

USINAGEM ENXUTA

GESTÃO DO PROCESSO



Nivaldo Lemos Coppini

Artliber
EDITORIAL

Nivaldo Lemos Coppini

USINAGEM ENXUTA

GESTÃO DO PROCESSO

Copyright© 2015 by Artliber Editora Ltda.

Revisão:

Maria Antonieta M. Eckersdorff

Capa e composição eletrônica:

Artliber Editora

Foto de capa:

Torneamento de perfil esférico com bedame redondo (CoroCut® para torneamento em cópia) da Sandvik Coromant do Brasil | Av. das Nações Unidas, 21732 | São Paulo | SP | 04795-914

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro)

Coppini, Nivaldo Lemos

Usinagem enxuta: gestão do processo / Nivaldo Lemos Coppini. --

São Paulo: Artliber Editora, 2015.

Bibliografia

1. Materiais - Usinagem 2. Processos de fabricação 3. Produção enxuta 4. Usinagem 5. Usinagem - Gestão I. Título.

15-02124

CDD-670

Índices para catálogo sistemático:

1. Usinagem enxuta: Gestão: Tecnologia 670

2015

Todos os direitos desta edição são reservados à

Artliber Editora Ltda.

Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3294

05083-010 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: (11) 3643-0300

info@artliber.com.br

www.artliber.com.br

Sumário

1 - Introdução	19
2 - Usinagem - definição, operações, ferramentas e máquinas	23
3 - Prática do processo de usinagem na indústria atualmente	25
4 - Otimização dos parâmetros de usinagem	31
4.1 - O significado de otimização	31
4.2 - Auditor do processo	32
5 - Seleção e otimização do avanço e da profundidade de usinagem	33
5.1 - Tipo de operação a ser realizada (desbaste pesado, desbaste, desbaste leve, semiacabamento, acabamento, acabamento fino)	33
5.2 - Tipo e forma do cavaco	35
5.3 - Rigidez da ferramenta	38
5.4 - Potência do motor da máquina	38
5.5 - Relações entre dimensões, geometria e preço das ferramentas	41
5.5.1 - Pastilhas intercambiáveis	41
5.5.2 - Ferramentas inteiriças	43
5.7 - Considerações finais	43
6 - Vida de arestas de corte	45
6.1 - Vida de arestas de corte e critério de vida	45
6.2 - Determinação da vida da aresta de corte em ambiente fabril	50
6.3 - Desenvolvimento do método para velocidade de corte constante ou rotação constante	51

7 - Cálculo dos tempos em usinagem	55
7.1 - Tempos passivos por peça	56
7.1.1 - t_{pr} [min] - Tempo de preparação	57
7.1.2 - $t_{cg/dg}$ [min] - Tempo de carga e descarga da peça na máquina	58
7.1.3 - $t_{ap/af}$ [min] - Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta	58
7.1.4 - t_{cq} [min] - Tempo para controle da qualidade da peça	58
7.1.5 - $t_{ft/Z}$ - Tempo de troca para uma aresta de corte	59
7.2 - Tempo de corte (tempo ativo) por peça	59
7.3 - Cálculo do tempo de corte para geometrias simples	60
7.3.1 - Cálculo do tempo de corte em uma operação de brochamento	60
7.3.2 - Cálculo do tempo de corte em uma operação de aplainamento	60
7.3.3 - Cálculo do tempo de corte em operações de furação e algumas operações de fresamento	61
7.3.4 - Cálculo do tempo de corte em operações de torneamento e man- drilamento cilíndricos	62
7.4 - Cálculo do tempo de corte para torneamento e mandrilamento de peças com geometrias cilíndricas e não cilíndricas	63
7.4.1 - Cálculo do tempo de corte para peça de geometria genérica com velocidade de corte constante parametrizada	63
7.4.2 - Cálculo do tempo de corte para peças cônicas com velocidade de corte constante	66
7.4.3 - Cálculo do tempo de corte para peças esféricas com velocidade de corte constante	68
7.4.4 - Cálculo do tempo de corte para faceamento de peças com veloci- dade de corte constante	69
7.4.5 - Cálculo do tempo de corte para uma geometria genérica com rotação constante parametrizada	71
7.4.6 - Cálculo do tempo de corte para peças cônicas com rotação constante	72
7.4.7 - Cálculo do tempo de corte para peças esféricas com rotação constante	73
7.4.8 - Cálculo do tempo de corte para faceamento de peças com rotação constante	73
7.5 - Medida do tempo de corte	75
7.5.1 - Cronometragem do tempo de corte	75
7.5.2 - Medida do tempo de corte por visão computacional	76

8 - Maximização da produção e minimização do custo em usinagem	79
8.1 - Maximização da produção em usinagem	79
8.2 - Minimização do custo em usinagem	82
9 - Cenários de fabricação	87
9.1 - Cenário 1: máquina rígida (baixa flexibilidade)	87
9.1.1 - Longo tempo de troca da aresta de corte	88
9.1.2 - Pouco tempo para a troca da aresta de corte	89
9.1.3 - Seleção da velocidade nos intervalos IME e IMEmaq	90
9.2 - Cenário 2: máquina flexível	91
9.2.1 - <i>Just In Time</i> (lotes grandes)	91
9.2.2 - <i>Just In Time</i> (lotes pequenos)	93
9.2.2.1 - Método tradicional de preparação de máquinas	93
9.2.2.2 - Preparo máquina (<i>setup</i> fixo) - método conservativo	95
9.2.2.3 - Preparo máquina (<i>setup</i> fixo) - método agressivo	95
9.2.2.4 - Comparação entre os métodos	98
9.3 - Cenário 3: máquina ociosa	98
9.4 - Cenário 4: máquina gargalo (máximo ganho)	102
9.4.1 - Gargalo e sua identificação	102
9.4.2 - Velocidade de máximo ganho	103
9.5 - Cenário 5: máquina gargalo (máximo lucro)	112
9.5.1 - Conceito de lucro baseado na TOC	112
9.6 - Cenário 6: formação de preço em usinagem	112
9.6.1 - Margem de contribuição	112
9.6.2 - Orçamento e negociação	114
9.7 - Cenário 7: máximo custo admissível - custos x prazos	117
Referências bibliográficas e leitura complementar	121
Anexo A	133

Vida de arestas de corte

Anteriormente foi discutido como selecionar e otimizar os valores do avanço e da profundidade de usinagem. Foi visto que a forma mais segura para seleção inicial destes parâmetros e também da velocidade de corte é: através do catálogo dos fornecedores de ferramentas ou através da experiência acumulada que conste do banco de dados da empresa.

Simplesmente selecionar a velocidade de corte a partir destes procedimentos não garante que esta esteja otimizada diante da realidade do processo a ser planejado e aplicado em ambiente fabril de empresas em geral.

Deve-se considerar que o banco de dados da empresa pode conter dados otimizados do processo utilizando o procedimento proposto neste livro ou outro que tenha sido utilizado. Neste caso a informação do parágrafo anterior deve ser desconsiderada e os dados já otimizados serem praticados com o cuidado de uma verificação para avaliar se ainda são válidos.

Para otimizar o valor da velocidade de corte é necessário que sejam considerados a vida da aresta de corte da ferramenta e o critério de vida para sua substituição. É o que será visto nos itens a seguir.

6.1 – Vida de arestas de corte e critério de vida

É importante ressaltar, novamente, que a velocidade de corte é,

dentre as condições de usinagem o fator de maior influência na vida da aresta de corte e está fortemente ligada aos aspectos econômicos e de produtividade em usinagem.

Apesar de sua importância, o conceito de vida de ferramentas e critério de vida não será tratado de forma profunda neste livro. É sugerido ao leitor ou estudante o aprofundamento deste tema, utilizando, para tanto, o livro “Tecnologia dos Processos de Usinagem” (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

A vida da aresta de corte de uma ferramenta de usinagem é o tempo que ela trabalha efetivamente, removendo material, desde o estado de nova até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério de vida previamente estabelecido. Atingido este critério, a aresta de corte da ferramenta deve ser reafiada (quando for aplicável) ou simplesmente substituída.

O critério de vida, que determina o fim de vida da aresta de corte e que permite decidir sobre a sua substituição, pode ser expresso com base em valores medidos dos desgastes ou com base na medida de parâmetros que variem com a variação dos desgastes.

