e sem fluido de corte, foi demonstrada a diferença entre a usinagem com fluido de corte e a seco para torneamentos em geral e para o torneamento do aço inox 304L.

1. Introdução

Usinagem é o processo mecânico de fabricação caracterizado pela remoção de material, ou seja, um material bruto é submetido à ação de uma ferramenta que remove parte de seu material para que se adeque a geometria desejada.

As operações de usinagem podem ser realizadas basicamente de duas formas: a seco ou na presença de fluido de corte. O fluido de corte é amplamente utilizado nas indústrias com o objetivo de refrigerar (diminuir a temperatura na região do corte), lubrificar (reduzir o atrito entre a ferramenta e a superfície de corte), proteger contra oxidação e limpar a região onde ocorre a usinagem. Pelo fato de na usinagem haver grande atrito entre peça e ferramenta e ser necessária grande quantidade de energia para deformar o material (o que gera altas temperaturas) a aplicação de fluido de corte torna-se, em alguns casos, de grande importância.

Por outro lado, se não for manuseado e tratado corretamente, além de altos custos, o fluido de corte pode ser a causa de problemas que vão desde o processo de fabricação até riscos à saúde dos operadores e ao meio ambiente. Portanto, antes de optar pela utilização do fluido de corte deve-se estudar se haverá benefícios ao processo e como evitar os riscos por ele causados.

Trabalhos anteriores estudaram o comportamento da ferramenta de corte na operação de torneamento do aço inox 304L nas condições com fluido de corte (Laufer, 2011; Miranda, 2011) e sem o fluido de corte (Chrispim, 2011; Kunze, 2010). Alguns valores obtidos nestes trabalhos (como os coeficientes x e K da equação de Taylor) serão utilizados para que seja feita uma análise econômica da influência do fluido de corte na usinagem do aço inox 304L.

1.1. Objetivo

Este projeto tem como objetivo verificar se há algum benefício econômico gerado pelo emprego do fluido de corte no torneamento cilíndrico externo do aço inox 304L, evidenciando também se é, ou não, economicamente viável utilizá-lo no processo.

Para que os resultados obtidos sejam de fácil compreensão e comparação com a usinagem a seco, será feita uma análise dos custos e tempos totais de confecção por peça para ambos os casos.

1.2. Motivação

Para manter-se competitivo na indústria atualmente, é necessário oferecer mercadorias de alta qualidade e a preços acessíveis. Uma das formas de manter o padrão de qualidade alto sem afetar o preço final do produto tem sido enxugar custos referentes ao processo produtivo. Como se não bastasse, os órgãos ambientais estão cada vez mais atuantes e as leis de proteção ao meio ambiente muito mais severas, o que dificulta ainda mais a redução do preço final das mercadorias.

Portanto, torna-se de extrema importância estudar possíveis formas de produzir mais rapidamente e com custos cada vez mais baixos. Claro que tudo isso deve ser feito de forma sustentável e sem que o meio ambiente pague esta conta.

No caso da usinagem, uma das possíveis formas de aumento da produtividade e redução de custos pode ser a utilização do fluido de corte. Porém, como já foi dito anteriormente, o fluido de corte, se usado de forma inadequada, pode não apenas elevar os custos, mas também ter impacto no meio ambiente.

Por tudo que foi exposto, pode-se concluir que um estudo para verificar se há ou não ganhos econômicos e produtivos com a utilização do fluido de corte é indispensável em qualquer situação de usinagem em série.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos (sem contar a bibliografia). O primeiro apresenta uma introdução sobre o tema descrito, bem como o objetivo e a motivação do estudo.

No segundo capítulo é dado todo o embasamento teórico necessário à compreensão do trabalho, sendo o principal foco a apresentação das condições econômicas de usinagem.

O terceiro capítulo apresenta a dedução de todas as equações das condições econômicas de usinagem na presença de fluido de corte que foram desenvolvidas para que fosse possível realizar a análise proposta.

O quarto capítulo apresenta como o fluido de corte é capaz de influenciar as condições econômicas de usinagem no torneamento do aço inox 304L.

Por fim, no quinto capítulo, é feita uma síntese das principais conclusões obtidas com a realização do estudo.

2. Embasamento Teórico

2.1. Torneamento

Torneamento é uma operação de usinagem que tem como objeto transformar a matéria prima (tarugo) ou uma peça bruta em uma peça cilíndrica, cônicas ou com qualquer outra geometria de revolução com dimensões e acabamento bem definidos e, sobretudo, precisos. Para tal, parte do material do sólido é removido de sua periferia pela combinação de dois movimentos: o movimento de rotação da peça em torno de seu eixo e o movimento de translação da ferramenta no plano deste mesmo eixo (ver Figura 1).

As principais operações que podem ser feitas por meio do torneamento são: torneamento externo e interno, sangramento, faceamento, rosqueamento e recartilhamento. Dentre as operações citadas acima, a que será foco deste estudo será o torneamento externo, mais precisamente o torneamento cilíndrico externo.

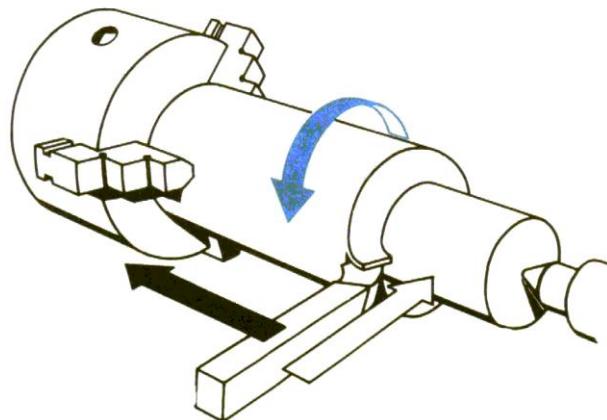


Figura 1 - Torneamento cilindro externo

2.2. Grandezas físicas no torneamento

Algumas grandezas físicas, que interferem diretamente na produtividade, na peça final e nos custos da usinagem devem ser conhecidas para que se possa entender e avaliar os resultados obtidos. São elas:

2.2.1. Grandezas de corte

As grandezas de corte são aquelas que devem ser ajustadas na máquina para que o cavaco seja removido. Para uma boa escolha destes valores, devem ser levados em consideração fatores como o material a ser usinado, a ferramenta utilizada, o grau de acabamento desejado, etc. Dentre essas grandezas, as mais importantes para o entendimento do trabalho são:

- **Avanço (f):** é o espaço percorrido pela ferramenta em cada rotação da peça, usualmente expresso em [mm/rot].
- **Profundidade de corte (a_p):** A profundidade de corte é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, expressa em [mm].

2.2.2. Velocidades

- **Velocidade de corte (V_c):** Normalmente indicada em [m/min], é a velocidade tangencial instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte (Ferraresi, 1970). No torneamento, pode ser calculada da seguinte maneira:

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

Sendo,

V_c = Velocidade de corte (m/min);

d = Diâmetro da peça (mm);

n = Rotação (rpm).

- **Velocidade de avanço (V_f):** Expressa em [mm/min], a velocidade de avanço é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e o sentido de avanço. Seu valor é calculado da seguinte forma:

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

Onde,

V_f = Velocidade de avanço (mm/min);

f = Avanço (mm/rot).

2.2.3. Conceitos auxiliares

Para que tudo que será exposto seja corretamente compreendido, será necessário ainda a introdução de um conceito auxiliar:

- **Percorso de avanço (l_f):** É o espaço que a ferramenta percorre durante a usinagem da peça, na direção em que se dá o avanço. Este percurso é medido em [mm].

2.3. Ferramenta de usinagem

Em um processo de usinagem, a ferramenta de corte é responsável pela retirada de material da peça até que esta obtenha a geometria e as dimensões de projeto. Para realizar tal função, as ferramentas são fabricadas em diferentes geometrias, materiais e revestimentos, que podem variar de acordo com diversos fatores, como o processo de usinagem, o material a ser usinado, os parâmetros de corte utilizados, a utilização ou não do fluido de corte, etc.

Nos trabalhos realizados anteriormente (e que serão utilizados como base de dados para a realização deste trabalho) foram utilizadas duas ferramentas diferentes. Dois deles utilizaram o inserto de metal duro WNMG060404-MF2025 da Sandvik (Chrissim, 2011; Miranda, 2011) e os outros dois utilizaram o inserto de metal duro Lamina WNMP 060404 NN (Kunze, 2010; Laufer, 2011), ambos com geometria trigonal.

2.4. Desgastes e avarias da ferramenta

Durante o processo de usinagem a ferramenta deve ser frequentemente substituída ou reafiada para que continue cumprindo seu papel de forma satisfatória. Os dois principais fatores determinantes na substituição de uma ferramenta são a avaria e o desgaste.

De acordo com Ferraresi (1970), considera-se como avarias as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas, que ocorrem no gume cortante durante a usinagem.

Tomando certos cuidados, como a escolha correta do material da ferramenta e suas propriedades e a utilização dos parâmetros de corte adequados à usinagem que será realizada, as avarias podem ser controladas e até evitadas. Porém, por mais que as avarias possam ser evitadas, a ferramenta nunca estará livre do desgaste, sendo este o único responsável pelas substituições da ferramenta no presente estudo.

O desgaste é, portanto, um fator que limita o tempo de utilização de uma ferramenta de corte, podendo tornar o processo de usinagem muito caro e pouco produtivo, caso não seja devidamente controlado.

Os principais desgastes sofridos pelas ferramentas de corte são:

- **Desgaste de flanco (VB):** Também conhecido como desgaste frontal, o desgaste de flanco é o mais comum entre os tipos de desgaste e ocorre em todo processo de usinagem. Acontece na superfície de folga e é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. Normalmente este tipo de desgaste é utilizado na determinação de critérios de fim de vida da ferramenta, já que está intimamente ligado com a deterioração do acabamento superficial da peça.

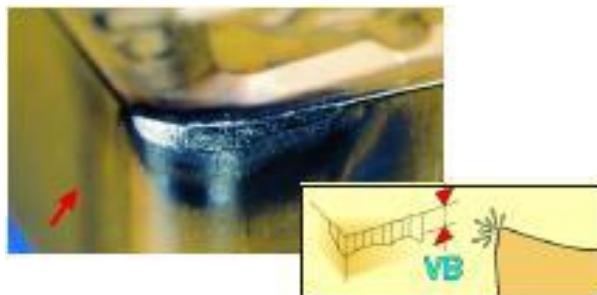


Figura 2 - Desgaste de flanco real e esquemático (Catálogo Fabricante Sandvik)

- **Desgaste de cratera:** A cratera se forma na superfície de saída devido ao escorregamento do cavaco sobre a ferramenta e é definida pela profundidade de cratera C_p (ou K_T), largura de cratera C_L e pela distância do centro da cratera à aresta de corte C_d (SILVEIRA, 2007).

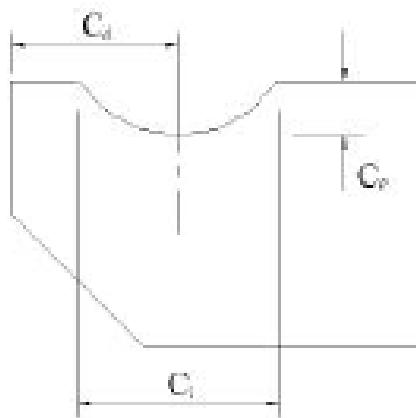


Figura 3 – Representação do desgaste de cratera (adaptado SILVEIRA, J. L. L., “Notas de aula de Usinagem”, 2007)

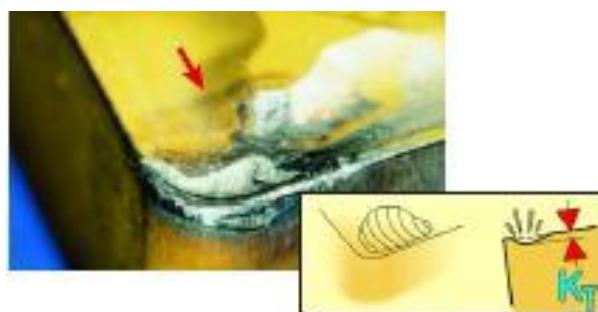


Figura 4 - Desgaste de cratera real e esquemático (Catálogo Fabricante Sandvik)

- **Desgaste de entalhe:** Desgaste da pastilha caracterizado por dano excessivo localizado nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, na linha da profundidade de corte. Causado pela adesão (solda por pressão de cavacos) e uma deformação na superfície endurecida (Miranda, 2011).

