



Manufatura Mecânica: Usinagem

Manufatura Mecânica: Usinagem

Samuel José Casarin

© 2018 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Roberto Mac Intyer Simões

Ismael Emílio de Oliveira Júnior

Editorial

Camila Cardoso Rotella (Diretora)

Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Letícia Bento Pieroni (Coordenadora)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Casarin, Samuel José

C334m Manufatura mecânica: usinagem / Samuel José

Casarin. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional

S.A., 2018.

216 p.

ISBN 978-85-522-0737-5

1. Manufatura. 2. Usinagem. I. Casarin, Samuel José.

II. Título.

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

CDD 680

2018

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 – Londrina – PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Fundamentos relacionados aos processos de usinagem	7
Seção 1.1 - Fundamentos de processos de usinagem	9
Seção 1.2 - Parâmetros de usinagem	23
Seção 1.3 - Materiais de ferramentas de corte; forças e potências	39
 Unidade 2 Processos convencionais de usinagem	 57
Seção 2.1 - Torneamento	59
Seção 2.2 - Fresamento	74
Seção 2.3 - Furação, retificação, mandrilamento, roscamento e serramento	88
 Unidade 3 Processos não convencionais de usinagem	 105
Seção 3.1 - Processos não convencionais de usinagem: características gerais e aplicações	107
Seção 3.2 - Processos químicos e eletroquímicos: eletroerosão, feixe de elétrons e químicos	122
Seção 3.3 - Processos não convencionais de usinagem diversos: jato d'água, laser, abrasivo, plasma e ultrassom	137
 Unidade 4 Centros de usinagem e CNC	 155
Seção 4.1 - Manufatura Mecânica: Usinagem	157
Seção 4.2 - Sistemas de eixos e de coordenadas; programação em máquinas CNC	177
Seção 4.3 - Conceitos básicos de CAD/CAM aplicados à usinagem	197

Palavras do autor

Caríssimo aluno, seja bem-vindo ao mundo dos processos de usinagem mecânica nesta disciplina de Manufatura Mecânica: Usinagem. Esta é, sem dúvida, uma das disciplinas de grande importância da área mecânica, pois envolve temas relacionados aos processos de fabricação cujos conhecimentos são de suma importância para os profissionais dessa área.

Um dos principais objetivos do estudo da Manufatura Mecânica: Usinagem é fazer com que você conheça, compreenda e saiba interpretar as principais características dos processos de fabricação ditos convencionais e não convencionais, envolvendo, entre outras coisas: maquinários, ferramentas, parâmetros de usinagem, uso de EPI (equipamento de proteção individual), características peculiares de cada processo e avanços tecnológicos (tais como o uso de equipamentos chamados CNC – comandos numéricos computadorizados que também caracterizam os chamados centros de usinagem). Esses conhecimentos serão adquiridos, passo a passo, desenvolvendo a criatividade ao estudarmos os tópicos que abrangem as diversas unidades e seções desta disciplina.

Por isso você, aluno, deve conhecer e compreender os fundamentos básicos relacionados aos processos de usinagem; conhecer, compreender e ser capaz de realizar os procedimentos básicos relacionados aos principais processos convencionais de usinagem; conhecer, compreender e ser capaz de realizar os procedimentos básicos relacionados aos principais processos não convencionais de usinagem; e, finalmente, conhecer, compreender e ser capaz de realizar as funções básicas de programação de comando numérico trabalhando com centros de usinagem e CNC.

Portanto, meu caro aluno, reforçamos aqui o convite para que você se aprofunde nos estudos da Manufatura Mecânica: Usinagem, agregando uma série de conhecimentos e competências importantíssimos para sua formação e seu futuro desempenho no mercado de trabalho. Bem-vindo aos estudos!