Podem ainda ser adotados critérios que dependem da incidência de avarias do tipo quebra da ferramenta. Este procedimento, embora possa ser adotado, traz a inconveniência de, eventualmente, causar danos indesejáveis ao sistema de fabricação, além da simples quebra da aresta. Portanto é preferível trocar a aresta de corte antes de ocorrer a quebra, utilizando uma previsão do momento de sua ocorrência.

Os critérios de vida baseados na observação direta dos desgastes consistem em medir o desgaste de flanco, ou o desgaste de cratera, ou ainda ambos, e com base na definição de valores limites toleráveis para estes desgastes, substituir a aresta de corte da ferramenta, sempre que tais valores forem atingidos. Podem ser medidos, ainda, os desgastes que indicam o quanto a aresta de corte da ferramenta recuou de sua posição original, ou o volume de material perdido pela ferramenta devido ao desgaste. Em ferramentas de materiais como, os cerâmicos, que são muito duros e quebradiços, a aresta de corte vai apresentar a presença de pequenas trincas antes de quebrar totalmente, o que é aproximadamente equivalente à ocorrência dos desgastes.

A adoção destes critérios em planta fabril é frequentemente impraticável, pois, os procedimentos de medida são relativamente inapropriados para chão de fábrica. Por este motivo, são preferidos os critérios de vida baseados em parâmetros que variam com os desgastes. A seguir são mencionados alguns, medindo:

- A potência consumida pelo motor principal de acionamento da máquina;
- A força de avanço;
- A força de corte;
- O momento torsor em operações de furação, fresamento, alargamento, e macheamento de roscas;
- A vibração do sistema;
- A emissão acústica;
- A rugosidade e/ou a tolerância dimensional da peça em usinagem.

A utilização de sensores para medição dos parâmetros acima citados também é frequentemente considerada intrusiva ao ambiente fabril. Por este motivo, uma alternativa é contar com um auditor do processo e treinar os operadores até que tenham a prática para fixar um critério de vida que não seja dependente exclusivamente de sua vontade momentânea durante a evolução do processo e de sensores. Um bom procedimento é contar com a experiência do operador e com sua sensibilidade no sentido de estabelecer como regra nunca trocar a aresta de corte por motivos que não tenham uma justificativa baseada no critério de vida adotado. Nestes casos, até que o processo esteja evoluindo de forma estável, um acompanhamento deve ser feito pelo auditor do processo, para que a troca da aresta seja providenciada segundo o critério baseado em análise de valores reais ligados ao processo e principalmente à qualidade final da peça. De qualquer forma, o operador deverá ser treinado no sentido de somente trocar a aresta, quando uma determinada vida desta for atingida. Esta providência fica mais fácil de ser adotada, se o critério estiver baseado em um prefixado número de peças, ou um pré-fixado percurso de corte, ou ainda um pré-fixado percurso de avanço.

Estes critérios não são intrusivos e são muito mais familiares ao ambiente do operador. Sempre que o operador trocar a aresta para vidas diferentes da estabelecida é fundamental que o motivo seja registrado, visando realimentar e aperfeiçoar o procedimento.

O aspecto mais importante relacionado com o critério de vida, entretanto, é que este deve ser mantido sempre o mesmo para um dado sistema de usinagem que se pretenda otimizar. Isto quer dizer que, durante a prática da usinagem de uma peça com uma dada ferramenta, o critério de vida a ser utilizado deverá ser sempre o mesmo para todas as arestas de cortes que forem utilizadas, bem como para todos os parâmetros de corte e principalmente, as velocidades de corte.

Sempre que o critério de vida inicialmente estabelecido não for possível de ser atendido, é necessário identificar quais seriam os fatores definidores deste impedimento. Pode ocorrer que a vida de uma aresta de corte esteja variando com relação a outras por causa dos seguintes motivos:

- Presença de sobremetal com dimensões irregulares;
- Ausência de homogeneidade do material da peça;
- Uso de ferramentas com qualidade de fabricação heterogênia.

A prática da usinagem enxuta evita que tais fatores negativos ocorram. Ao controlar uma operação de usinagem é muito importante verificar se sua instabilidade não está ligada a fatores de influência provenientes de operações anteriores, sejam elas de usinagem ou não. Por exemplo, peças fundidas ou forjadas provenientes de fornecedores diferentes que são colocadas para ser usinadas de forma aleatória. Nestes casos, seria necessário desenvolver fornecedores que pudessem manter melhor qualidade de seus produtos que são insumos para a usinagem. O mesmo pode ocorrer com ferramentas de diferentes fornecedores ou de fabricantes de ferramentas cuja qualidade seja duvidosa.

A equação (6.1) foi desenvolvida por Taylor e mostra como a vida pode ser determinada na prática da usinagem.

$$T \times v_c^x = K \quad 6.1$$

Onde:

T = vida da ferramenta para um dado par aresta de corte/peça [min];

x e K = são os coeficientes da equação. Os valores de x e de K dependem da unidade utilizada para medir a vida da ferramenta.

O coeficiente K representa o valor da vida da aresta de corte para uma velocidade de corte de 1 m/min. Por este motivo pode ser denominado como sendo o valor da vida específica da aresta de corte.

O coeficiente x representa a sensibilidade da vida da aresta de corte com relação à variação da velocidade de corte. Desta forma, quando diferentes ferramentas usinam uma mesma peça, o par que apresenta o maior valor de x , é o que apresenta evolução de desgastes mais acentuada e vice versa.

Foram propostas diversas outras expressões para cálculo da vida de arestas de corte. Estas consideram, além da velocidade de corte, a influência de diversos outros parâmetros do processo, como por exemplo, o avanço e a profundidade de usinagem e o próprio valor do desgaste VB. No próximo item é proposto um modelo para a determinação de x e K que dispensa estas equações mais detalhadas.

Quando Taylor, no início dos anos 1900, realizou as experiências que levaram à sua famosa equação de vida da aresta de corte de ferramentas de usinagem, ainda não era usual trabalhar-se em operações de torneamento com velocidade de corte constante. Provavelmente, para garantir velocidade de corte constante, Taylor ensaiou corpos de prova cilíndricos e determinou os coeficientes de sua equação para velocidade de corte e rotação constantes. Além disso, toda a sua abordagem científica foi baseada no fato de que os coeficientes de sua equação eram característicos do par “material do corpo de prova/material da ferramenta”. Apesar de ser mais raro o trabalho com rotação constante hoje em dia, é proposto neste livro que seja possível utilizar este procedimento e, com os dados retirados da prática do processo, determinar a vida da aresta de corte.

Assim é que, da mesma forma que foi possível escrever a equação (6.1), é possível escrever a equação (6.2), utilizando os mesmos procedimentos. Assim tem-se:

$$T' \times n^{x'} = K' \quad 6.2$$

Onde

T' = vida da ferramenta para rotação constante [min];

n = rotação da peça ou ferramenta [rpm]; e

x' e K' = coeficientes da equação de Taylor para rotação constante.

6.2 – Determinação da vida da aresta de corte em ambiente fabril

Depois de fixados todos os parâmetros de corte e otimizados o avanço e a profundidade de usinagem, resta, como já foi mencionado, otimizar a velocidade de corte. Ao trabalhar com o valor da velocidade de corte durante o processo de otimização, é fundamental que esta respeite todas as restrições da ferramenta e da máquina ferramenta. Portanto, deve ser verificada a possibilidade de utilização dos valores selecionados da rotação, do avanço ou da velocidade de avanço, da força de corte e da potência do motor.

A utilização da equação (6.1) com os valores de x e de K , quando retirados da literatura (catálogos e artigos publicados), não apresenta boa precisão na previsão do valor da vida de uma aresta de corte na prática do processo. Isto ocorre porque estes valores são determinados para uma realidade completamente diferente daquela para a qual se pretende fazer tal previsão. Esta mesma observação vale para a equação (6.2).

Além disso, observa-se na equação (6.1), que a vida da ferramenta sofre uma influência significativa da velocidade de corte. Isto ocorre porque diferentes mecanismos de desgastes atuam para os diferentes valores deste parâmetro (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Assim, é apresentado a seguir um método para determinação dos coeficientes de vida de Taylor, em ambiente fabril e em tempo real com

a ocorrência do processo de usinagem. Este método tem por objetivo utilizar os dados do próprio processo para determinação dos coeficientes de Taylor, o que os torna precisos para cada caso em análise.