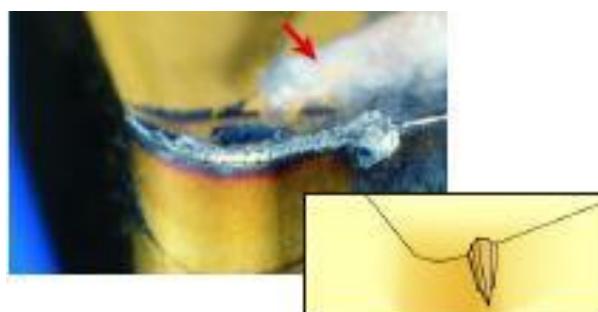


Figura 5 - Desgaste de entalhe real e esquemático (Catálogo Fabricante Sandvik)

2.5. Vida da ferramenta

O tempo que uma ferramenta é capaz de trabalhar efetivamente (deduzindo os tempos passivos), sem perder sua capacidade de corte, é denominado “tempo de vida da ferramenta”.

Os critérios utilizados para prever quando haverá a perda da capacidade de corte de uma ferramenta (e com isso prever seu tempo de vida) geralmente estão vinculados a um grau de desgaste que a ferramenta pode sofrer antes que sua eficiência seja comprometida.

A norma ISO 3685 estabelece parâmetros para quantificar esses desgastes e prevê que uma ferramenta de metal duro deve ser substituída quando os seguintes níveis de desgastes sejam alcançados (KUNZE, 2010):

Largura média de desgaste de flanco, $\text{VB}_m = 0,3 \text{ mm}$;

Largura máxima de desgaste de flanco, $\text{VB}_{\max} = 0,6 \text{ mm}$;

Profundidade de cratera, $\text{KT (ou Cp)} = 0,06 + 0,3 \times (\text{avanço})$;

Largura entre flanco e início da cratera, $\text{KF} = 0,02 \text{ mm}$.

Sabe-se que o grau de desgaste sofrido por uma ferramenta de corte depende das condições de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, etc.). Porém, velocidade de corte é o parâmetro que tem maior influência no desgaste e, por conta disso, a curva de vida de uma ferramenta é expressa em termos desse parâmetro.

Para que a curva de vida da ferramenta (Vida T [min] x Velocidade de corte V_c [m/min]) possa ser construída, há a necessidade de primeiramente construir diversos gráficos auxiliares que mostram os desgastes sofridos pela ferramenta em função do tempo para diferentes velocidades de corte, trabalhando em condições de usinagem pré-fixadas. De posse desses gráficos auxiliares, é possível criar uma curva T- V_c que nos dá a vida da ferramenta para diversas velocidades de corte, em função de um certo nível de desgaste limite que é previamente estabelecido.

As Figuras 6-a e 6-b mostram um exemplo de uma curva de desgaste sofrido por uma ferramenta de usinagem em função do tempo, para diferentes velocidades de corte e a curva de vida da ferramenta para o desgaste $I_L = 0,8 \text{ mm}$, obtida por meio das curvas de desgaste, respectivamente.

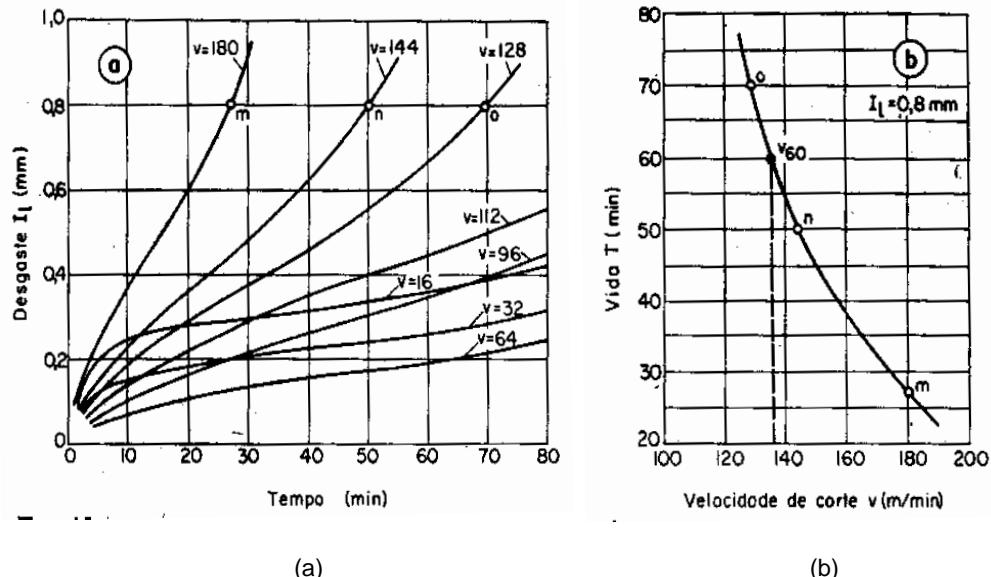


Figura 6 – Determinação da curva de vida de uma ferramenta (Ferraresi, 1970)

De acordo com Taylor, a equação que expressa a vida da ferramenta em função da velocidade de corte pode ser escrita da seguinte forma:

$$T = K \cdot V_c^{-x} \quad (3)$$

Sendo x e K , funções do material para determinadas condições de usinagem.

2.6. Fluidos de corte

2.6.1. Fluidos de corte e suas funções

Fluidos de corte são compostos sólidos, líquidos ou gasosos utilizados para produzir melhorias de caráter funcional e/ou econômico nos processos de usinagem.

Melhorias de caráter funcional são aquelas que aumentam o desempenho e a produtividade do processo. Dentre elas, destacam-se:

- Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco e entre ferramenta e superfície usinada;
- Expulsão do cavaco da região de corte;
- Refrigeração da ferramenta e da peça usinada;
- Melhor acabamento superficial da peça em usinagem.

As melhorias de caráter econômico são aquelas que, como o nome já diz, tornam o processo de usinagem mais econômico. As mais significantes são:

- Redução do consumo de energia durante o corte;
- Redução dos custos relativos a ferramenta;
- Impedimento de corrosão da peça.

2.6.2. Tipos de fluidos de corte

Como já foi dito anteriormente os fluidos de corte podem ser divididos em três grupos segundo seu estado físico: sólidos, líquidos e gasosos.

Segundo Ferraresi (1970), os sólidos são utilizados apenas para lubrificação no processo de usinagem, enquanto os gasosos são utilizados para refrigeração e expulsão do cavaco da região de corte. Ainda segundo Ferraresi, os líquidos constituem o maior e mais importante grupo, sendo os mais largamente empregados nas operações de usinagem. Podem ser subdivididos em:

- Óleos de corte puros;
- Óleos de corte emulsionáveis (ou solúveis);
- Fluidos químicos (ou sintéticos);
- Mercúrio.

Os óleos de corte puros são aqueles que não são misturados com água e, por consequência disso, não são os mais indicados para remoção de calor no processo. Podem ser divididos em ativos ou inativos, sendo os ativos caracterizados pelo acréscimo de cerca de 2% de enxofre ao óleo para reagir com a superfície da peça para protegê-la de altas temperaturas e melhorar a usinagem. Já nos inativos, essa reação não ocorre pois o enxofre presente no óleo está ligado fortemente a cadeias de hidrocarbonetos.

Os óleos de corte emulsionáveis apresentam-se em estado concentrado e devem ser misturados à água numa proporção de 5 a 100 partes de água por parte de óleo. Pelo fato de serem misturados com água, combinam as excelentes propriedades refrigerantes da água com propriedades lubrificantes e antioxidantes do óleo. Faz-se o uso de óleos solúveis quando há necessidade tanto de poder refrigerante quanto lubrificante. As emulsões menos concentradas (mais fracas) são utilizadas quando a necessidade de refrigeração é predominante em relação a lubrificação. Por outro lado, a emulsão mais concentrada (mais rica) é utilizada quando a necessidade de propriedades lubrificantes e antioxidantes mostram-se mais necessárias do que as refrigerantes.

Os fluidos de corte sintéticos não contêm óleo mineral em sua composição, sendo constituídos apenas de agentes químicos em água. Têm características de fluido refrigerante e alguns apresentam também algum poder lubrificante. Dentre suas principais vantagens estão a alta capacidade de refrigeração, sua vida útil bastante grande e sua ação detergente, que mantém as redes de tubulações sempre limpas e evita as naturais obstruções. Por outro lado, alguns cuidados devem ser tomados quando se pensa em utilizar este tipo de fluido. Caso haja necessidade de propriedades de lubrificação é aconselhável que se use um fluido de corte a base de óleos minerais ou graxos, e não o sintético, já que este tem baixas propriedades lubrificantes. Também não são recomendados para usinagem de ligas de magnésio, zinco, cádmio ou chumbo.

Sobre o mercúrio, Ferraresi (1970) cita seu emprego como um meio lubrificante a baixas velocidades de corte. Afirma que é notável sua eficiência em impedir a formação da aresta postiça de corte.

2.6.3. Manutenção dos fluidos de corte

A fim de evitar que o fluido de corte se deteriore prematuramente, alguns cuidados devem ser tomados desde o armazenamento até o momento de sua utilização na região de corte.

A seguir serão explicitados os cuidados que devem ser tomados em relação a cada um dos tipos de fluido de corte:

- **Óleos de corte puros:** Esse tipo de fluido se contamina rapidamente com cavacos e impurezas e, por isso, deve ser periodicamente removido da máquina para sofrer uma operação de limpeza, que pode ser filtração, centrifugação ou processos similares. No momento em que o óleo é removido para limpeza, deve-se fazer também a higienização de todo o sistema de óleo de corte, incluindo as tubulações e o tanque da máquina. Feito isto, óleo limpo ou novo deve ser recolocado no sistema. A frequência com que esta operação deve ocorrer varia para cada processo e deve ser estudada para cada caso particular. Vale ressaltar que algumas máquinas operatrizes são capazes de fazer a filtração do óleo, já que foram projetadas com tubulações e espaços necessários para uma filtração adequada. Nesses casos é importante verificar se a filtração está sendo eficiente e periodicamente deve-se realizar a limpeza do filtro.

- **Óleos de corte emulsionáveis e fluidos químicos:** Assim como os óleos de corte puros, estes também são contaminados pelo cavaco e por impurezas e por isso devem periodicamente passar por um processo de limpeza. Porém, estes fluidos requerem cuidados maiores, que serão apresentados a seguir. O primeiro cuidado a ser tomado ocorre na preparação da emulsão. A quantidade de água e de óleo (ou agentes químicos, para o caso dos fluidos químicos) devem ser precisamente medidos e misturados em um tanque bem limpo. A água utilizada na mistura deve ser tratada e sua dureza deve ser rigorosamente controlada para evitar que os minerais e sais presentes na água impossibilitem a operação de emulsificação. Outro fator que deve ser controlado é a presença de micro-organismos na água, que podem reduzir drasticamente a vida das emulsões. Além de utilizar água tratada, é comum a utilização de agentes bactericidas na composição dos óleos solúveis para evitar a proliferação de micro-organismos. Outra medida importante a ser tomada na utilização dos fluidos de corte emulsionáveis é a constante verificação da quantidade de água e óleo presentes na emulsão. Ferraresi (1970) afirma que nas operações onde há grande geração de calor, a água tende a evaporar e, por conta disso, a emulsão perde propriedades refrigerantes. Nas operações de retificação acontece o oposto, já que o óleo é consumido mais rapidamente, tornando a emulsão mais diluída, perdendo assim propriedades lubrificantes e antioxidantes. Ainda de acordo com Ferraresi (1970), a vida das emulsões pode variar de uma semana a seis meses, evidenciando assim a importância dos cuidados mencionados acima.

2.7. Condições econômicas de usinagem

Para diferentes parâmetros de corte adotados para um par ferramenta-peça, existem duas velocidades de extrema importância prática em uma produção em série, a velocidade econômica de corte (V_{co}) e a velocidade de corte para máxima produção (V_{cmxp}).

A velocidade econômica de corte é aquela que, para um par ferramenta-peça com avanço e profundidade de corte determinados e constantes, acarreta no menor custo de fabricação por peça em uma indústria.

A velocidade de corte para máxima produção é aquela que, para um par ferramenta-peça com avanço e profundidade de corte determinados e constantes, acarreta no menor tempo possível de confecção por peça.

A seguir serão introduzidos os conceitos de tempos e custos de usinagem, bem como o cálculo das velocidades de corte para máxima produção e mínimo custo para o caso de uma máquina operatriz com uma única ferramenta de corte, mantendo-se constantes o avanço e a profundidade de corte.