Fundamentos relacionados aos processos de usinagem

Convite ao estudo

Embora possa parecer um assunto extremamente complexo, o tema desta nossa primeira unidade de ensino, que trata dos fundamentos dos processos de usinagem, faz parte da nossa vida sem que percebamos a sua existência. Por exemplo, na sala de aula, ao fazer suas anotações de aula ou ao resolver um exercício a lápis, eventualmente a ponta desse lápis pode se desgastar ou quebrar. Para resolver esse problema você recorre ao apontador de lápis. Tal operação – a de apontar o lápis com o apontador – trata-se de uma operação básica de usinagem que realizamos sem perceber. O apontador, em conjunto com a lâmina de corte, constitui, respectivamente, a máquina e a ferramenta, enquanto o lápis é a peça usinada!

Assim, caro aluno, ao longo desta unidade você vai conhecer e compreender os fundamentos dos processos de usinagem dos metais, englobando o conhecimento de ferramentas e máquinas-ferramenta, variáveis de usinagem, CNC e os principais processos de usinagem. Para entender e analisar os processos de usinagem existentes nas indústrias, os conteúdos que desenvolveremos aqui serão de importância fundamental. Veremos, ao longo desta unidade, conceitos de usinagem e suas aplicações focados em: fundamentos de processos de usinagem; parâmetros de usinagem e; materiais de ferramentas de corte, características dos cavacos, uso de fluidos refrigerantes, além de cálculo de força e potência de usinagem.

Nesta unidade, estaremos focados em uma oficina de usinagem que realiza serviços para terceiros (no caso, uma indústria de peças automotivas). Essa oficina tem uma linha de produção de eixos de transmissão para automóveis e quer alterar

o tipo de aço utilizado para a fabricação desse eixo por um novo material, a partir da solicitação de um novo cliente.

Você será incentivado a solucionar diversos problemas, tais como calcular velocidade de corte, tempo de corte, força e potência de corte, e especificar qual a melhor ferramenta com base no material usinado. Igualmente importante, caberá a você especificar quais as “condições econômicas de corte” para um determinado processo de usinagem de um eixo.

Trabalhar na área de usinagem exige uma série de conhecimentos que nos permitam responder questões tais como: qual o processo de usinagem mais indicado para a fabricação de uma peça específica? Qual ferramenta devo utilizar para obter os melhores resultados na usinagem? Quais as melhores condições econômicas de usinagem que permitirão otimizar o processo de fabricação com os menores custos? Quais os parâmetros de usinagem mais apropriados para uma determinada operação de usinagem e quais os cálculos envolvidos?

Os conteúdos dos quais trataremos nesta unidade de ensino, como conceitos fundamentais dos processos de usinagem; tipos de ferramentas e máquinas básicas relacionadas aos processos mecânicos de usinagem; ferramentas de geometria definida e ferramentas de geometria não definida; velocidade de avanço e de corte, profundidade de corte, direções de movimento e avanço, características gerais de cavacos; o uso de fluidos de corte; as condições econômicas de corte e os cálculos de força e potência de usinagem, capacitarão você a compreender muitos fenômenos dos processos mecânicos de usinagem.

Vamos então aos nossos estudos!

Seção 1.1

Fundamentos de processos de usinagem

Diálogo aberto

Caríssimo aluno, você está iniciando os estudos na disciplina Manufatura Mecânica: Usinagem, que aborda conteúdos de extrema importância para sua formação e futura atuação profissional. Nesta primeira seção, você vai estudar e conhecer os conceitos introdutórios sobre usinagem e histórico da sua evolução tecnológica; a classificação e nomenclatura dos processos mecânicos de usinagem; as ferramentas e máquinas básicas dos processos de usinagem; a descrição dos principais processos de usinagem: com ferramentas de geometria definida e de geometria não definida; e a velocidade de avanço, de corte, a profundidade de corte, as direções de movimento e o avanço. O aprendizado desses conteúdos vai lhe habilitar para, futuramente, atuar em empresas do setor metalomecânico, por exemplo, nas indústrias do setor de peças automotivas.