Por este motivo, os valores dos coeficientes x e K da equação de Taylor determinados pelo método apresentado a seguir, valem exclusivamente para a peça/ferramenta/máquina para as quais foram determinados. A extrapolação dos valores dos coeficientes de vida de Taylor determinados para um par ferramenta/peça para outras situações de usinagem não deve ocorrer.

6.3 – Desenvolvimento do método para velocidade de corte constante ou rotação constante

Passos a serem adotados:

- a) Otimizar os valores de avanço e de profundidade de usinagem, seguindo a orientação dada anteriormente. Estes serão considerados otimizados, caso todos os cuidados recomendados tenham sido adotados, segundo os procedimentos de usinagem enxuta;
- b) Selecionar a velocidade de corte da mesma forma que tem sido praticada pela indústria, ou seja, com base em catálogo de fornecedores de ferramentas ou na experiência acumulada com valores ainda não otimizados. Esta será caracterizada como sendo a v_{c1} ;
- c) Adotar um critério de vida da aresta e treinar o operador da máquina no sentido de mantê-lo sempre o mesmo durante todo o desenrolar do processo. O mesmo critério deve ser utilizado para todas as velocidades de corte que forem utilizadas. Tanto no momento do levantamento de dados quanto durante o uso da velocidade de corte otimizada e adotada;
- d) Realizar a usinagem da peça com a velocidade de corte v_{c1} até que o critério de vida pré-estabelecido seja atingido;
- e) Anotar a vida T_1 da aresta de corte em minutos;
- f) Alterar o valor da velocidade de corte para $v_{c2} = \pm 20\%$ de v_{c1} ,

respeitando as restrições da máquina, ferramenta e dispositivos de fixação. Caso não seja possível, adotar um porcentual que o seja, mas sempre adotar a segunda velocidade de corte diferente de v_{c1} . Realizar a usinagem da peça até que o mesmo critério de vida adotado anteriormente seja atingido. A recomendação do segundo valor da velocidade de corte prevê nível adequado de precisão para determinação dos coeficientes da Equação (6.1). Manter todos os demais parâmetros inalterados;

- g) Anotar o valor da vida T_2 da aresta de corte em minutos;
- h) Calcular os coeficientes x e K pelas equações (6.3) e (6.4):

$$x = \frac{\log\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\log\left(\frac{v_{c2}}{v_{c1}}\right)} \quad 6.3$$

$$K = T_1 \cdot v_{c1}^x \quad 6.4$$

- i) Como o processo de usinagem apresenta muitos fatores de influência, é necessário que um procedimento estatístico seja adotado para gerar coeficientes da equação (6.1) os mais confiáveis possíveis;
- j) Os valores de x e K são válidos para o intervalo de validade de velocidades de corte para o qual os coeficientes foram determinados, com margem de tolerância de 10% acima ou abaixo das velocidades ensaiadas. O risco com extrapolações maiores é o de considerar valores não válidos e, portanto, chegar a resultados incorretos para aplicações práticas;
- k) A velocidade de corte selecionada deve ser acompanhada por verificação periódica ao longo do tempo em que este processo for aplicado na prática. Isto, porque novas aquisições de material da peça e/ou da ferramenta poderão apresentar variações que eventualmente acarretem mudanças no valor dos coeficientes x e K de Taylor. Esta providência pode ser levada a efeito pela medida da vida da ferramenta de tempos em tempos sempre que um estes fatos ou ambos ocorrerem;

l) Deve-se ressaltar que este procedimento tem como base a determinação dos coeficientes da equação de Taylor em ambiente fabril. Assim, o processo poderá também ser planejado para ocorrer com rotação constante, embora tal planejamento não seja o mais usual. Valem, para rotação constante, todas as observações feitas até este ponto para velocidade de corte constante. Assim, têm-se as equações (6.5) e (6.6) para rotação constante:

$$x' = \frac{\log\left(\frac{T_1'}{T_2'}\right)}{\log\left(\frac{n_2}{n_1}\right)} \quad 6.5$$

$$K' = T_1' \cdot n_1 \quad 6.6$$

m) Se a usinagem ocorrer com velocidade de corte constante, poderá ser necessário limitar a rotação por segurança (ver rotação limite *default* no terceiro parágrafo do item 7.4). Neste caso, como o ensaio para determinação dos coeficientes de Taylor estará ocorrendo durante um caso real, a mudança de velocidade de corte constante para rotação constante influenciará o valor dos coeficientes da equação de Taylor de forma proporcional aos tempos envolvidos em cada caso. Assim, deverá ser utilizado bom senso para decidir sobre quais valores dos coeficientes devam ser utilizados.

n) Pode não ser possível tratar os dados através de procedimentos estatísticos. Isto vai ocorrer quando o número de peças do lote for pequeno. Neste caso, a otimização seguirá um caminho diferente deste relatado neste momento e seguirá um critério de otimização do processo de usinagem para ambiente fabril flexível, que será apresentado adiante neste livro.

o) Caso a operação já tenha sido otimizada por esta metodologia, basta retirar o seu valor do banco de dados juntamente com todos os parâmetros de corte que já passaram pelo procedimento de otimização. Sempre que isto ocorrer, é necessário verificar se

as condições geométricas e o material da peça, bem como a qualidade da ferramenta, não sofreram variações com relação aos valores ensaiados anteriormente e que geraram os valores do banco de dados otimizados.

Cálculo dos tempos em usinagem

A equação (7.4) permite calcular o valor do tempo total de produção por peça para qualquer velocidade de corte. Nela todos os demais dados de corte são mantidos como parâmetros já selecionados e otimizados conforme previsto em capítulos anteriores deste livro.

$$t_t = t_{\text{pass}} + t_c + \left[\frac{n_t}{Z} \cdot t_{\text{tf}} \right] \quad 7.4$$

Onde:

t_{pass} = total dos tempos passivos para fabricação de uma peça [min]

t_c = tempo de corte para fabricação de uma peça [min]

n_t = número de trocas de arestas de corte para cortar todas as Z peças do lote (ver Apêndice A)

t_{tf} = tempo de troca para cada aresta de corte da ferramenta [min]

Se a ferramenta for do tipo que deve ser afiada, por exemplo, uma broca helicoidal ou uma fresa de aço rápido, o tempo de afiação deve ser computado somente quando a ferramenta for retirada da máquina para ser afiada voltando a usinar sem ser substituída por outra. Caso contrário, será considerado zero. Este tempo não será considerado no desenvolvimento das equações por ser, a afiação, um processo que deve ser providenciado independente da operação de usinagem em análise. Esta é outra providência típica de trabalho dentro dos critérios de usinagem enxuta.

O tempo total de fabricação por peça t_i deve ser considerado a partir do momento que o preparador e o operador da máquina registram o recebimento da folha de planejamento até o momento em que é registrado que o lote todo foi fabricado. Neste momento, a máquina estará liberada para a próxima tarefa.

Assim, tanto o preparador quanto o operador da máquina terão contabilizado o tempo total de fabricação do lote.

Todo o tempo em que não houver registro de atividades de ambos será considerado como tempo ocioso e lançado como despesa na contabilidade da empresa. Isto significa que um funcionário foi pago para trabalhar um determinado número de horas e não produziu na totalidade destas horas. O mesmo ocorrerá com o custo/hora da máquina parada. É óbvio que devem estar previstos momentos de folga para os funcionários de acordo com as leis trabalhistas, porém, a empresa deve ter como controlar o tempo efetivamente trabalhado por cada um de seus funcionários.

7.1 – Tempos passivos por peça

Tempo passivo t_{pass} é o nome dado aos tempos utilizados para o desenvolvimento do processo sem que ocorra remoção de cavaco. É um tempo que, embora importante para realização do processo de usinagem, não agrega nenhum valor à peça fabricada. Isto significa que, durante este tempo, nenhuma modificação ocorre na peça, ou seja, nenhum valor foi agregado e ela continua com o seu valor original. É possível somar todos os tempos passivos como é mostrado na equação 7.5. Os tempos passivos devem ser otimizados, ou seja, devem ser os menores possíveis. Esta é uma outra providência a ser adotada dentro do conceito de usinagem enxuta.

$$t_{pass} = \frac{t_{pr}}{Z} + t_{cg/dg} + t_{ap/af} + t_{cq} - \left(\frac{1}{Z} \times t_{ft} \right) \quad 7.5$$

Onde:

7.1.1 – t_{pr} [min] – Tempo de preparação

O tempo de preparação é o tempo transcorrido desde o registro da folha de planejamento de processo da peça, até que uma primeira peça seja usinada, obedecendo ao seu projeto. Durante este tempo, o preparador de máquina vai até o almoxarifado e retira o número de ferramentas especificado na folha de processo. A matéria-prima bruta que será utilizada para fabricar a peça também deve ser providenciada e posicionada adequadamente próxima da máquina. O tempo referente a estas tarefas pode, opcionalmente, ser considerado em outro centro de custo que não o da máquina e, neste caso, não ser considerado como um tempo passivo da usinagem do lote em questão. Seria, neste caso, contabilizado como um tempo do centro de custo de “transportes internos”, por exemplo. Também não deverá ser considerado quando ocorrer para um lote de peças, enquanto outro estiver sendo usinado.