2.7.1. Tempos de usinagem

O ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases (Ferraresi, 1970):

- a) Colocação e fixação da peça bruta na máquina-ferramenta;
- b) Aproximação da ferramenta para o início do corte;
- c) Corte propriamente dito;
- d) Afastamento da ferramenta;
- e) Inspeção e retirada da peça usinada.

Há também as tarefas que compõem o ciclo de usinagem de forma indireta, ou seja, que não são realizadas a cada peça usinada e sim a cada X peças usinadas. São elas:

- f) Preparo da máquina para a usinagem do lote (ocorre apenas no início do processo);
- g) Remoção da ferramenta do suporte para que seja afiada ou substituída;
- h) Afiação da ferramenta;
- i) Recolocação da ferramenta no suporte.

Somando a contribuição do tempo gasto em cada uma dessas fases na usinagem de uma peça, teremos o tempo total de confecção por peça, que pode ser escrito como:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \quad (4)$$

sendo:

t_t = tempo total de confecção por peça;

t_c = tempo de corte (fase C);

t_s = tempo secundário de usinagem (fases a e e)

t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta (fases b e d);

t_p = tempo de preparo da máquina (fase f);

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta (fases g e i);

t_{fa} = tempo de afiação da ferramenta (fase h);

n_t = número de trocas ou afiações da ferramenta; pode ser escrito como:

$$n_t = Z \cdot \frac{t_c}{T} - 1 \quad (5)$$

Conforme mostra a equação (4), o tempo total de confecção por peça é constituído de três parcelas:

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \quad (6)$$

onde,

t_c = tempo de corte propriamente dito;

t_1 = tempo improdutivo (colocação, fixação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, preparo da máquina para usinagem do lote);

t_2 = tempo de troca e afiação da ferramenta.

2.7.2. Velocidade de corte para máxima produção

Conhecida a equação para o tempo total de confecção por peça, a velocidade de corte para máxima produção já pode ser obtida.

Primeiramente deve-se obter o tempo de corte (t_c) para o caso do torneamento cilíndrico externo. Este é dado por:

$$t_c = \frac{l_f}{V_f} \quad (7)$$

Substituindo-se (2) em (7), tem-se:

$$t_c = \frac{l_f}{f \cdot n} \quad (8)$$

Substituindo a equação (1) na anterior resulta:

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

A fim de se obter a equação para o tempo total de confecção por peça para o caso particular do torneamento cilíndrico externo, substitui-se (3), (5) e (9) em (4). Feito isto, tem-se:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left[\frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} - \frac{1}{Z} \right] \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \quad (10)$$

Admitindo-se o avanço e a profundidade de corte constantes, a velocidade de corte para máxima produção, isto é, a velocidade para que t_t seja mínimo, é dada quando a derivada de t_t em relação a V_c é nula. Neste caso temos:

$$\frac{dt_t}{dV_c} = -\frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c^2} + (x-1) \cdot \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) = 0 \quad (11)$$

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

Substituindo-se V_{cmxp} na equação de Taylor (3), obtém-se a vida da ferramenta para condição de máxima produção.

$$T_{mfp} = (x-1) \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \quad (13)$$

A Figura 7 representa a variação do tempo total de produção por peça e de cada uma de suas parcelas de forma individual em função da variação da velocidade de corte. Nota-se que o tempo de corte diminui com o aumento da velocidade de corte, o tempo t_1 permanece constante e o tempo t_2 cresce com o aumento da velocidade de corte, já que, em velocidades mais altas, aumenta-se o número de trocas e afiações da ferramenta.

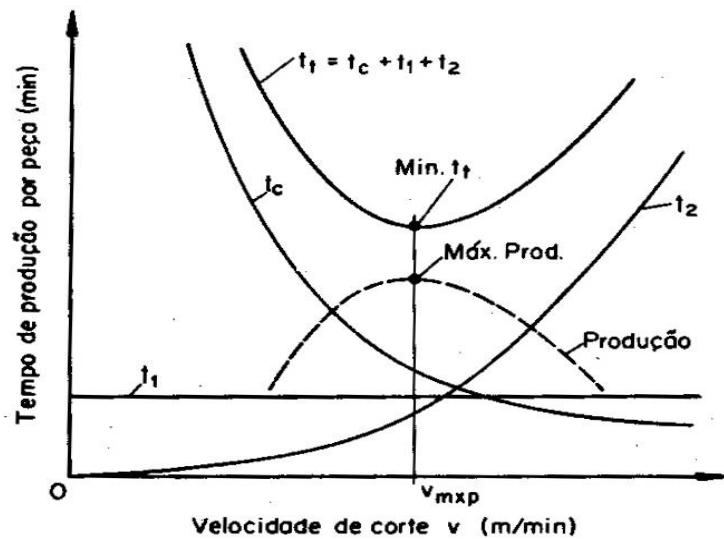


Figura 7 – Representação das parcelas do tempo total de fabricação em função da velocidade de corte

(Ferraresi, 1970)

2.7.3. Custos de produção

Antes de calcular a velocidade econômica de corte, é preciso determinar primeiramente os custos envolvidos na fabricação de uma peça. Os custos de produção por peça são definidos por Ferraresi (1970) da seguinte forma:

K_p = custo de produção;

K_m = custo da matéria-prima;

K_{mi} = custo indireto da matéria-prima;

K_{us} = custo da mão-de-obra;

K_{uf} = custo das ferramentas;

K_{um} = custo da máquina;

K_{eq} = custo de controle de qualidade;

K_{if} = custo indireto da fabricação;

K_v = custo devido às variações de custo de operações anteriores ou posteriores.

Assim, a equação que define o custo total de produção por peça pode ser escrita como:

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + K_{us} + K_{um} + K_{uf} + (K_{eq} + K_{if} + K_v) \quad (14)$$

Dentre as parcelas que compõem o custo total de produção por peça, há uma parte que depende do tempo de usinagem e outra parte que pode ser admitida como constante *a priori*. Para que seja possível calcular a velocidade econômica de corte, é interessante estudar mais a fundo as parcelas que dependem do tempo total de confecção por peça, já que estas variam com a velocidade de corte.

As parcelas que variam com a velocidade de corte são: o custo de mão-de-obra (K_{us}), o custo da máquina (K_{um}) e das ferramentas (K_{uf}), o custo de controle de qualidade (K_{eq}) e o custo proporcional às variações de custo de operações anteriores ou posteriores (K_v). Porém, devido a pouca influência que K_{eq} e K_v exercem na velocidade econômica de corte, estas parcelas serão admitidas como constantes.

O custo de mão-de-obra representa o valor relativo a salários e encargos gastos com o operador por cada peça produzida, e pode ser representado como:

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60} \quad (15)$$

onde:

t_t = tempo total de confecção por peça [min];

S_h = salário mais encargos [R\$/hora].

O custo das ferramentas representa os gastos com a compra da pastilha e do porta-ferramenta. Essa grandeza é a razão entre o custo da ferramenta por vida T e o número de peças que podem ser usinadas durante esta vida. É usualmente expresso da seguinte maneira:

$$K_{uf} = \frac{1}{Z_T} \cdot K_{fT} \quad (16)$$

Sendo o custo da ferramenta por vida T , para ferramentas com pastilhas intercambiáveis, definido por:

$$K_{fT} = \frac{V_{si}}{n_{fp}} + \frac{K_s}{n_s} \quad (17)$$

onde:

K_{fT} = custo da ferramenta por vida T ;

Z_T = número de peças usinadas durante a vida da ferramenta;

V_{Si} = custo de aquisição do porta-ferramenta;

K_S = custo de aquisição da pastilha;

n_{fp} = vida média do porta-ferramenta, em quantidade de fios de corte, até ser inutilizado;

n_S = número de fios de corte do inserto.

Quanto ao custo máquina, este representa o custo de sua aquisição e sua respectiva depreciação, somados aos custos indiretos produzidos por ela, como o gasto energético e espaço ocupado. A soma desses custos é representada por S_m e o custo máquina por peça pode ser escrito de forma reduzida da seguinte forma:

$$K_{um} = \frac{t_t}{60} \cdot S_m \quad (18)$$

com:

S_m = custo total da máquina, em R\$/hora.

2.7.4. Velocidade econômica de corte

Para encontrar o valor da velocidade econômica de corte, no caso de avanço e profundidade de corte constantes, deve-se obter o valor que minimiza o custo total de fabricação por peça. O custo mínimo se dá em um ponto de equilíbrio entre as despesas de mão-de-obra e máquina, que diminuem com o aumento da velocidade de corte, e as despesas relativas à ferramenta, que crescem com o aumento da velocidade de corte.

O valor da velocidade que minimiza os custos de fabricação por peça é obtido basicamente derivando a equação de custo, que foi apresentada acima, em relação à velocidade de corte. O valor obtido será a velocidade econômica de corte.

Anteriormente foram apresentados os custos de usinagem que dependem essencialmente do tempo de usinagem. Admitindo-se os demais custos como constantes, será possível omiti-los ao reescrever a equação de custo que será derivada, já que estes termos se anularão na diferenciação. Neste caso obtém-se:

$$K_p = \dots + K_{us} + K_{um} + K_{uf} + \dots \quad (19)$$

Substituindo as equações (15), (16) e (18) na expressão anterior, se obtém:

$$K_p = \dots + \frac{t_t}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \cdot K_{fT} + \dots \quad (20)$$

Substituindo o tempo total, dado pela equação (4), na equação acima e reorganizando-a, tem-se:

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3, \quad (21)$$

sendo:

$$C_1 = (K_m + K_{mi} + K_{eq} + K_{if} + K_v) + \left[\frac{t_s + t_a + \frac{t_p}{Z}}{60} \right] \cdot (S_h + S_m) - \frac{t_{ft} + t_{fa}}{60 \cdot Z} \cdot (S_h + S_m) = \text{soma}$$

das parcelas independentes da velocidade de corte;

$C_2 = (S_h + S_m) = \text{despesas totais com mão-de-obra e custo-máquina por hora};$

$C_3 = K_{fT} + \frac{t_{ft} + t_{fa}}{60} \cdot (S_h + S_m) = \text{despesas relativas à ferramenta}.$

De maneira análoga ao que foi feito para encontrar a velocidade de máxima produção, substitui-se na equação (21) o tempo de corte por sua equação para o caso do torneamento cilíndrico externo, representada por (9), e a vida T da ferramenta pela sua forma explicitada da equação de Taylor (3). Feito isto, obtém-se:

$$K_p = C_1 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c} \cdot C_2 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot C_3 \quad (22)$$

A Figura 8 representa a variação de cada parcela da equação acima e do custo total por peça em função da variação da velocidade de corte. Percebe-se que o primeiro termo da equação (C_1) independe da velocidade de corte; o segundo termo, referente a despesas com mão-de-obra e máquina, diminuem com o aumento da velocidade de corte; o terceiro termo é uma curva exponencial que representa o acréscimo das despesas relativas à ferramenta com aumento da velocidade.

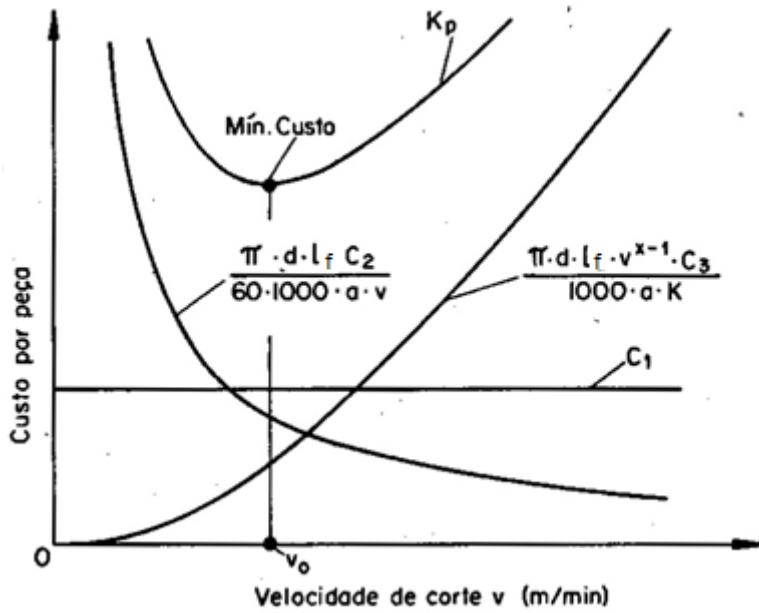


Figura 8 – Representação das parcelas do custo de confecção por peça em função da velocidade de corte
(Ferraresi, 1970)

Na hipótese de avanço e profundidade de corte constantes, o custo total de fabricação por peça será função apenas da velocidade de corte. Assim sendo, seu valor mínimo se dá quando sua derivada em relação a V_c é nula. Portanto:

$$\frac{dK_p}{dV_c} = -\frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c^2} \cdot C_2 + \frac{(x-1) \cdot \pi \cdot d \cdot l_f \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot C_3 = 0 \quad (23)$$

Isolando V_c obtém-se a velocidade de corte para o mínimo custo, que será:

$$V_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (24)$$

onde:

x e K = coeficientes da equação de Taylor;

$C_2 = (S_h + S_m)$ = soma das despesas totais de mão-de-obra e máquina;

$C_3 = K_{fT} + \frac{t_{ft} + t_{fa}}{60} \cdot (S_h + S_m)$ = custo da ferramenta por vida T mais os custos referentes à afiação e troca da ferramenta.