Lembre-se de que, embora possa parecer um assunto extremamente complexo, o tema desta nossa primeira unidade de ensino, que trata dos fundamentos dos processos de usinagem, faz parte da nossa vida sem que percebamos a sua existência. Vide, por exemplo, a simples tarefa de se apontar um lápis com um apontador. Esse simples exemplo introdutório nos serve de referência para nos lembrarmos de que os processos de usinagem existem há muito tempo em termos cronológicos, alcançando padrões tecnológicos incríveis nos dias atuais tanto em termos de máquinas-ferramenta (advento de complexos sistemas de usinagem integrados por CNC como das próprias ferramentas de corte em termos de novos materiais para ferramentas).

Com base no estudo que estamos iniciando, suponha que você foi contratado por uma oficina de usinagem e, em seu primeiro trabalho, seu gerente incumbiu-o de realizar a seguinte tarefa: a linha de produção do eixo que é usado na transmissão de automóveis alterou o tipo de aço utilizado, até então o aço carbono temperado (SAE 1045), para a fabricação desse eixo devido a não conformidades encontradas em ensaios de utilização do eixo. Sabendo que o novo

material solicitado pelo novo cliente é o aço extraduro 1060, você foi incumbido de calcular alguns parâmetros de corte. Considerando os seguintes dados fornecidos pelo responsável do setor de usinagem, você deverá estabelecer os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte. Qual a expressão que pode ser utilizada no cálculo de velocidade de usinagem? Quais parâmetros influenciam nos cálculos? Considere que a peça a ser usinada tem diâmetro de 30 mm e a máquina operatriz trabalha em uma rotação de 500 rpm com avanço de 1,0 mm/rotação, e o diâmetro inicial D do material a ser usinado é 40 mm.

Finalmente, meu caro aluno, os conteúdos que serão estudados para resolvermos essa problematização vão nortear os trabalhos futuros nesta disciplina que, com certeza, é de extrema importância para o profissional da área de engenharia mecânica e afins. Portanto, dedique-se ao máximo e bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno, os processos de usinagem, em termos cronológicos, existem praticamente desde a Idade da Pedra, quando o homem primitivo os praticava sem ter consciência de que estava realizando um processo de usinagem. Falamos aqui da ação de usar pedras lascadas (portanto afiadas) para fabricar e afiar lanças de caças, como foi descoberto por registros arqueológicos. Porém, para nos situarmos mais próximos de nosso tempo, podemos partir da data de 1565, quando temos o registro do primeiro torno – torno a arco –, de construção muito rudimentar e ainda focado em usinar madeira (material muito usado na época tanto na indústria naval como na insipiente indústria mecânica).

Somente na época da Revolução Industrial (século XVIII), com o advento das máquinas a vapor, a necessidade de fabricar peças de ferro, latão e bronze e, posteriormente, de aço passaram a exigir máquinas-ferramenta capazes de “tornear” metais. Assim foram surgindo as mandriladoras, os tornos, as retificadoras, as fresadoras, entre outras máquinas. Até por volta da década de 1940, os processos ditos “convencionais” de fabricação dominaram os processos de usinagem; a partir de então, surgiram os primeiros equipamentos para

as chamadas “usinagens não convencionais” de peças de geometria mais complexas e de maior grau de dificuldade de serem usinadas pelos processos vigentes até então. Somente por volta da década de 1990, com o crescimento da informática e de software, passamos a ter as máquinas comandadas por computador, as máquinas CNC, que permitiram o surgimento dos centros de usinagem integrados atuais.

Podemos definir usinagem como sendo o processo de remoção de material, que ao conferir à peça forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer desses itens, produz cavacos que são porções removidas do material usinado. A usinagem pode ser realizada, ainda, com ou sem o uso de fluidos lubrificantes ou refrigerantes.

A Figura 1.1 mostra os principais processos de fabricação mecânica convencional e não convencional. Podemos classificar os processos de fabricação em dois grandes grupos: (i) com remoção de cavaco (no qual vamos nos concentrar); e (ii) sem remoção de cavaco. Note que, no caso do grupo da usinagem, temos as subdivisões em convencional e não convencional, que é o que estudaremos na nossa disciplina.