O preparador de máquinas deverá montar cada uma das ferramentas nas respectivas estações da torre ou magazine da máquina, seguindo a programação CNC que irá reger a usinagem. Deverá, em seguida, referenciar todas as ferramentas através do procedimento que poderá ser manual ou automático, dependendo dos recursos da máquina.

Depois disto, o preparador de máquina deverá testar o programa CNC até que uma peça perfeita seja usinada.

O t_{pr} não é possível de ser calculado. Ele pode ser cronometrado ou estimado. Como a preparação da máquina é feita para usinagem de todo o lote, o tempo de preparação deverá ser rateado entre as suas Z peças.

O t_{pr} é tanto maior quanto menor for a flexibilidade do sistema de fixação de ferramentas e quanto maior forem as dificuldades de transferência do programa CNC e ajuste dos dados operacionais da máquina. Assim, para trabalhar dentro do conceito de usinagem enxuta, este tempo deverá ser otimizado, quando os sistemas forem pouco flexíveis, pela prática e organização do preparador de máquinas. Se possível, a empresa deve contar com máquinas mais flexíveis com sistemas integrados de manufatura e dispositivos automáticos de ajuste dos dados operacionais da máquina (Da Costa, F. S. et al, 2014).

7.1.2 – $t_{cg/dg}$ [min] – Tempo de carga e descarga da peça na máquina

Refere-se ao tempo transcorrido entre posicionar e prender uma peça na placa ou na mesa da máquina e sua retirada depois de usinada. Este tempo também deve ser cronometrado ou estimado. Dentro do conceito de usinagem enxuta, valem os descritos para o t_{pr} .

7.1.3 – $t_{ap/af}$ [min] – Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta

Refere-se ao tempo transcorrido entre todas as aproximações e afastamentos que uma ferramenta realiza, sem tocar na peça, visando seu posicionamento, para dar continuidade a um determinado ciclo de usinagem. Apesar de trabalhoso, esse tempo pode ser calculado a partir dos comprimentos das trajetórias em vazio realizadas pela ferramenta e do avanço em rápido da máquina. Cronometrar esse tempo é praticamente impossível por causa da rapidez com que ele ocorre. Esse tempo passivo, dependendo do número de vezes que a ferramenta se afasta, se desloca e aproxima da peça, pode ser relativamente grande quando comparado com o tempo de corte. O $t_{ap/af}$ depende da velocidade de deslocamento em rápido da máquina. Portanto, o programador deve adotar o máximo disponível e isto, com certeza, estará dentro do conceito de usinagem enxuta.

7.1.4 – t_{cq} [min] – Tempo para controle da qualidade da peça

Refere-se ao tempo transcorrido para verificar se as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial da peça usinada estão de acordo com seu projeto. Esse tempo também deve ser estimado ou cronometrado. Será considerado como parcela do t_{pass} somente quando a inspeção da peça for realizada para liberar a fabricação da próxima peça. Para que esta atividade seja transcorrida dentro do menor tempo possível, é necessário que o controle de qualidade de uma peça ocorra em tempo paralelo ao de usinagem da próxima peça que estiver sendo usinada. Quando isto não for possível, para adequar-se ao conceito de usinagem enxuta, a empresa deverá adquirir instrumentos de medida os mais eficientes, flexíveis e rápidos possíveis.

7.1.5 – $t_{ft/z}$ [min] – Tempo de troca para uma aresta de corte

Este é um tempo passivo que seria somado duas vezes, caso não tivesse uma das vezes subtraída do t_{pr} . Refere-se ao tempo de troca da aresta de corte para uma peça, pois, a primeira ferramenta é fixada na máquina durante o *setup* dela. Portanto, esta ferramenta somente será trocada quando tiver atingido o seu critério de fim de vida. Outra forma de visualizar esta situação é verificar que n_p , definido no anexo A, refere-se ao número de trocas de arestas de corte realizadas e não ao número de arestas de corte utilizadas. O conceito de usinagem enxuta neste caso deveria ser adotado no sentido de realizar a preparação de arestas novas fora da máquina e contar com dispositivos de troca rápida de ferramentas (Da Costa, F. S. et al, 2014 e Santos, T. S., et al, 2014).

7.2 – Tempo de corte (tempo ativo) por peça

A figura 3.1 apresenta um exemplo simplificado de elaboração da folha de método e processo para um sistema de usinagem. É relevante salientar que os tempos passivos e os tempos de corte, que lá são informados, o são pela estimativa de seus valores. No item 7.1 foram apresentadas as providências para enquadramento dos tempos passivos dentro do conceito de usinagem enxuta. Neste item, será visto como calcular de forma a mais exata possível os tempos de corte que deverão constar da folha de processos de peças.

O tempo de corte t_c refere-se ao tempo que é efetivamente utilizado para transformar a matéria-prima bruta em peça, por usinagem. Diz-se que é um tempo ativo, ou que agrega valor à peça, ou ainda, que, durante sua ocorrência, ocorre a retirada do cavaco.

A soma de todos os tempos de corte utilizados, para cortar todas as peças até que uma aresta de corte nova atinja um critério de vida pré-estabelecido e tenha que ser substituída, nada mais é do que a “vida” dessa aresta de corte.

Por este motivo, embora existam máquinas que realizem a medida do tempo em que uma peça está sendo usinada, tal tempo é a soma de tempos ativos e tempos passivos, portanto, não deve ser conside-

rado para cálculo da vida da aresta de corte. Na realidade, ele é parte do tempo de produção da peça. Será visto, mais adiante neste livro, na apresentação sobre medida do tempo de corte por visão computacional, que o valor do tempo ocorrido entre o início e final da usinagem de uma peça pode ser muito diferente do tempo de corte.

Para calcular o tempo de corte, é necessário considerar a operação e a geometria da peça em usinagem.

7.3 – Cálculo do tempo de corte para geometrias simples

7.3.1 – Cálculo do tempo de corte em uma operação de brochamento

Para o caso das operações de brochamento, o tempo de corte corresponde ao tempo que a brocha leva entre iniciar o corte com a primeira aresta até que a última aresta tenha atingido o último ponto depois de atravessar totalmente a peça. Este tempo é dado pela equação 7.6. Saliente-se que o movimento de avanço é dado pelo escalonamento crescente das arestas de corte da brocha.

$$t_c = \frac{(l_b + l_p)}{1000 \times v_c} \quad [\text{min}] \quad 7.6$$

Onde:

l_b = comprimento da brocha [mm] - distância entre a 1ª e a última aresta;

l_p = comprimento da parte brochada da peça [mm];

v_c = velocidade de corte [m/min]

7.3.2 – Cálculo do tempo de corte em uma operação de aplainamento

Para o caso de operações de aplainamento, diz-se que o movimento de avanço é por curso e não por revolução como nos demais processos. Assim, em cada curso, a ferramenta percorre toda a extensão

da peça impulsionada pela velocidade de corte. Desta forma, o tempo de corte será dado pela equação (7.7)

$$t_c = \frac{n_c \times l_p}{1000 \times v_c} \quad [\text{min}] \quad 7.7$$

Onde:

n_c = número de cursos;

l_p = comprimento da superfície usinada da peça na direção efetiva de corte [mm] em um curso;

v_c = velocidade de corte [m/min]

7.3.3 – Cálculo do tempo de corte em operações de furação e algumas operações de fresamento

Para operações de furação e alguns casos de fresamento em que a rotação e o avanço são mantidos constantes e os movimentos de avanço são lineares, o tempo de corte pode, então, ser calculado pela equação (7.8).