Para se obter a vida da ferramenta na condição de mínimo custo, basta substituir V_{co} na fórmula de Taylor (3). Assim, tem-se:

$$T_o = \frac{60 \cdot (x - 1) \cdot C_3}{C_2} = \frac{60 \cdot (x - 1) \cdot K_{fT}}{S_h + S_m} + (x - 1) \cdot [t_{ft} + t_{fa}] \quad (25)$$

$$T_o = T_{mfp} + \frac{60 \cdot (x - 1) \cdot K_{fT}}{S_h + S_m} \quad (26)$$

2.7.5. Intervalo de máxima eficiência

A figura a seguir representa as curvas de custo total por peça usinada K_p e tempo total de confecção por peça t_t . Ao observá-la, é possível perceber que para velocidades abaixo da V_{co} há um aumento no custo de usinagem por peça e uma redução da produção. Da mesma forma, para velocidades acima da V_{cmxp} há um aumento nos custos por peça e um decréscimo da produção. O intervalo situado entre V_{cmxp} e V_{co} é denominado intervalo de máxima eficiência. Para velocidades de corte situadas dentro deste intervalo, um aumento na velocidade significa um aumento no custo por peça com um correspondente aumento da produção. É aconselhável que para determinadas condições de usinagem a velocidade de corte utilizada no processo esteja sempre dentro deste intervalo.

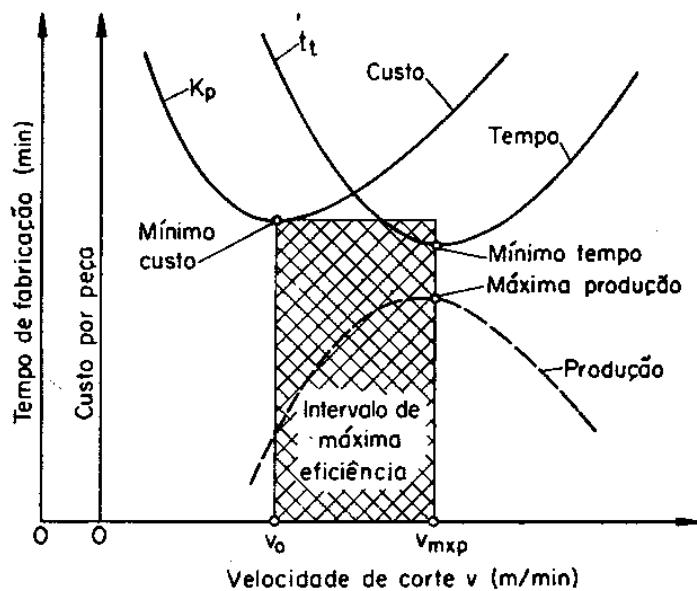


Figura 9 – Intervalo de máxima eficiência (Ferraresi, 1970)

3. Condições econômicas de usinagem na presença do fluido de corte

A fim de verificar a viabilidade da utilização de fluido de corte nas operações de torneamento cilíndrico externo, bem como os possíveis benefícios econômicos gerados por ele, as condições econômicas de usinagem deverão ser estudadas novamente, porém desta vez levando em consideração a presença do fluido de corte nessas operações.

Vale ressaltar que a presença do fluido em uma operação de usinagem irá modificar tanto a equação do tempo total de confecção por peça (t_t) quanto a equação de custo total por peça (K_p), pois serão introduzidos novos tempos e custos. Com a modificação dessas equações, é esperado que as velocidades de corte para máxima produção (V_{cmxp}) e mínimo custo (V_{co}) sejam modificadas. Portanto, é importante para o entendimento do trabalho, que todos os conceitos e equações das condições econômicas já explicadas sejam apresentadas novamente com presença do fluido.

3.1. Tempos de usinagem

Para que fosse possível chegar a uma equação para o tempo total de confecção por peça (a equação 4), foi necessário primeiramente entender cada uma das parcelas que compõem o ciclo de usinagem de uma peça pertencente a um lote de Z peças. Por conta da presença do fluido de corte, novas parcelas são adicionadas a este ciclo e devem ser devidamente apresentadas para que haja uma boa compreensão do novo tempo total de confecção por peça (agora com fluido).

Na presença do fluido de corte, o ciclo de usinagem de uma peça, que pertence a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases:

- a) Colocação e fixação da peça bruta na máquina-ferramenta;
- b) Aproximação da ferramenta para o início do corte;
- c) Corte propriamente dito;
- d) Afastamento da ferramenta;
- e) Inspeção e retirada da peça usinada.

Nota-se que as tarefas que compõem o ciclo de usinagem de forma direta são exatamente as mesmas. Porém, há também as tarefas que fazem parte do ciclo de forma indireta. Na presença do fluido, estas tarefas são:

- f) Preparo da máquina para a usinagem do lote (ocorre apenas no início do processo e inclui a colocação inicial do fluido de corte);
- g) Remoção da ferramenta do suporte para que seja afiada ou substituída;
- h) Afiação da ferramenta;
- i) Recolocação da ferramenta no suporte;
- j) Preparo da emulsão;
- k) Remoção do fluido do reservatório da máquina;
- l) Limpeza do reservatório de fluido da máquina;
- m) Recolocação do fluido no reservatório da máquina;
- n) Checagem da composição da emulsão;
- o) Completação da emulsão para que volte à sua composição inicial.

Somando a contribuição do tempo gasto em cada uma dessas fases na usinagem de uma peça, obtém-se o tempo total de confecção por peça na presença de fluido de corte (t_{totf}), que pode ser escrito como:

$$t_{totf} = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) + \frac{n_f}{Z} \cdot t_{fl} + \frac{n_{cem}}{Z} \cdot t_{cem} \quad (27)$$

sendo:

t_c = tempo de corte (fase *c*);

t_s = tempo secundário de usinagem (fases *a* e *e*)

t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta (fases *b* e *d*);

t_p = tempo de preparo da máquina (fases *j*, *l*, *k*, *f*);

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta (fases *g* e *i*);

t_{fa} = tempo de afiação da ferramenta (fase *h*);

t_{fl} = tempo de troca do fluido de corte (fases *k*, *l*, *j* e *m*);

t_{cem} = tempo de completação da emulsão (fases *n* e *o*);

n_t = número de trocas ou afiações da ferramenta;

n_f = número de trocas do fluido de corte;

n_{cem} = número de vezes que a emulsão deve ser completada, ou corrigida.

É importante ressaltar que a quantidade de trocas do fluido de corte está intimamente ligada com sua qualidade e com o modo com que o mesmo é conservado. Um fluido de corte que pode ser utilizado por mais tempo, ou seja, tem uma vida T_f maior, precisará ser trocado menos vezes, o que consequentemente irá diminuir o tempo total de confecção por peça (e os custos atrelados à compra de fluido). A relação entre o número de trocas que serão feitas durante a usinagem de um lote de Z peças com a vida T_f do fluido pode ser escrita da seguinte forma:

$$n_f = Z \cdot \frac{t_{totf}}{T_f} - 1 \quad (28)$$

com:

T_f = Tempo de vida do fluido, em minutos.

A vida útil do fluido pode ser calculada da seguinte maneira:

$$T_f = 60 \cdot H_d \cdot D_s \cdot S_{stf} \quad (29)$$

onde:

H_d = Número de horas trabalhadas por dia;

D_s = Número de dias na semana em que a máquina trabalha;

S_{stf} = Número de semanas que o fluido pode trabalhar sem ser trocado.

Em operações onde há grande geração de calor, a água presente na emulsão tende a evaporar e, por conta disso, grande parte das propriedades refrigerantes do fluido são perdidas. Por este fato, a emulsão deve ser monitorada com uma frequência previamente estipulada e, se houver necessidade, a água deve ser repostada para que ela volte às suas condições normais e recupere suas propriedades refrigerantes. A equação que dita o número de vezes que a produção deve parar para que a água da emulsão seja repostada durante a fabricação de um lote de Z peças, pode ser escrita da seguinte forma:

$$n_{cem} = Z \cdot \frac{t_{totf}}{T_{em}} - 1 \quad (30)$$

sendo:

T_{em} = Tempo de vida da emulsão, em minutos. Significa o tempo em que a emulsão realiza sua função com a qualidade esperada e não precisa ser completada com água.

De maneira análoga ao tempo de vida do fluido T_f , a vida da emulsão é calculada da seguinte forma:

$$T_{cem} = 60 \cdot H_d \cdot D_s \cdot S_{scem} \quad (31)$$

onde:

S_{scem} = Frequência com que a emulsão deve ser monitorada (e, havendo necessidade, completada), em semanas.

Substituindo (5), (28) e (30) em (27), a equação de t_{totf} pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} t_{totf} = & t_c + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left[\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right] \cdot (t_{ft} + t_{fa}) + \\ & + \left[\frac{t_{totf}}{T_f} - \frac{1}{Z} \right] \cdot t_{tf} + \left[\frac{t_{totf}}{T_{em}} - \frac{1}{Z} \right] \cdot t_{cem} \end{aligned} \quad (32)$$

Portanto, assim como no tempo total de confecção por peça sem a presença do fluido de corte t_t , na presença do fluido também é possível dividir o tempo total em diferentes parcelas. A partir da equação (32), tem-se:

$$t_{totf} = t_c + t_1 + t_2 + t_3 \quad (33)$$

onde,

t_c = tempo de corte propriamente dito;

t_1 = tempo improdutivo (colocação, fixação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, preparo da máquina para usinagem do lote);

t_2 = tempo de troca e afiação da ferramenta;

t_3 = tempo de troca e manutenção do fluido de corte;

Ao tentar utilizar a equação (27) para se obter o tempo total de confecção por peça na presença do fluido (t_{totf}), depara-se com um obstáculo, pois para encontrar o número de trocas do fluido de corte n_f e o número de vezes que a emulsão deve ser completada n_{cem} (requisitos para se obter t_{totf}) há necessidade de se saber t_{totf} . Portanto, para evitar iterações, deve-se rearranjar a equação (32) para se obter:

$$t_{totf} = \frac{t_c + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left[\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right] \cdot (t_{ft} + t_{fa}) - \frac{t_{tf}}{Z} - \frac{t_{cem}}{Z}}{\left(1 - \frac{t_{tf}}{T_f} - \frac{t_{cem}}{T_{em}} \right)} \quad (34)$$

Desta forma não há necessidade de fazer iterações e t_{totf} pode ser facilmente obtido.

3.2. Velocidade de corte para máxima produção

Para se obter a velocidade de corte para máxima produção na presença do fluido de corte, da mesma forma como foi feito anteriormente para a situação onde o fluido não estava presente, deve-se primeiramente aplicar a equação (34) para o caso do torneamento cilíndrico externo, substituindo t_c pela expressão (9) e o tempo de vida da ferramenta T , pela equação de Taylor. Assim:

$$t_{totf} = \frac{\frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left[\frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} - \frac{1}{Z} \right] \cdot (t_{ft} + t_{fa}) - \frac{t_{tf}}{Z} - \frac{t_{cem}}{Z}}{\left(1 - \frac{t_{tf}}{T_f} - \frac{t_{cem}}{T_{em}} \right)} \quad (35)$$

Admitindo-se o avanço e a profundidade de corte constantes, a velocidade de corte que deve ser utilizada para que o tempo de confecção por peça na presença do fluido de corte t_{totf} seja mínimo, é dada quando a derivada do t_{totf} em relação a V_c é nula. Portanto, a equação da velocidade de corte para máxima produção na presença do fluido de corte V_{cmxp} é dada por:

$$\frac{dt_{totf}}{dV_c} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{dt_{totf}}{dV_c} = \frac{\left[-\frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c^2} + (x-1) \cdot \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \right]}{\left(1 - \frac{t_{tf}}{T_f} - \frac{t_{cem}}{T_{em}} \right)} = 0 \quad (37)$$

Para que a derivada se anule é necessário que o numerador seja nulo:

$$-\frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c^2} + (x - 1) \cdot \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) = 0 \quad (38)$$

Isolando a velocidade de corte, encontra-se a velocidade de máxima produção, dada por:

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x - 1) \cdot (t_{ft} + t_{fa})}} \quad (39)$$

Nota-se que a equação da velocidade de corte para máxima produção é exatamente a mesma com ou sem a presença do fluido de corte. Esse resultado condiz com o que era esperado, pois apesar da adição do fluido de corte na operação estudada acarretar na criação de novas tarefas no ciclo de usinagem de um lote de peças, nenhuma das tarefas acrescentadas no ciclo variam com a velocidade de corte utilizada, sendo elas constantes que se anulam na derivação.