Figura 1.1| Classificação dos processos de fabricação por usinagem



Caro aluno, a Figura 1.1 apresentada serve para nos orientar a respeito de praticamente todos os processos de fabricação existentes e, portanto, será de grande importância para consulta ao longo dos nossos estudos.



Assimile

Observe, no Quadro 1.1, como podemos relacionar cada processo de usinagem com suas respectivas máquinas-ferramenta e suas ferramentas de corte.

Quadro 1.1 | Processos de usinagem convencional e suas respectivas máquinas-ferramenta e ferramentas de corte

Processo de Usinagem	Máquina-Ferramenta	Ferramenta de Corte
Torneamento	Torno	Pastilhas
Fresamento	Fresadora	Fresas ou Disco de Fresa
Mandrilamento	Mandriladora	Mandril (haste) com ferramenta de corte acoplada
Furação	Furadeira	Brocas
Rosçamento	Rosqueadeira	Machos
Brunimento	Brunidoras	Régua Diamantadas e Abrasivas
Retificação	Retificadora	Rebolos
Aplainamento	Plana Limadora	Pastilhas de metal duro ou ferramentas de aço rápido
Alargamento	Alargadores Manuais	Alargadores (hastes)
Serramento	Serradeira	Serras

Fonte: elaborado pelo autor.

Descrição dos principais processos de usinagem: com ferramentas de geometria definida e com ferramentas de geometria não definida

Os processos mecânicos de usinagem podem ser classificados em duas categorias: (i) os processos de usinagem que utilizam ferramentas com geometria definida (torneamento, fresamento, furação, rosqueamento, alargamento, brochamento, serramento e aplainamento) que são aquelas que, como o próprio nome diz, possuem geometria bem definida quanto à forma geométrica e

ângulos; e (ii) os processos de usinagem que utilizam ferramentas de geometria não definida (exemplos: retificação, brunimento, polimento, lapidação, jateamento, tamboreamento) que são aquelas que, por exemplo, utilizam grãos abrasivos ligados (retificação) ou não (jateamento) para a realização do processo de usinagem ou mesmo em processos não convencionais que utilizam eletrodos (eletroerosão), em que a remoção de material se dá via diferenças de potencial (ddp).

Podemos perceber que as ferramentas de geometria definida são aplicadas predominantemente em processos de desbaste do material (pastilhas de torneamento, por exemplo), enquanto que as ferramentas de geometria não definidas são utilizadas, predominantemente, em processos de acabamento da peça (rebolos abrasivos, por exemplo).

As ferramentas de geometria definida, por serem utilizadas mais em processos de desbaste, são aquelas indicadas para grandes remoções de materiais (cavacos). Por outro lado, as ferramentas de geometria não definida removem pouco cavaco, indicadas, portanto, para operações de acabamento.



Refleta

Os processos de manufatura mecânica evoluíram significativa nas três últimas décadas. A Indústria 4.0 é a tendência atual, em que um novo modelo de produção envolvendo inovações tecnológicas, sistemas de controle, automação e TI (tecnologia da informação) aplicados aos sistemas de manufatura impactará na produção e customização de produtos/peças. Seria o fim dos atuais processos de manufatura por usinagem nas fábricas?

Velocidade de avanço e de corte, profundidade de corte, direções de movimento e avanço

Os processos de usinagem são regidos por variáveis que são conhecidas como "*parâmetros de usinagem*", que são estabelecidas para a adequada usinagem de peças. Para tanto, são levados em consideração os seguintes "*parâmetros de usinagem*": velocidade de avanço (v_f), velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p), avanço (f ou a), rotação n (em rpm), tempo de usinagem (t_u) entre outros (potência e força de corte) que veremos mais adiante.