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} = \frac{(l_p + l)}{f \times n} \quad [\text{min}] \quad 7.8$$

Onde:

l_p = comprimento da superfície usinada da peça na direção do avanço [mm];

l = comprimento da ponta da broca é 1,5 vezes o diâmetro da fresa. Estes valores deverão ser determinados caso a caso, porque podem variar.

v_f = velocidade de avanço [mm/min];

f = é o avanço por revolução [mm/rev];

n = rotação da ferramenta [rpm]

7.3.4 – Cálculo do tempo de corte em operações de torneamento e mandrilamento cilíndricos

Há operações de torneamento em que o avanço, a velocidade de corte e a rotação são constantes. Isto ocorre quando o diâmetro da peça é constante, como é o caso do torneamento cilíndrico externo, do torneamento cilíndrico interno e do mandrilamento cilíndrico (figura 7.1 a, b, c). Para estas condições, o cálculo do tempo de corte é dado pela equação (7.9), pois a relação entre a velocidade de corte e a rotação pode ser dada pela equação (7.10):

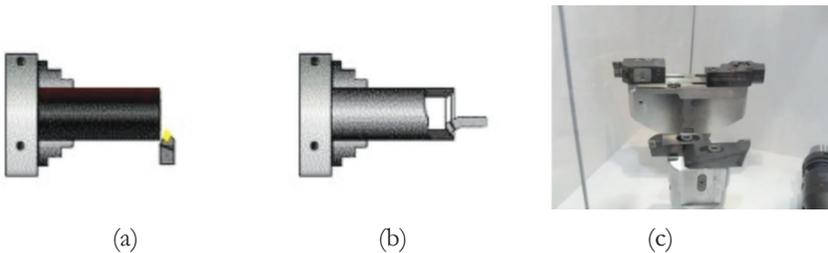


Figura 7.1 – Torneamento cilíndrico externo (a), interno (b) e ferramentas utilizadas em operações de mandrilamento cilíndrico (c)

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} = \frac{l_f}{f \times n} = \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times v_c}, \quad 7.9$$

pois,

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \quad 7.10$$

Onde:

t_c = tempo de corte [min];

f = avanço [mm/rev];

n = rotação da peça [rpm];

d = diâmetro da peça [mm];

v_c = velocidade de corte [m/min].

Na prática da usinagem, embora possa existir um número bastante

grande de peças que preencham estas condições mencionadas no parágrafo anterior, haverá um número significativamente maior de peças nas quais, devido à sua geometria, o percurso de avanço será cônico, esférico, ou escalonado, ou elíptico, ou uma composição destas geometrias. Nestes casos, o diâmetro da peça varia e, como consequência, a velocidade de avanço também. Esta afirmação vale para torneamento, mandrilamento, fresamento ou retificação, quando realizam operações chamadas de perfilamento, em que um perfil complexo da peça é gerado.

7.4 – Cálculo do tempo de corte para torneamento e mandrilamento de peças com geometrias cilíndricas e não cilíndricas

Nenhuma das soluções apresentadas anteriormente para determinação do tempo de corte é possível de ser utilizada quando o perfil da peça a ser usinada apresenta uma geometria não cilíndrica. Neste caso, tanto o diâmetro quanto a rotação ou a velocidade de corte variam simultaneamente.

7.4.1 – Cálculo do tempo de corte para peça de geometria genérica com velocidade de corte constante parametrizada

Em centros de torneamento a comando numérico, é possível realizar a usinagem com velocidade de corte constante. Desta forma, sempre que o diâmetro da peça variar a rotação também variará para compensar a variação do diâmetro. Isto é possível porque os computadores e os sistemas de automação destas máquinas são preparados para estabelecer tais controles.

Manter a velocidade de corte constante é mais adequado para que o controle sobre a vida da ferramenta e, conseqüentemente, seu desempenho durante a usinagem sejam realizados com maior facilidade e precisão. Além disso, o fator de influência na vida da ferramenta é a velocidade de corte e não a rotação.

Entretanto, manter a velocidade de corte constante exige disponibilidade de rotações que nem sempre são possíveis. À medida que o diâmetro de peça vai tendendo para valores cada vez menores, rotações com tendências para valores muito elevados serão exigidas e, neste caso, é necessário limitar o valor da rotação, para garantir o funcionamento adequado da máquina. Por este motivo, existe uma rotação limite *default*, a partir da qual, mesmo que a programação da usinagem

tenha sido elaborada para trabalhar com velocidade de corte constante, automaticamente a máquina adotará a condição de rotação constante enquanto perdurar valores de rotações acima do valor limite. Isto é facilmente observado apenas pela análise da equação (7.10). Estas máquinas permitem que a rotação limite possa ser programada em valores diferentes do *default*, sempre que isto for conveniente para uma determinada operação.

Considere-se uma peça de geometria genérica como a da figura (7.2). Esta peça tem seu raio variável e dependente de x e assim este será denominado de $r(x)$. Em centros de torneamento, o eixo da peça é denominado de eixo z . O eixo x é perpendicular a z e, portanto, fica na direção de um raio da peça. Apesar de ter sido mantida a forma tradicional utilizada em matemática, será observado que este fato não implicará em nenhuma dificuldade na adaptação das fórmulas de cálculo dos tempos de corte.

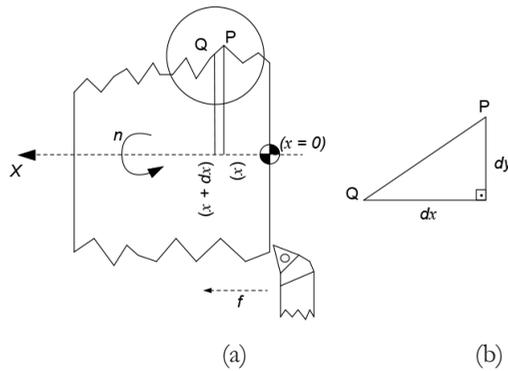


Figura 7.2 – Peça genérica e complexa (a); projeções do segmento PQ nas direções dos eixos x e de y (b)

Na figura 7.2a, x é a coordenada resultante da projeção ortogonal do ponto P sobre o eixo x e $(x+dx)$ é, por sua vez, a coordenada do ponto Q. dx é uma distância infinitesimal entre as projeções dos pontos P e Q. Observa-se que é possível considerar um triângulo retângulo figura 7.2b cuja hipotenusa é a distância entre os pontos P e Q. A distância infinitesimal permite que o segmento PQ possa ser considerado uma reta. Neste triângulo pode-se, aplicando Pitágoras, calcular o valor da hipotenusa, conforme a equação (7.11):

$$\sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \sqrt{(dx)^2 + [r'(x)dx]^2} = \sqrt{1 + [r'(x)]^2} \times dx \quad 7.11$$

Portanto, a equação (7.12) calcula a velocidade de avanço para percorrer a distância P a Q, num tempo dt_c infinitesimal.

$$v_f(x) = \frac{dx}{dt_c} \times \sqrt{1 + [r'(x)]^2} \quad 7.12$$

A usinagem com velocidade de corte v_c constante somente é possível de ocorrer se a rotação n variar sempre que o raio da peça variar. Neste caso, tem-se a equação (7.13).

$$n(x) = \frac{1000 \times v_c}{2 \times \pi \times r(x)} \quad 7.13$$

Apesar de o avanço não variar, a velocidade de avanço vai variar de acordo com a equação (7.14)

$$v_f(x) = f \times n(x) = \frac{1000 \times f \times v_c}{2 \times \pi \times r(x)} \quad 7.14$$

Igualando as equações (7.12) e (7.14), tem-se:

$$\frac{dx}{dt_c} \times \sqrt{1 + [r'(x)]^2} = \frac{1000 \times f \times v_c}{2 \times \pi \times r(x)} \quad 7.15$$

ou

$$dt_c = \left[\frac{2 \times \pi \times r(x)}{1000 \times f \times v_c} \sqrt{1 + [r'(x)]^2} \right] \times dx \quad 7.16$$

Então, tem-se que:

$$t_c = \frac{2 \times \pi}{1000 \times f \times v_c} \int_0^{l_f} \left[r(x) \times \sqrt{1 + [r'(x)]^2} \right] \times dx \quad 7.17$$

A equação (7.17) é genérica para cálculo do tempo de corte para qualquer geometria que seja possível de ser representada por uma linha

geratriz de um corpo sólido e sua equação em torno de um eixo, para velocidade de corte constante.