Vale ressaltar que apesar da equação da velocidade de corte para máxima produção não ter sido modificada, o valor desta velocidade poderá (e provavelmente irá) mudar quando valores reais forem utilizados na equação, já que é esperado que na presença do fluido de corte os coeficientes da equação de Taylor (x e K) sejam diferentes do caso sem fluido de corte.

De forma similar ao caso onde a usinagem é feita sem fluido de corte, a vida da ferramenta para máxima produção é obtida substituindo-se o valor de V_{cmxp} na equação de Taylor. Neste caso tem-se:

$$T_{mxp} = (x - 1) \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \quad (40)$$

Assim como o ocorrido com a equação da velocidade de máxima produção, a equação de vida da ferramenta para máxima produção também manteve-se inalterada na presença do fluido de corte. Entretanto, isto não significa que seu valor também se manterá o mesmo. O esperado é que, quando valores forem atribuídos às variáveis, o coeficiente x da equação de Taylor tenha seu valor modificado na presença do fluido, o que consequentemente modificará a vida da ferramenta.

3.3. Custos de produção

Quando o processo de usinagem é realizado na presença do fluido de corte, além dos custos de produção já apresentados e explicados anteriormente, originam-se novas despesas que devem ser levadas em consideração para que se obtenha um valor realista do quanto será gasto para se fabricar uma peça. Somando estas despesas à equação (14), obtém-se uma equação que representa o custo total de confecção por peça na presença do fluido de corte, que é dada por:

$$K_{pf} = (K_m + K_{mi}) + K_{us} + K_{um} + K_{uf} + (K_f + K_{fi}) + (K_{eq} + K_{if} + K_v) \quad (41)$$

sendo:

K_f = custo do fluido de corte por peça;

K_{fi} = custo indireto do fluido de corte.

O custo do fluido de corte K_f , representa o valor total gasto na compra do fluido dividido pelo número de peças que serão usinadas sem que haja necessidade de trocá-lo. Esta grandeza pode ser escrita da seguinte forma:

$$K_f = \frac{C_f}{n_{pf}} \quad (42)$$

com:

C_f = custo de aquisição do fluido de corte utilizado na fabricação do lote;

n_{pf} = número de peças usinadas sem a necessidade de trocar o fluido de corte, que é representado da seguinte maneira:

$$n_{pf} = \frac{T_f}{t_{totf}} \quad (43)$$

Substituindo-se a equação (43) em (42), obtém-se uma expressão para o custo do fluido por peça, em função de seu preço, sua vida útil e do tempo total de confecção por peça, o que pode ser de grande importância para comparações entre fluidos de corte. Fazendo a substituição, encontra-se:

$$K_f = C_f \cdot \frac{t_{totf}}{T_f} \quad (44)$$

O custo indireto do fluido de corte é composto basicamente de duas parcelas, o custo de descarte K_{fid} e o de estocagem K_{fie} . O custo de descarte representa o valor

pago (geralmente a uma empresa terceira) para que o fluido já utilizado e não mais útil ao processo seja descartado de acordo com as normas ambientais e não prejudique o meio ambiente. Já o de estocagem representa as despesas gastas para manter um estoque de fluido de corte sem que haja necessidade de parar a produção por falta do mesmo. Por conta disso, tem-se:

$$K_{fi} = K_{fid} + K_{fie} \quad (45)$$

onde:

K_{fid} = custo de descarte;

K_{fie} = custo de estocagem.

O custo de estocagem representa basicamente o valor gasto com a área disponível para o estoque do fluido de corte. Há também o custo relativo ao valor monetário investido na compra do fluido de corte que se mantém “congelado” em forma de mercadoria, mas este se torna desprezível em relação aos outros custos aqui estudados. Portanto, o custo de estocagem por peça produzida é representado como:

$$K_{fie} = \frac{A \cdot C_{fe}}{Z} \quad (46)$$

sendo:

C_{fe} = custo do espaço físico dedicado ao estoque [R\$/m²];

A = área necessária para estoque [m²].

O custo de descarte, como já foi dito, refere-se ao valor gasto para descartar o fluido de corte de maneira ambientalmente correta. Atualmente, grande parte dos fluidos de corte são biodegradáveis e não necessitam de grandes cuidados para que sejam descartados, o que aproxima o custo de descarte por peça do valor nulo. Porém, em situações em que o fluido não é biodegradável, a empresa deve pagar para que uma empresa, ao final da vida do fluido (T_f), recolha o fluido que não pode mais ser utilizado e dê os fins corretos a ele (isto pode também ser feito pela própria empresa). A equação que representa o valor gasto no descarte por cada peça produzida é:

$$K_{fid} = \frac{C_{fd}}{n_{pf}} = C_{fd} \cdot \frac{t_{totf}}{T_f} \quad (47)$$

com:

C_{fd} = custo total gasto para o descarte do fluido de corte.

Finalmente, se obtém a equação do custo total:

$$K_{pf} = (K_m + K_{mi}) + \frac{t_{totf}}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \cdot K_{ft} + \frac{t_{totf}}{T_f} (C_f + C_{fd}) + \frac{A \cdot C_{fe}}{Z} + \\ + (K_{eq} + K_{if} + K_v) \quad (48)$$

3.4. Velocidade econômica de corte

A velocidade de corte que minimiza os custos de produção é obtida, como já foi dito, quando o resultado da derivação da equação de custos em relação à velocidade de corte tem seu valor nulo. Portanto, considerando os novos custos introduzidos na equação de custo total de confecção por peça apresentada no presente capítulo e tomando a sua derivada igual a zero:

$$\frac{dK_{pf}}{dV_c} = \frac{(S_h + S_m) \cdot \left(-\frac{d \cdot l_f \cdot \pi}{1000 \cdot f \cdot V_c^2} + \frac{d \cdot l_f \cdot \pi \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \cdot V_c^{x-2} \cdot (x-1)}{1000 \cdot f \cdot K} \right)}{60 \cdot \left(1 - \frac{t_{tf}}{T_f} - \frac{t_{cem}}{T_{em}} \right)} \\ + \frac{(C_f + C_{fd}) \cdot \left(-\frac{d \cdot l_f \cdot \pi}{1000 \cdot f \cdot V_c^2} + \frac{d \cdot l_f \cdot \pi \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \cdot V_c^{x-2} \cdot (x-1)}{1000 \cdot f \cdot K} \right)}{T_f \cdot \left(1 - \frac{t_{tf}}{T_f} - \frac{t_{cem}}{T_{em}} \right)} \\ + \frac{d \cdot K_{ft} \cdot l_f \cdot \pi \cdot V_c^{x-2} \cdot (x-1)}{1000 \cdot f \cdot K} = 0 \quad (49)$$

Simplificando a equação acima e rearranjando-a, encontra-se a equação da velocidade econômica de corte na presença do fluido de corte:

$$V_{cof} = \sqrt[x]{\frac{K \cdot C_4}{(x-1) \cdot [C_5 + (t_{ft} + t_{fa}) \cdot C_4]}} \quad (50)$$

sendo:

$$C_4 = \left(\frac{(S_h + S_m)}{60} + \frac{(C_f + C_{fa})}{T_f} \right) \quad (51)$$

e

$$C_5 = K_{ft} \cdot \left(1 - \frac{t_{tf}}{T_f} - \frac{t_{cem}}{T_{em}} \right) \quad (52)$$

Substituindo-se V_{cof} na equação de Taylor, obtém-se a vida da ferramenta para a condição de mínimo custo na presença do fluido de corte. Desta maneira, tem-se:

$$T_{of} = \frac{(x - 1) \cdot [C_5 + (t_{ft} + t_{fa}) \cdot C_4]}{C_4} \quad (53)$$

4. Influência do fluido de corte nas condições econômicas de usinagem do aço inox 304L

Agora que as equações das condições econômicas de usinagem na presença do fluido de corte já foram devidamente apresentadas, será possível analisá-las e comparar os resultados obtidos com o caso da usinagem a seco, o que nos permitirá verificar a influência do fluido no processo.

Primeiramente serão determinadas as velocidades de corte de máxima produção e mínimo custo e a vida da ferramenta para essas velocidades para o torneamento do aço inox 304L a seco e na presença do fluido de corte. Estas velocidades e a vida da ferramenta serão comparadas e os intervalos de máxima eficiência definidos para os dois casos.

Feito isto, será analisada a influência do tamanho do lote no tempo e no custo total de confecção por peça na presença e na ausência do fluido de corte para as velocidades de máxima produção e mínimo custo encontradas, bem como o tamanho do lote ideal para otimização das condições econômicas com fluido de corte para estas velocidades.

Com todos estes dados em mãos, serão feitas as conclusões sobre a influência do fluido de corte no torneamento cilíndrico externo do aço inox 304L.

4.1. Parâmetros de corte, tempos e custos utilizados

Para seja possível comparar numericamente a influência econômica do fluido de corte no torneamento do aço inox 304L, serão apresentados agora os dados que vão ser utilizados para os cálculos necessários para tal.

Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros de corte que serão utilizados para todos os cálculos e análises que serão feitas.

Discriminados na Tabela 2, estão todos os tempos que devem ser conhecidos para o cálculo das condições econômicas de usinagem deste trabalho.

Finalmente, na Tabela 3, encontram-se todos os valores necessários para que os custos de produção possam ser calculados.

Tabela 1 – Parâmetros de corte

Diâmetro do tarugo a ser usinado (d)	100 mm
Avanço (f)	0,1 mm/rot
Profundidade de corte (a_p)	0,5 mm
Percorso de avanço (l_f)	500 mm
Coeficientes de Taylor sem fluido de corte (x e K , respectivamente) (Chrispim, 2011)	3,95 e $7,78 \times 10^{10}$
Coeficientes de Taylor com fluido de corte (x e K , respectivamente) (Miranda, 2011)	5,35 e $2,96 \times 10^{14}$

Tabela 2 – Tempos necessários para o cálculo das condições econômicas

Tempo secundário de usinagem (t_s)	1,5 min
Tempo de preparo da máquina (t_p)	10 min
Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta (t_a)	0,1 min
Tempo de troca da ferramenta (t_{ft})	1,5 min
Tempo de afiação da ferramenta (t_{fa})	0 min
Tempo de troca do fluido de corte (t_{tf})	360 min
Tempo de completação da emulsão (t_{cem})	30 min
Tempo de preparo da máquina na presença do fluido (t_p)	360 min
Número de horas trabalhadas por dia (H_d)	8 horas
Número de dias na semana em que a máquina trabalha (D_s)	5 dias
Número de semanas que o fluido pode trabalhar sem ser trocado (S_{stf})	12 semanas
Frequência com que a emulsão deve ser monitorada (S_{scem})	3 semanas
Vida do fluido de corte (T_f)	28800 min
Vida da emulsão (T_{em})	7200 min

Tabela 3 – Valores necessários para o cálculo dos custos de produção

Custo da matéria prima (K_m)	R\$ 200,00
Custo do metro quadrado do estoque	R\$ 14,00
Salário do operador mais sobretaxas, por peça	R\$ 33,14
Custo total da máquina, por hora	R\$ 30,00
Vida média do porta-ferramentas (n_{fp})	400
Custo de aquisição do porta-ferramentas (V_{si})	R\$ 180,00
Custo de aquisição da pastilha (K_s)	R\$ 22,00
Número de fios de corte da pastilha (n_s)	6
Custo de aquisição do fluido de corte (10 litros) (C_f)	R\$ 125,00
Custo de descarte do fluido de corte (até 100 litros) (C_{df})	R\$ 50,00

4.2. Velocidade de corte, vida da ferramenta, tempo e custo de fabricação por peça para máxima produção

A velocidade de corte para máxima produção no torneamento cilíndrico externo do aço inox 304L na usinagem a seco (V_{cmxp}) pode ser obtida por meio da equação (12). Assim, utilizando os valores das Tabelas 1 e 2, se obtém:

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1).(t_{ft} + t_{fa})}} = 392,42 \text{ m/min}$$

A vida da ferramenta para esta velocidade é calculada pela equação (13):

$$T_{mxp} = (x-1).(t_{ft} + t_{fa}) = 4,425 \text{ min}$$

De acordo com o conteúdo apresentado no capítulo 3 deste trabalho, a velocidade de máxima produção para o torneamento do aço inox 304L na presença de fluido de corte (V_{cmxp_f}) é calculada pela equação (39). Portanto, utilizando os valores das Tabelas 1 e 2:

$$V_{cmxp_f} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1).(t_{ft} + t_{fa})}} = 356,53 \text{ m/min}$$

Ainda de acordo com o capítulo 3, a vida da ferramenta para esta velocidade é calculada pela equação (40). Portanto:

$$T_{mxpf} = (x - 1) \cdot (t_{ft} + t_{fa}) = 6,526 \text{ min}$$

Os valores encontrados ao aplicar as equações acima mostram que para se obter a máxima produção na presença do fluido de corte é necessário utilizar uma velocidade de corte menor do que quando se usina a seco. Este fato pode ser explicado ao se observar a equação de Taylor (3) e os coeficientes de Taylor contidos na Tabela 1 para a usinagem com e sem fluido de corte. O coeficiente K na presença de fluido de corte é algumas ordens de grandeza maior do que na ausência do mesmo. Porém, o coeficiente x também é maior e, pelo fato da velocidade de corte ser elevada a este expoente, faz com que um acréscimo na velocidade de corte seja responsável por um decréscimo muito maior na vida da ferramenta na presença do que na ausência do fluido de corte. O gráfico da Figura 10 apresenta as curvas de $\log T \times V_c$ para a usinagem a seco e com fluido utilizando os coeficientes de Taylor da Tabela 1.

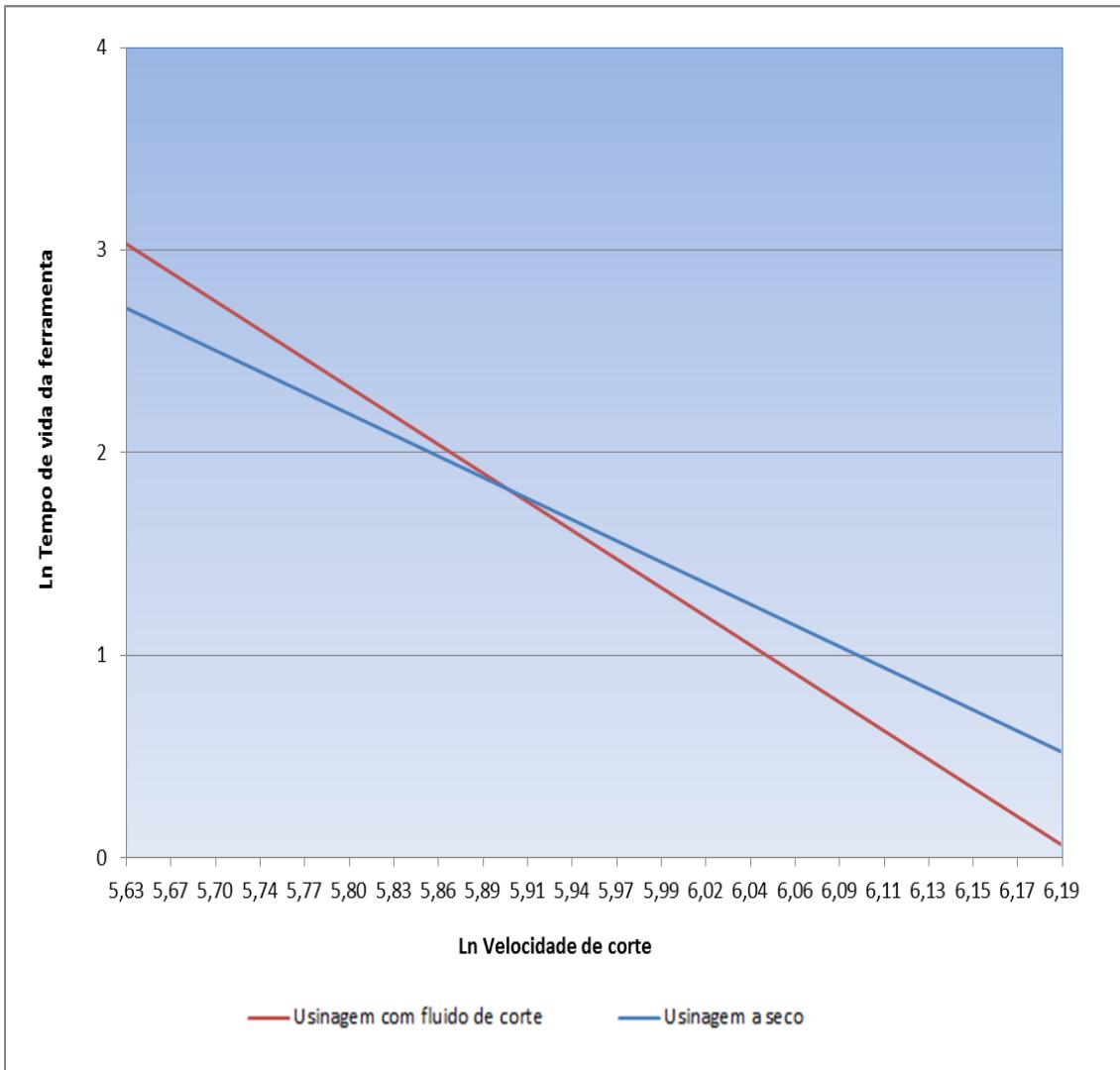


Figura 10 – Comparação da vida da ferramenta em relação à velocidade de corte entre a usinagem a seco e com fluido de corte

Como pode ser percebido no gráfico acima, para velocidades de corte baixas, a vida da ferramenta quando se usina com fluido é maior graças ao seu maior K da equação de Taylor, enquanto que, conforme esta velocidade vai aumentado, o expoente x começa a ser determinante para o decréscimo da vida da ferramenta. Portanto, por mais que o fluido de corte permita que a usinagem seja realizada a velocidades maiores sem comprometer o acabamento, a velocidade de corte deve ser limitada quando se necessita de produção. Isto porque o tempo que se ganha “cortando” mais rapidamente não compensa o tempo que se perde trocando ferramentas.

Diferentemente da velocidade de corte e do tempo de vida da ferramenta, o tempo e o custo total de fabricação por peça dependem do número de peças que serão produzidas. Por conta disto, para que se entenda a influência do fluido de corte

na usinagem do aço inox 304L, será necessário mostrar como se dá a evolução deste tempo e deste custo em relação ao número de peças do lote em forma de um gráfico.

Os gráficos da Figura 11 representam o tempo total de confecção por peça em relação ao número de peças produzidas na presença e na ausência do fluido de corte. Como o objetivo é verificar a evolução deste tempo para a condição de máxima produção, as velocidades de corte utilizadas na usinagem a seco e na presença do fluido de corte foram as suas velocidades de máxima produção.

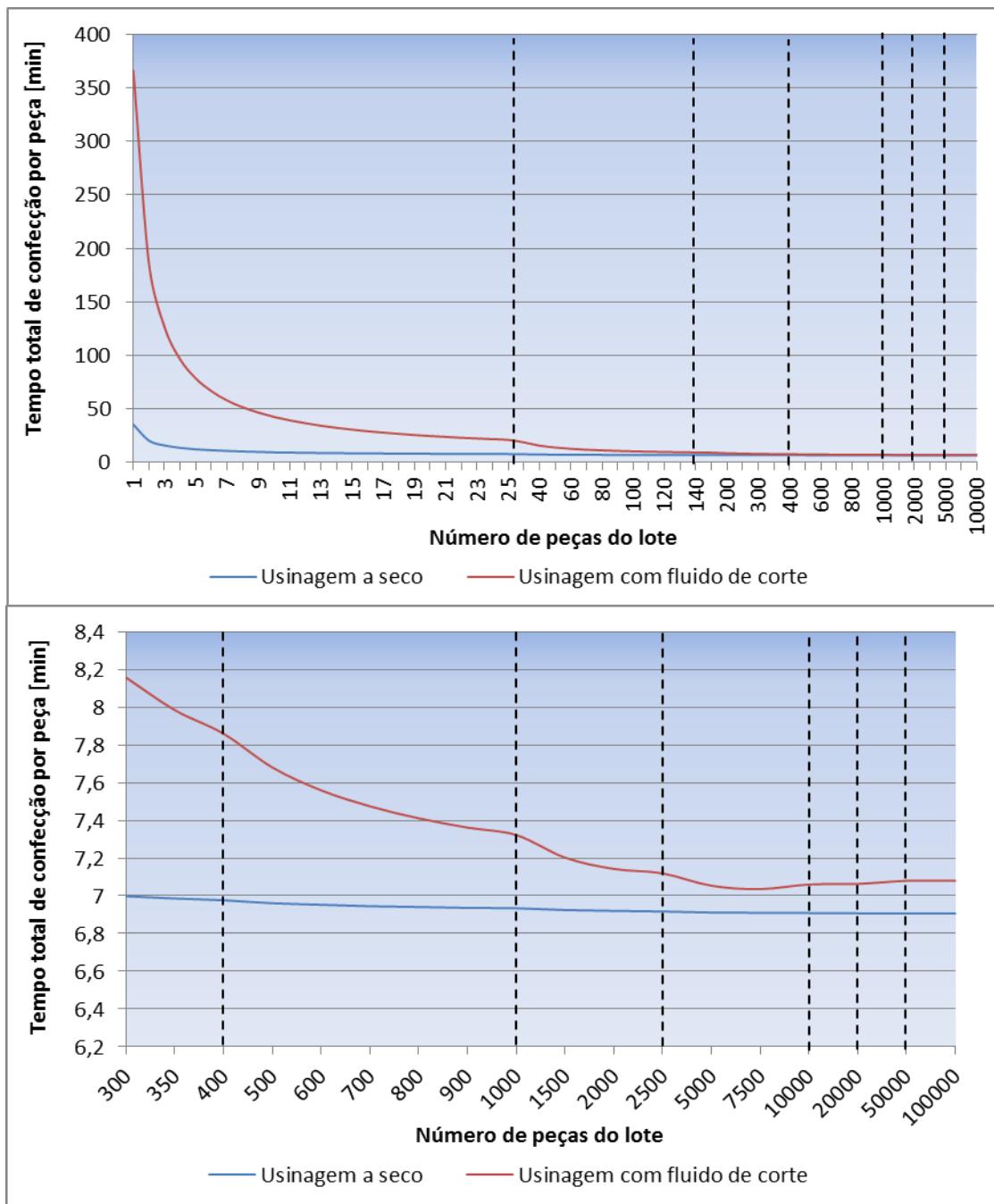


Figura 11 – Comparação do tempo de confecção por peça em função do número de peças do lote na usinagem a seco e com fluido de corte (ambas em suas velocidades de máxima produção)

O primeiro gráfico representa a evolução dos tempos de fabricação por peça para lotes de 1 a 10 mil peças. Sua utilidade é demonstrar que o tempo de fabricação na presença do fluido de corte é extremamente alto para pequenos lotes (neste caso para lotes menores que 100 peças) e cai rapidamente até que chegue a valores bem próximos ao tempo de fabricação da usinagem a seco. Isto ocorre porque o tempo necessário para o preparo da máquina (t_p) pode ser muito maior quando se utiliza o fluido de corte, já que além de tudo o que deve ser feito quando se vai usinar a seco, é necessário também preparar a emulsão que será utilizada, remover o fluido de corte do reservatório da máquina (se houver), realizar a limpeza do reservatório e colocar o fluido na máquina. Porém, conforme o lote cresce, este tempo, que só será necessário uma vez durante a usinagem de todo o lote, vai sendo cada vez menos significante para o tempo total de fabricação por peça, tendendo a zero para um número suficientemente grande de peças (por exemplo, 100 mil).