Para validar a equação (7.17) ela será aplicada para o caso do torneamento cilíndrico interno ou externo e para mandrilamento cilíndrico. Neste caso pode-se afirmar que, para estas operações, vale o que segue:

$r(x) = r$ (raio do cilindro em qualquer dos casos). Como se trata de um cilindro, o raio é constante. Portanto o valor de

$r'(x) = dy/dx = 0$, pois não ocorre variação do raio na direção do eixo dos y .

Diante destas afirmações, a equação (7.18) pode ser escrita a partir da equação (7.17), como sendo:

$$t_c = \frac{2 \times \pi}{1000 \times f \times v_c} \int_0^{l_f} [r \times \sqrt{1+0}] \times dx = \frac{2 \times \pi \times r}{1000 \times f \times v_c} \int_0^{l_f} dx \quad 7.18$$

ou ainda,

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times r}{1000 \times f \times v_c} \times (l_f - 0) \quad 7.19$$

Finalmente, o valor de t_c para a usinagem ou mandrilamento de peça cilíndrica fica dado pela equação (7.20), exatamente igual à equação (6.9) apresentada anteriormente. Este resultado valida a equação (7.17).

$$t_{c=} = \frac{2\pi r l_f}{1000f v_c} = \frac{G_{vcil}}{v_c} \quad 7.20$$

Onde G_{vcil} é o coeficiente de v_c para peças cilíndricas.

7.4.2 – Cálculo do tempo de corte para peças cônicas com velocidade de corte constante

A figura 7.3 representa esquematicamente uma peça cônica que deverá ser usinada.

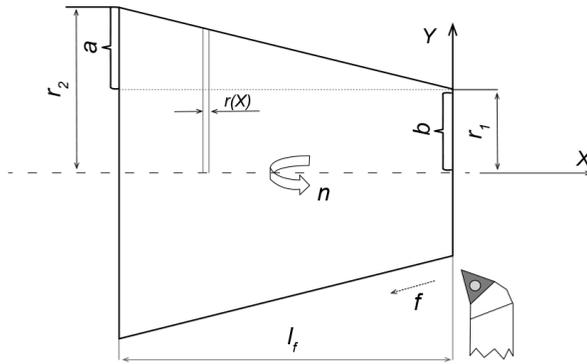


Figura 7.3 – Representação esquemática de uma peça cônica

A geratriz de um cone é uma reta inclinada conforme ilustra a figura 7.3. Assim pode-se escrever que a sua equação (7.21) é:

$$r(x) = ax + b \quad 7.21$$

Pode-se afirmar que $b=r_1$ e que $r'(x)=a$.

É importante ressaltar que o valor do raio menor r_1 não deve ser inferior ao raio r_{seg} a partir do qual a rotação passará a ser constante.

Para calcular o tempo de corte do cone deve ser utilizada a equação (7.17). É assim que pode ser obtida a equação (7.22),

$$t_c = \frac{2 \times \pi}{1000 \times f \times v_c} \int_{x_0}^{x_1} [(ax + b) \times \sqrt{a^2 + 1}] \times dx \quad 7.22$$

a qual assume o formato da equação (7.23).

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times \sqrt{a^2 + 1}}{1000 \times f \times v_c} \left[\frac{ax_1^2}{2} + (r_1 \times x_1) - 0 \right] \quad 7.23$$

Pois, $x_0 = 0$ por ser a coordenada da origem. Tem-se, também, que $b = r_1$ (figura 7.3). Por outro lado $x_1 = l_f$ e $a = (r_2 - r_1) / l_f$. Com estes valores inseridos na equação (7.23), resulta nas igualdades apresentadas na equação (7.24).

$$t_c = \frac{2\pi}{1000f v_c} \sqrt{1 + (r_2 - r_1)^2} \left[\frac{(r_2 - r_1) l_f^2}{2} + r_1 l_f \right] = \frac{G_{vcone}}{v_c}, \quad 7.24$$

onde G_{volume} é o coeficiente de v_c para peças cônicas.

7.4.3 – Cálculo do tempo de corte para peças esféricas com velocidade de corte constante

A figura 7.4 representa esquematicamente uma peça semiesférica. O arco AB será copiado pela ferramenta. A equação $r(x)$ da esfera é dada pela equação (7.25).

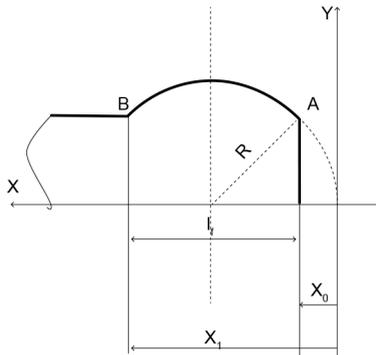


Figura 7.4 – Representação esquemática de uma peça semiesférica

$$r(x) = \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \quad 7.25$$

cuja derivada é:

$$r'(x) = (R - x) / \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \quad 7.26$$

ou pode-se escrever que:

$$1 + r'(x)^2 = [1 + (R - x)^2] / [R^2 - (x - R)^2] \quad 7.27$$

que, depois de expandida, resulta em:

$$\begin{aligned} r(x) \sqrt{1 + r'(x)^2} &= \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \sqrt{[1 + (R - x)^2] / [R^2 - (x - R)^2]} = \\ &= \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \sqrt{[1 + (R - x)^2] / [R^2 - (x - R)^2]} = \sqrt{R^2 - (x - R)^2 + (R - x)^2} = R \end{aligned}$$

Assim, para o caso da esfera, a equação (7.17) fica sendo:

$$t_c = \frac{2 \times \pi}{1000 \times f \times v_c} \int_{x_0}^{x_1} R \, dx \quad 7.28$$

ou

$$t_c = \frac{2 \times \pi}{1000 \times f \times v_c} R \times (x_1 - x_0) \quad 7.29$$

Neste caso, o valor de $(x_1 - x_0)$ é igual a l_f .

Desta forma, a equação (7.30) é a que permite calcular o tempo de corte t_c para a semiesfera. De forma totalmente inesperada, verifica-se que a equação para o cálculo do tempo de corte para a esfera é igual à que calcula o tempo de corte para um cilindro que tenha o raio da esfera.

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times l_f}{1000 \times f \times v_c} R = \frac{G_{vesf}}{v_c} \quad 7.30$$

Onde $G_{vesfera}$ é o coeficiente de v_c para peças esféricas.

7.4.4 – Cálculo do tempo de corte para faceamento de peças com velocidade de corte constante

A figura 7.5 representa uma operação de faceamento. A usinagem vai ocorrer desde o raio menor r_1 até o raio maior r_2 . O raio r representa uma posição genérica do raio da peça, que vai variar desde r_1 até r_2 , início e fim da usinagem.

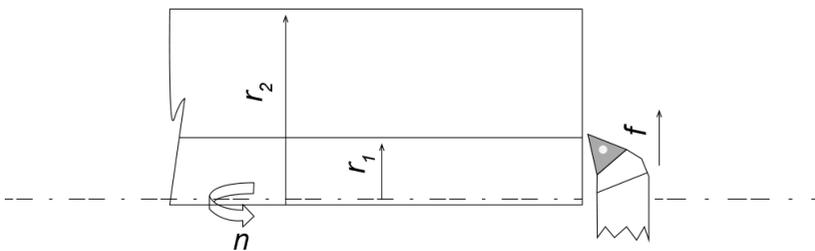


Figura 7.5 – Representação esquemática de uma usinagem de faceamento

Desta forma, para uma posição r da ferramenta, é possível escrever que:

$$n(r) = \frac{1000 \times v_c}{2 \times \pi \times (r_2 - r)} \quad 7.31$$

por outro lado,

$$v_f = \frac{dr}{dt_c} = f \times n(r) = \frac{1000 \times f \times v_c}{2 \times \pi \times (r_2 - r)} \quad 7.32$$

e assim,

$$dt_c = \frac{2 \times \pi \times (r_2 - r)}{1000 \times f \times v_c} d(r) \quad 7.33$$

Integrando-se ambos os lados da equação (7.33), tem-se:

$$t_c = \int_0^{(r_2 - r_1)} \frac{2 \times \pi \times (r_2 - r)}{1000 \times f \times v_c} d(r) \quad 7.34$$

ou, ainda

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times [(r \times r_2) - (r_2^2/2)]}{1000 \times f \times v_c} \Big|_0^{(r_2 - r_1)} \quad 7.35$$

Em seqüência é expandida e simplificada a equação (7.35)

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times [(r_2(r_2 - r_1) - (r_2 - r_1)^2/2)]}{1000 \times f \times v_c} \quad 7.36$$

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times [r_2^2 - r_2 r_1 - r_2^2/2 + r_1^2/2 + r_2 r_1]}{1000 \times f \times v_c} \quad 7.37$$

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times [r_2^2/2 - r_1^2/2]}{1000 \times f \times v_c} \quad 7.39$$

$$t_c = \frac{2 \times \pi \times [(r_2 - r_1) \times (r_2 + r_1)/2]}{1000 \times f \times v_c} \quad 7.40$$

Lembrando que $l_f = (r_2 - r_1)$ tem-se finalmente que:

$$t_c = \frac{\pi \times l_f \times (r_2 + r_1)}{1000 \times f \times v_c} = \frac{G_{v\text{face}}}{v_c} \quad 7.41$$

Onde $G_{\eta_{face}}$ é o coeficiente de v_c para torneamento de faceamento.