Ainda no primeiro gráfico, vale ressaltar que as oscilações existentes na curva com fluido de corte ocorrem por conta da necessidade de completar novamente a emulsão e trocar o fluido de corte ao fim da sua vida, o que faz com que o tempo total de fabricação por peça aumente nos pontos onde há essa necessidade.

O segundo gráfico é o mesmo que o primeiro, porém variando de 300 a 100 mil o número de peças do lote, para que fique mais fácil de visualizar o que será explicado. O objetivo deste gráfico é mostrar que usinar o aço inox 304L nas condições especificadas neste trabalho na velocidade de corte de máxima produção com fluido de corte não será mais rápido do que quando esta usinagem é feita na velocidade de corte de máxima produção a seco. O valor mínimo do tempo de fabricação por peça na presença do fluido de corte é aproximadamente 7,03 min por peça e se dá para um lote de aproximadamente 8000 peças. Porém, este valor é maior do que os 6,91 min necessários para fabricação de uma peça quando se usina sem fluido de corte um lote do mesmo tamanho.

A mesma abordagem será realizada para se estudar o custo total de confecção por peça, que está representado nos gráficos da Figura 12 em função do tamanho do lote, na usinagem a seco e com fluido de corte (ambos novamente em velocidade de máxima produção):

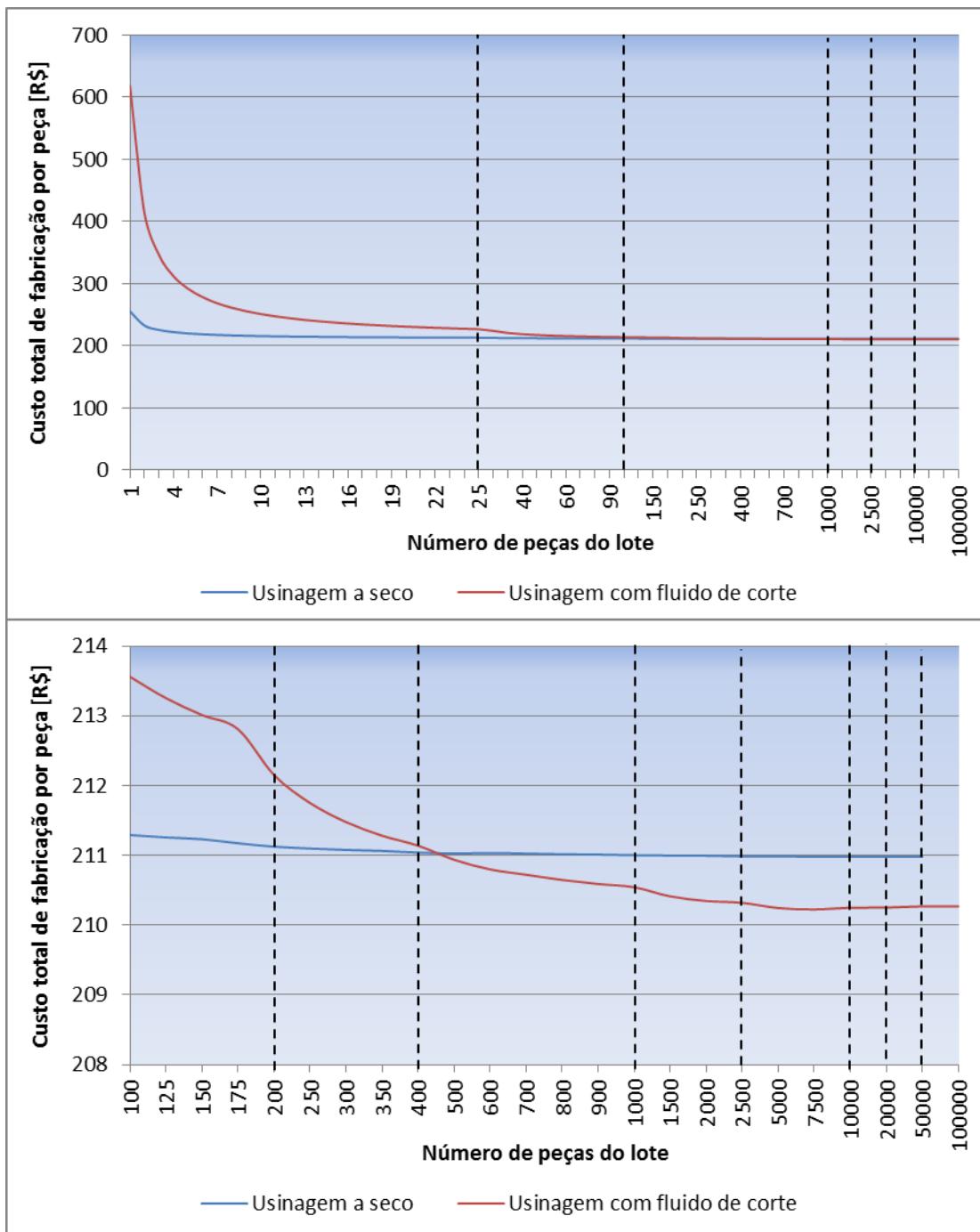


Figura 12 – Comparação do custo de fabricação por peça em função do número de peças do lote na usinagem a seco e com fluido de corte (ambas em suas velocidades de máxima produção)

Observando o primeiro gráfico da figura acima é notável que, assim como na curva do tempo, o custo total de fabricação por peça na presença do fluido é muito mais alto do que na usinagem a seco para pequenos lotes de peças. Conforme o lote cresce, os custos de fabricação na presença e na ausência do fluido de corte vão assumindo valores bem próximos (para lotes por volta de 200 peças), tornando-se então importante a análise do segundo gráfico da figura. Este alto custo inicial já deveria ser esperado, pois para pequenos lotes já foi demonstrado que o tempo de

fabricação por peça é muito alto, o que faz com que os custos de fabricação por peça que dependem do tempo de fabricação (custo máquina, mão-de-obra, e, para o caso da usinagem com fluido de corte, custo relativo à troca e manutenção do fluido de corte) sejam mais elevados.

O segundo gráfico da figura mostra que conforme o número de peças aumenta, os custos do torneamento do aço inox 304L com e sem fluido de corte vão se aproximando até que, para lotes maiores que aproximadamente 450 peças, passa a ser mais barato usinar na presença do fluido de corte, que tem o custo mínimo de aproximadamente R\$210,22 por peça para um lote de 8000 peças, contra os R\$210,98 por peça para o mesmo lote na usinagem a seco. Porém, como mostrado acima, se em ambos os casos (com e sem fluido) forem utilizadas as velocidades de corte para máxima produção, será mais lento usinar na presença do fluido de corte. Sabendo disto, é importante conhecer o comportamento do tempo e do custo de fabricação para a velocidade de corte para mínimo custo de ambos os casos para que seja possível saber qual velocidade irá atender da melhor forma às necessidades do fabricante.

4.3. Velocidade de corte, vida da ferramenta, tempo e custo de fabricação por peça para mínimo custo

Utilizando os dados das Tabelas 1, 2 e 3, a velocidade econômica de corte no torneamento cilíndrico externo do aço inox 304L na usinagem a seco (V_{co}) pode ser obtida por meio da equação (24). Assim:

$$V_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x - 1) \cdot C_3}} = 283,58 \text{ m/min}$$

A vida da ferramenta para esta velocidade é calculada pela equação (26):

$$T_o = T_{mfp} + \frac{60 \cdot (x - 1) \cdot K_{fT}}{S_h + S_m} = 15,96 \text{ min}$$

De acordo com o conteúdo apresentado no capítulo 3 deste trabalho, a velocidade econômica de corte para o torneamento do aço inox 304L na presença de fluido de corte (V_{cof}) é calculada pela equação (50). Então:

$$V_{cof} = \sqrt[x]{\frac{K \cdot C_4}{(x-1) \cdot [C_5 + (t_{ft} + t_{fa}) \cdot C_4]}} = 281,37 \text{ m/min}$$

Ainda de acordo com o capítulo 3, a vida da ferramenta para esta velocidade é calculada pela equação (53). Portanto:

$$T_{of} = \frac{(x-1) \cdot [C_5 + (t_{ft} + t_{fa}) \cdot C_4]}{C_4} = 23,17 \text{ min}$$

Comparando os valores encontrados ao aplicar as equações acima, nota-se que o mínimo custo de produção por peça se dá para velocidades de corte muito parecidas quando a usinagem é feita a seco ou na presença do fluido de corte. Como a velocidade de corte é a variável que mais impacta no tempo total de confecção por peça (para lotes médios e grandes), é de se esperar que o tempo de fabricação por peça para os dois casos tenda a um valor bem próximo. Em contrapartida, a vida da ferramenta para mínimo custo é aproximadamente 45% maior na presença de fluido de corte do que na usinagem a seco, o que se traduz em menores custos de aquisição de ferramentas e menor tempo trocando-as quando se usina com fluido.

Como o tempo e o custo total de fabricação por peça variam com o número de peças do lote, novamente estas variáveis serão analisadas graficamente. Os gráficos da Figura 13 representam o tempo total de confecção por peça em relação ao número de peças produzidas na presença e na ausência do fluido de corte. Como o objetivo é verificar a evolução deste tempo para a condição de mínimo custo, as velocidades de corte utilizadas na usinagem a seco e na presença do fluido de corte foram as suas velocidades econômicas de corte:

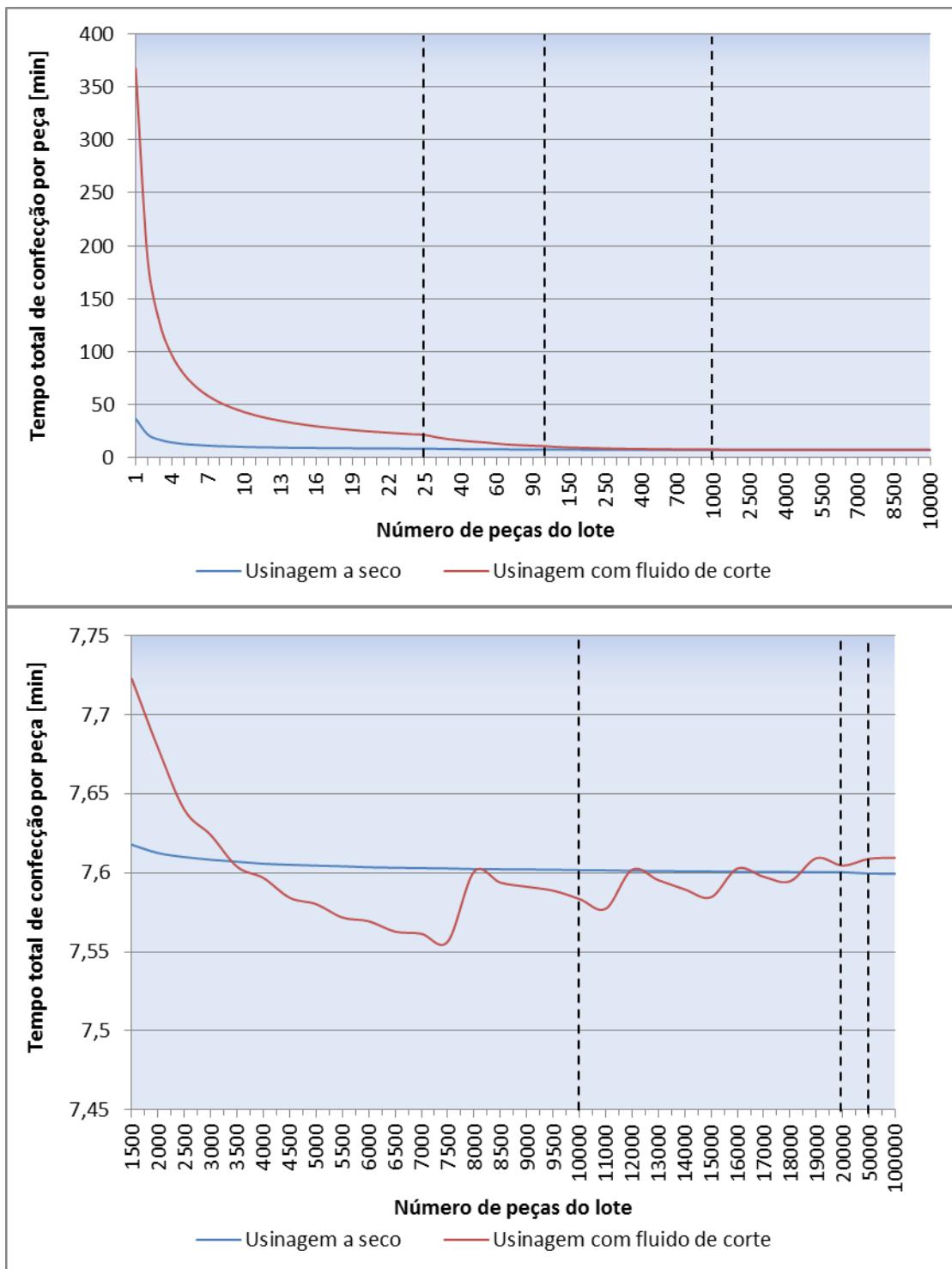


Figura 13 – Comparação do tempo de confecção por peça em função do número de peças do lote na usinagem a seco e com fluido de corte (ambas em suas velocidades econômicas de corte)

No primeiro gráfico da Figura 13 é possível observar novamente que, como foi explicado para o caso da velocidade de máxima produção, o tempo de fabricação por peça na usinagem do aço inox 304L na presença de fluido de corte tem um valor extremamente alto para um lote pequeno (menores que 100 peças, no caso) e conforme o número de peças fabricadas aumenta, o valor do tempo de confecção

destas peças vai diminuindo até que se torne muito parecido com o da usinagem a seco.