7.4.5 – Cálculo do tempo de corte para uma geometria genérica com rotação constante parametrizada

Não é recomendado o uso de rotação constante na prática da usinagem.

Entretanto duas situações podem ocorrer: a primeira está relacionada com o diâmetro da peça, pois, se ele for muito pequeno, a partir de um determinado valor *default* ou programado, a rotação passará a ser compulsoriamente constante quanto menor for o valor do diâmetro; a segunda é que, por motivo de segurança, por exemplo, é mais conveniente adotar rotação constante. Assim, para o cálculo do tempo de corte para os casos de rotação constante, ocorrerá variação da velocidade de corte sempre que o diâmetro da peça variar.

Seja a mesma peça genérica da figura 7.2. Para qualquer valor de x , pode-se afirmar que:

$$v_f(x) = f \times n \quad 7.42$$

mas, de acordo com a equação (7.12), tem-se que

$$f \times n = \frac{dx}{dt_c} \times \sqrt{1 + r'(x)^2}$$

ou

$$f \times n \times dt_c = [\sqrt{1 + r'(x)^2}] dx \quad 7.43$$

Integrando-se ambos os membros da igualdade, tem-se:

$$t_c = \frac{1}{f \times n} \int_{x_0}^{x_1} [\sqrt{1 + r'(x)^2}] dx \quad 7.44$$

A equação (7.44) é genérica e permite calcular o tempo de corte para qualquer geometria que seja possível de ser representada por uma

linha geratriz de um corpo sólido e sua equação em torno de um eixo girando com rotação constante.

Para validar a equação (7.44), ele será aplicada para o caso do torneamento ou mandrilamento de um cilindro com rotação constante. Por ser o diâmetro também constante, $r'(x) = \text{zero}$. Então a equação (7.44) fica:

$$t_c = \frac{1}{f \times n} \int_0^{x_1} dx = \frac{x_1}{f \times n} \quad 7.45$$

ou

$$t_c = \frac{l_f}{f \times n} = \frac{G_{ncil}}{n} \quad 7.46$$

Onde G_{ncil} é o coeficiente de n para peças cilíndricas. A equação 7.46 calcula o valor do tempo da mesma forma que ele é calculado quando todos os parâmetros de corte são mantidos constantes, como ocorre com um cilindro. Fica assim demonstrado que a equação (7.44) genérica está correta.

7.4.6 – Cálculo do tempo de corte para peças cônicas com rotação constante

A figura 7.3 representa esquematicamente um cone.

Considerando-se a equação (7.44) e lembrando a equação (7.21) pode-se escrever a sequência de igualdades, a saber:

$$t_c = \frac{1}{f \times n} \int_0^{x_1} [\sqrt{1+a^2}] dx = \frac{x_1 \times \sqrt{1+a^2}}{f \times n} = \frac{l_f \times \sqrt{1+(r_2-r_1)^2}}{f \times n} \quad 7.47$$

E então, finalmente a equação (7.47) permite calcular o tempo de corte para uma peça cônica com rotação constante.

$$t_c = \frac{\sqrt{l_f^2 + (r_2 - r_1)^2}}{f \times n} = \frac{G_{ncone}}{n} \quad 7.47$$

Onde G_{ncone} é o coeficiente de n para peças cônicas.

7.4.7 – Cálculo do tempo de corte para peças esféricas com rotação constante

A figura 7.4 representa esquematicamente uma peça esférica que deverá ser usinada com rotação constante.

A equação (7.28) foi deduzida para cálculo do tempo de corte de uma peça esférica com velocidade de corte constante. Substituindo-se seu valor na equação (7.44) tem-se:

$$t_c = \frac{1}{f \times n} \int_{x_0}^{x_1} \left[\sqrt{1 + \frac{(x-R)^2}{R^2 - (x-R)^2}} \right] dx \quad 7.48$$

e, finalmente, a equação (7.49) permite o cálculo do tempo de corte para uma esfera utilizando-se rotação da peça constante.

$$t_c = \frac{R}{f \times n} \left[\arcsen \left(1 - \frac{x_0}{R} \right) - \arcsen \left(1 - \frac{x_1}{R} \right) \right] = \frac{G_{nesf}}{n} \quad 7.49$$

Onde G_{nesf} é o coeficiente de n para peça esférica.

7.4.8 – Cálculo do tempo de corte para faceamento de peças com rotação constante

Neste caso $r(x) = 0$. Então a equação (7.44) fica:

$$t_c = \frac{1}{f \times n} \int_0^{x_1} [\sqrt{1+0}] dx = \frac{l_f - 0}{f \times n} \quad 7.50$$

mas,

$$l_f = (r_2 - r_1) \quad 7.51$$

Então, o cálculo do tempo de corte para um torneamento de faceamento com rotação constante é dado pela equação (7.52).

$$t_c = \frac{(r_2 - r_1)}{f \times n} = \frac{G_{nface}}{n} \quad 7.52$$

Onde G_{nface} é o coeficiente de n para torneamento de faceamento.

A tabela 7.1 resume as equações para cálculo de todas as geometrias, tanto para velocidade de corte constante como para rotação constante. Resume também os coeficientes da velocidade de corte constante e para a rotação constante.

Tabela 7.1 – Resumo das equações desenvolvidas para cálculo dos tempos de corte em geometrias complexas para Torneamento e Mandrilamento¹

Geometria da Peça (vc cte)	Equações para Velocidade de Corte constante	Coefficientes G_{vi} para velocidade de corte constante
Cilíndrica	$\frac{2\pi l_f}{1000 f v_c}$	$\frac{2\pi r l_f}{1000 f}$
Cônica	$t_c = \frac{2\pi}{1000 f v_c} \sqrt{1+(r_2-r_1)^2} \left[\frac{(r_2-r_1) l_f^2}{2} + r_1 l_f \right]$	$\frac{2\pi}{1000 f} \sqrt{1+(r_2-r_1)^2} \left[\frac{(r_2-r_1) l_f^2}{2} + r_1 l_f \right]$
Esférica	$\frac{2\pi l_f}{1000 f v_c} R$	$\frac{2\pi l_f}{1000 f} R$
Face	$\frac{\pi l_f (r_2 + r_1)}{1000 f v_c}$	$\frac{\pi l_f (r_2 + r_1)}{1000 f}$
Geometria da Peça (n cte)	Equações para rotação constante	Coefficientes G_{ni} para rotação constante
Cilíndrica	$\frac{l_f}{f \times n}$	$\frac{l_f}{f}$
Cônica	$\frac{\sqrt{l_f^2 + (r_2 - r_1)^2}}{f \times n}$	$\frac{\sqrt{l_f^2 + (r_2 - r_1)^2}}{f}$
Esférica “Semi esfera”	$t_c = \frac{R}{f \times n} \left[\arcsen\left(1 - \frac{x_0}{R}\right) - \arcsen\left(1 - \frac{x_1}{R}\right) \right]$	$\frac{R}{f} \left[\arcsen\left(1 - \frac{x_0}{R}\right) - \arcsen\left(1 - \frac{x_1}{R}\right) \right]$
Face	$\frac{(r_2 - r_1)}{f \times n}$	$\frac{(r_2 - r_1)}{f}$

¹ O desenvolvimento teórico das equações apresentadas neste livro foi realizado com a participação indispensável do Professor Doutor Jose Mario Martinez Perez, do Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Endereço CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8543703316798123>

Trabalhos de laboratório foram realizados para verificar se os tempos de corte calculados pelas equações são reproduzidos na prática. Foi observada a perfeita reprodução dos valores entre os cálculos teóricos e práticos, a menos de características da máquina que, eventualmente, pode introduzir erros.