O segundo gráfico desta figura mostra que para lotes situados no intervalo entre aproximadamente 3500 e 18000 peças, o tempo de fabricação por peça quando usina-se aço inox 304L nas condições de mínimo custo é menor na presença do fluido de corte do que na usinagem a seco, exceto para determinados tamanhos de lote neste intervalo, nos quais a diferença de tempo se dá na terceira casa decimal, não sendo importantes na prática. A diferença entre tempos é máxima para lotes de aproximadamente 7500 peças, quando é possível ganhar pouco mais que 0,04 min por peça usinando com fluido de corte.

Ainda no segundo gráfico, é possível notar novamente oscilações na curva da usinagem na presença do fluido de corte e, por conta do intervalo de número de peças do lote utilizado para montar este gráfico, estas oscilações são mais evidentes do que as do segundo gráfico da Figura 11. Nota-se que há dois tipos de oscilações. O primeiro tipo, que são bem pequenas e começam por volta de 2000 peças, são causadas pela necessidade de realizar a manutenção da emulsão, que é feita rapidamente e não impacta tanto no tempo total de fabricação por peça no momento em que ocorrem. Elas se iniciam por volta de 2000 peças pois, para as condições utilizadas para os cálculos deste trabalho, é quando ocorre a necessidade de realizar a manutenção da emulsão pela primeira vez. O segundo tipo de oscilação ocorre por conta da necessidade de troca do fluido de corte por conta do fim de sua vida. Este fato ocorre pela primeira vez por volta de 8000 peças e, como se pode ver, é bem impactante para o tempo total de fabricação nas primeiras vezes que ocorre. É notável também que conforme o número de peças do lote cresce, estas oscilações vão se tornando cada vez menos impactantes no tempo de fabricação por peça, já que quanto maior o lote, maior o número de peças que irão dividir o tempo relativo à manutenção do fluido de corte, tendendo este impacto a zero para lotes suficientemente grandes (por volta de 100 mil peças).

Se for feita uma comparação entre a usinagem com velocidade de corte para máxima produção contra a usinagem com velocidade de corte para mínimo custo, nota-se que em máxima produção é mais lento usinar com fluido de corte (embora possa haver redução de custos), porém, quando utiliza-se a velocidade econômica de corte há um intervalo onde pode ser mais rápido usinar na presença do mesmo. Deve-se agora analisar se pode ser mais rápido e ao mesmo tempo mais barato usinar com

fluido na velocidade econômica de corte e determinar, se for o caso, um intervalo de peças fabricadas onde ambos os desejos são realizados.

Para esta análise, mais uma vez será utilizado o método gráfico, estando ilustradas na Figura 14 as curvas do custo total de fabricação por peça para a usinagem a seco e com fluido de corte em função do tamanho do lote, sendo em ambos os casos utilizadas as suas velocidades econômicas de corte.

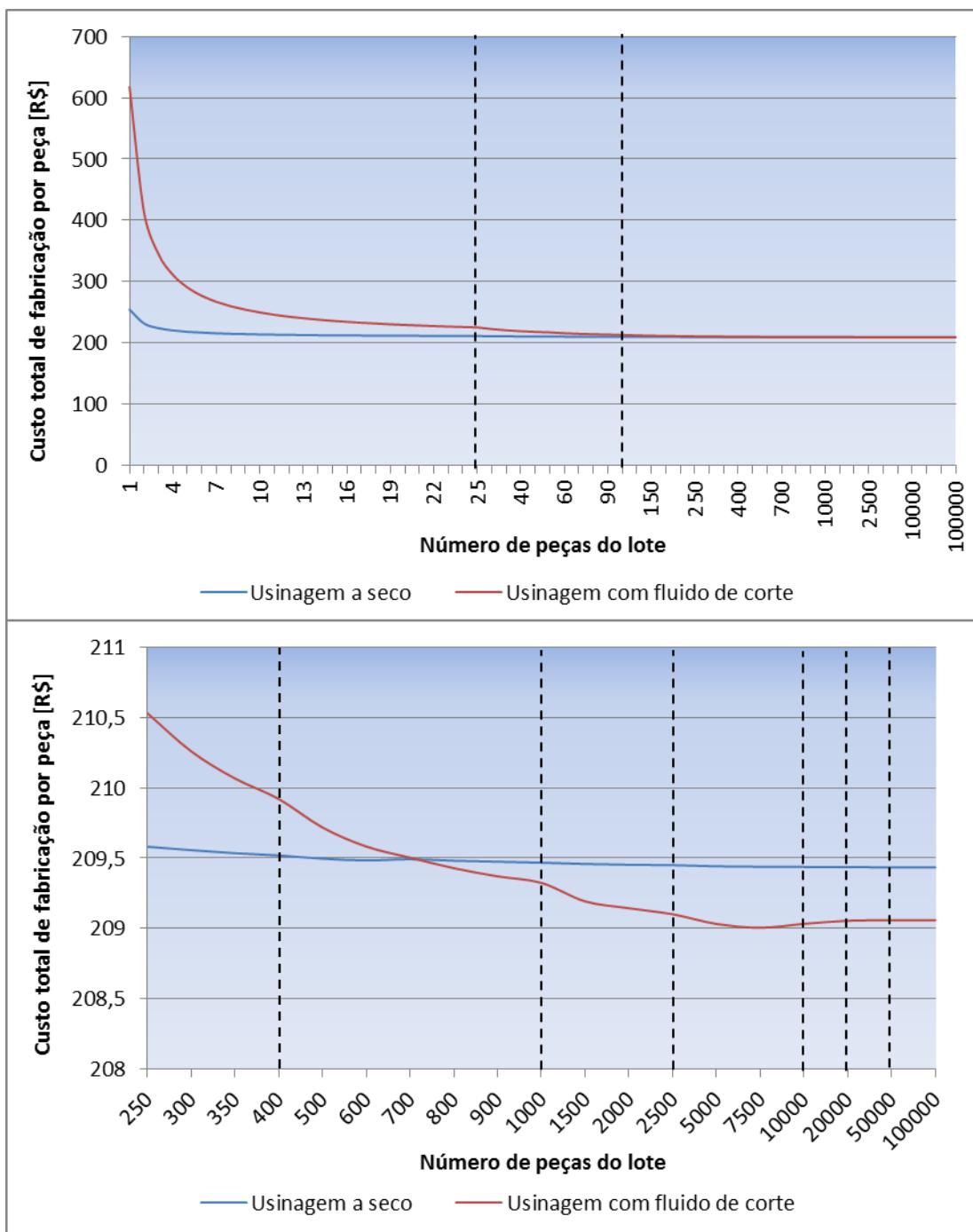


Figura 14 – Comparação do custo de fabricação por peça em função do número de peças do lote na usinagem a seco e com fluido de corte (ambas em suas velocidades econômicas de corte)

Como já era de se esperar, a curva do custo de confecção na presença do fluido de corte acompanha o comportamento da curva do tempo de fabricação e começa de um valor muito mais alto do que na usinagem a seco tendendo, conforme aumenta-se o tamanho do lote, a reduzir seu valor até que chegue a um número bem próximo dos obtidos usinando sem fluido de corte.

Ao observar o segundo gráfico da Figura 14 nota-se que para lotes maiores do que aproximadamente 700 peças é mais barato usinar na presença do fluido de corte. Verifica-se também que o custo mínimo de usinagem, R\$209,00, se dá na presença de fluido para lotes de aproximadamente 7500 peças, sendo por volta de 4 centavos por peça mais barato do que quando se usina a seco o mesmo lote.

A partir destas análises pode-se concluir que será vantajoso (tanto em relação ao tempo quanto ao custo de fabricação por peça) usinar o aço inox 304L na presença do fluido de corte na velocidade econômica de corte para lotes entre aproximadamente 3500 e 18000 peças. Sendo ainda mais produtivo realizar esta usinagem para lotes de aproximadamente 7500 peças, quando tanto o tempo de fabricação quanto o custo de confecção por peça são mínimos.

5. Considerações finais

Para que o presente estudo pudesse ser realizado, foram desenvolvidas equações para o tempo e o custo total de confecção por peça na presença de fluido de corte, assim como equações para obtenção das velocidades de máxima produção e mínimo custo na presença do mesmo. De posse destas equações foi possível fazer uma comparação entre as condições econômicas de usinagem para o torneamento cilíndrico externo do aço inox 304L na presença de fluido de corte e a seco. As principais conclusões e pontos a serem ratificados seguem abaixo.

- i) O intervalo de máxima eficiência abrange uma faixa menor de velocidades quando se usina na presença do fluido de corte (281,37 até 356,53 m/min na presença de fluido contra 283,58 até 392,42 m/min a seco);
- ii) Durante todo o intervalo de máxima eficiência a vida da ferramenta é maior quando se usina na presença do fluido de corte;
- iii) Para lotes menores que 300 peças não será vantajoso realizar a usinagem com fluido de corte para as condições estabelecidas neste trabalho;
- iv) Quando a usinagem é realizada na velocidade de máxima produção para os dois casos, o tempo de confecção por peça é maior na presença do fluido, embora o custo de fabricação por peça seja menor a partir de aproximadamente 450 peças.
- v) Quando a usinagem é realizada com a velocidade econômica de corte para os dois casos, o tempo de confecção por peça na presença do fluido de corte é menor apenas para lotes de 3500 até 18000 peças, aproximadamente. Por outro lado, para lotes maiores do que aproximadamente 700 peças, será mais barato usinar na presença do fluido de corte. Portanto, entre 3500 e 18000 peças fabricadas será mais rápido e mais barato usinar com fluido de corte na velocidade econômica.
- vi) O menor tempo de fabricação por peça possível é 6,91 min e se dá para lotes maiores que 7500 peças quando a usinagem se dá sem a presença do fluido de corte na velocidade de máxima produção (enquanto na presença de fluido este tempo é de 7,03 min).

vii) O menor custo de fabricação por peça possível é R\$209,00 por peça e se dá para lotes de aproximadamente 7500 peças quando a usinagem ocorre na presença de fluido de corte na velocidade de mínimo custo (enquanto o menor custo na usinagem a seco é de aproximadamente R\$209,04).

6. Bibliografia

CHRISPIM, L., “*Análise do Desgaste da Ferramenta de Metal Duro Classe 2015 e suas Condições Econômicas no Torneamento a Seco do Aço Inox 304L*”, Projeto de conclusão de curso de graduação, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFRJ, 2011

FERRARESI, “*Fundamentos da Usinagem dos Metais*”, 12a ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

KUNZE, E.L., “*Análise do Desgaste de uma Ferramenta de Corte e suas Condições Econômicas no Torneamento do Aço Inox 304L*”, Projeto de conclusão de curso de graduação, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFRJ, 2010.

LAUFER, P.A.V., “*Análise do Desgaste de uma Ferramenta com Grão Submícron no Torneamento Aço Inox 304L*”, Projeto de conclusão de curso de graduação, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFRJ, 2011.

MIRANDA, E.F., “*Análise do Desgaste de uma Ferramenta de Metal Duro e suas Condições Econômicas no Torneamento a Seco do Aço Inox 304L com a Presença de Fluido de Corte*”, Projeto de conclusão de curso de graduação, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFRJ, 2011.

SANDVIK, catálogos do fabricante.

SILVEIRA, J. L. L., “*Notas de aula de Usinagem*”, 2007.