Figura 7.6 – Situação em que a geometria da peça é simples e fica fácil cronometrar o tempo de corte

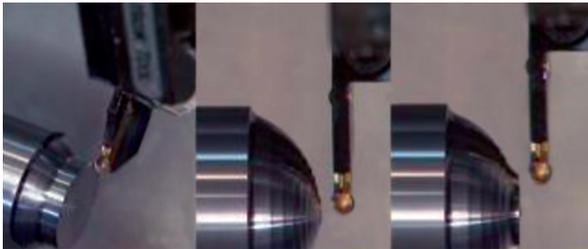


Figura 7.7 – Da esquerda para a direita é apresentada uma seqüência de momentos de usinagem de uma peça, com rapidez impossível de ser cronometrada

7.5 – Medida do tempo de corte

7.5.1 – Cronometragem do tempo de corte

Cronometrar o tempo de corte é, geralmente, uma tarefa tão mais difícil quanto maior for a complexidade da peça e os movimentos realizados pela ferramenta desde o início até o final da usinagem. Os movimentos em máquinas CNC são muito rápidos e é neste aspecto que se encontra a principal dificuldade.

Neste caso, cada situação deve ser examinada. Casos existirão em que medir o tempo de corte é melhor, porque durante a usinagem fica fácil separar os tempos passivos ou o contrário.

Entretanto, o que ocorre com maior frequência é que tanto os tempos passivos como os tempos de corte compõem alternados com frequência alta e muita rapidez fazendo com que seja impossível a cronometragem. A figura 7.6 ilustra uma situação fácil de cronometrar o tempo de corte por ser um torneamento cilíndrico. Na verdade, é também muito fácil de calcular esse tempo. A figura 7.7 ilustra uma situação em que é praticamente impossível de fazê-lo.

Concluí-se, portanto, que cronometrar o tempo de corte será recomendado para situações muito especiais e viáveis.

As máquinas CNC modernas são dotadas de sensores que leem e armazenam o tempo máquina de produção. Infelizmente, tais sensores medem o tempo transcorrido entre o início do movimento da ferramenta quando esta parte do ponto de troca até que ela retorne a esta mesma posição depois de percorrer todo o percurso necessário para usinar a peça. Este tempo é, portanto, a soma do tempo de corte com o tempo de aproximação e afastamento da ferramenta $t_{ap/af}$ definido anteriormente. Deve-se ressaltar que podem existir máquinas que já calculam o tempo de corte separadamente. Neste caso, a proposta fica mantida apenas quando for necessário ter o valor do tempo de corte para planejamento e controle fora da máquina.

7.5.2 – Medida do tempo de corte por visão computacional

A seguir será apresentado um exemplo de um método de medida do tempo de corte baseado em visão computacional.

Visão computacional pode ser definida como uma subárea da técnica de processamento de imagem. Permite que um computador possa reconhecer objetos em imagens que imitam algumas funcionalidades do sistema visual humano.

É utilizada atualmente para: visão de robôs, veículos autônomos, vigilância, reconhecimento automático das placas de carros, inspeção industrial etc. Em usinagem, já é utilizada no controle da qualidade das peças em produção, na calibração de dispositivos elétricos, na análise das condições de ferramentas de corte, na medição da rugosidade da superfície, no desgaste das ferramentas etc.

A abordagem do uso de visão de computacional para medir o tempo

de corte e os tempos passivos que ocorrem com aproximação e afastamento da ferramenta durante o processo de usinagem pode ser descrita como segue: na primeira etapa, um filme de vídeo é realizado durante a fabricação de uma peça. Um programa computacional, que não será objeto de apresentação neste livro, adéqua o filme para que ele possa processar os momentos em que existe ou não contato entre a ferramenta e a peça.

O exemplo apresentado a seguir mostra apenas o potencial do método para medida do tempo de corte e abre a possibilidade para desenvolvimentos futuros. Além disso, é bastante didático no sentido de mostrar os tempos ativos e passivos que ocorrem durante a usinagem. Tal exemplo foi desenvolvido pelo autor e seus coautores (de Melo et al, 2012).

Outros métodos computacionais e/ou com uso de dispositivos poderão ser utilizados com o mesmo fim de medir os tempos de ativos e passivos de usinagem. Alguns exemplos podem ser citados: medida do tempo de corte pela verificação do contato ou não da ferramenta durante a usinagem via captação do som ou da passagem de corrente elétrica ou ainda pela medida dos esforços de corte, com uso de dinamômetros.

A figura 7.8 mostra os quatro momentos diferentes ou passos de uma operação de torneamento.

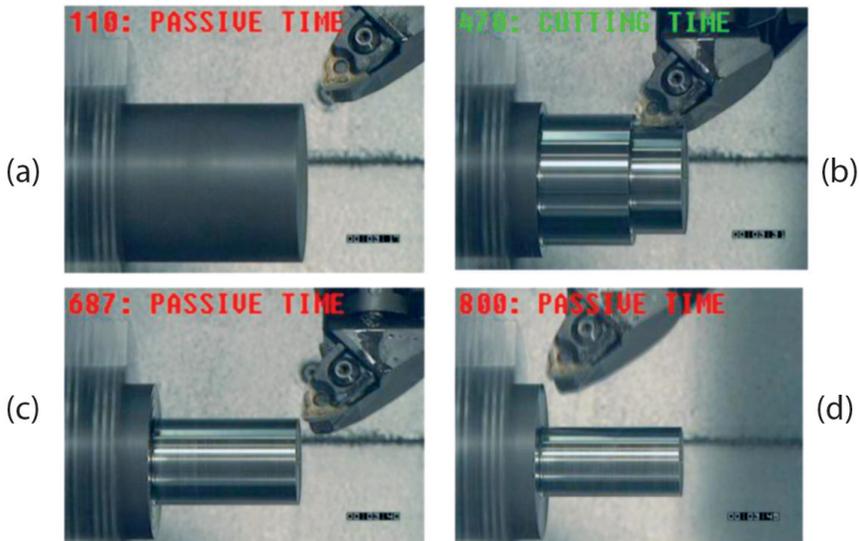


Figura 7.8 – Medida dos tempos durante a evolução do processo de usinagem: (a) início do corte “aproximação” da ferramenta; (b) e (c) momentos intermediários do corte, (d) fim da usinagem

Nas Figura 7.8 a, b, c e d sempre que a informação no topo de cada uma for verde estará sendo registrado um tempo ativo (tempo de corte). Quando, ao contrário for vermelho, estará registrando um tempo de aproximação ou afastamento.

Na figura (7.9) pode ser visto o resultado da medição do tempo de corte e de tempo passivo obtido após análise do vídeo gravado durante toda a usinagem.

```
SIMVICO - Results of Proces-  
  
Frames Analyzed =  
Cutting time... = 21.60 seconds =>  
Passive time... = 10.40 seconds =>  
Processing time = 32.00
```

Figura 7.9 – Resultados da medida do tempo de corte e tempos passivos por visão computacional

O tempo de corte medido foi de 21,60 s e o tempo de aproximações e afastamentos da ferramenta foi de 10,40 s.

O método de medida do tempo de corte por visão computacional foi comparado com medidas por cronômetro, possíveis de serem realizadas neste caso, e mostrou erros desprezíveis.

Um dos aspectos mais relevantes diante dos resultados obtidos nesta experiência é que realmente utilizar o tempo medido pelo cronômetro interno da máquina e interpretá-lo como sendo o tempo de corte, pode levar a erros tão maiores quanto maior for a diferença entre os tempos totais de aproximação e afastamento da ferramenta e o tempo de corte. No caso mostrado pela figura 7.9, por exemplo, o percentual de erro foi de 50%.

Infelizmente, o método de medida do tempo de corte por visão computacional não apresenta eficiência quando a usinagem ocorre com alta frequência de contato/não contato entre a ferramenta e a peça.

Assim é que o método por visão computacional ou outros métodos que possam detectar o contato ferramenta/peça abre um horizonte para realização da medida mais precisa e adequada do tempo de corte. Além disso, permitirá utilizar o resultado diretamente em sistemas computacionais que assistem o processo de usinagem de forma automática.