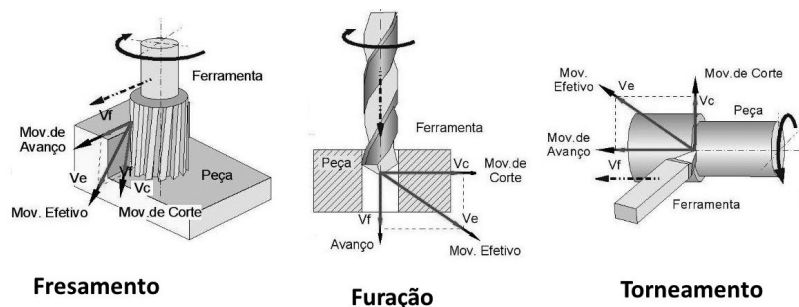
Vamos, portanto, concentrar-nos em definir esses parâmetros de usinagem:

Velocidade de corte v_c : é a velocidade observada na ponta da ferramenta junto à peça usinada. As velocidades de corte podem ser extraídas a partir de tabelas que associam a velocidade ao material da ferramenta de corte. A velocidade de corte é influenciada pelos seguintes principais fatores: material da peça, material da ferramenta (pastilha) e a velocidade de avanço aplicada. A velocidade de corte é calculada em [m/min].

Avanço f ou a : é o deslocamento que a ferramenta de corte (ou a peça) faz em uma volta da peça (ou da ferramenta). O avanço pode ser quantificado em mm/rotação.

A Figura 1.2 ilustra como são representadas vetorialmente as velocidades de corte e de avanço em alguns processos de usinagem.

Figura 1.2 | Velocidades de corte, de avanço e velocidade efetiva de corte em diversos processos de usinagem



Fonte: adaptada de: <<http://slideplayer.com.br/slide/1235150/>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

As expressões para cálculo de velocidade de corte v_c e de rotação n são expressas da seguinte maneira:

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} (m/min) \quad [1.1]$$

Em que d é o diâmetro do eixo ou do elemento girante (mm), e n é a rotação do eixo (rpm) e 1000 é o fator de conversão de milímetros (mm) para metro (m).

A velocidade de avanço v_f pode ser assim calculada:

$$v_f = f \times n = f_z \times z \times n = \frac{f \times 1000 \times v_c}{\pi \times d} (mm/min) \quad [1.2]$$

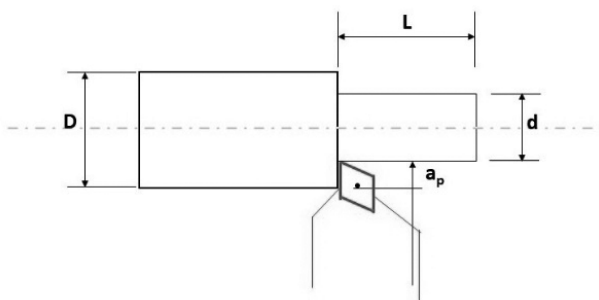
Em que f é o avanço por volta (mm/rotação), que é dado por: $f_z \times z$ (em que f_z é o avanço por dente e; z é o número de dentes da fresa); d é o diâmetro da peça ou do elemento girante em (mm) e; n é a rotação (rpm). Quando não se trata de fresa, e temos, por exemplo, um torno, o parâmetro z é igual a 1,0, pois uma pastilha de torneamento pode ser considerada como sendo um único dente de corte, assim, $z = 1,0$ e $f = f_z$.

Profundidade de corte (a_p): é largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No processo de usinagem por torneamento, o cálculo é feito da seguinte maneira:

$$a_p = \frac{D-d}{2} (mm) \quad [1.3]$$

Em que D é o diâmetro inicial da peça usinada (mm) e d é o diâmetro final (mm), como ilustra a Figura 1.3:

Figura 1.3| Profundidade de corte a_p em uma peça cilíndrica torneada



Fonte: elaborada pelo autor.

Podemos, ainda, calcular o tempo de corte, que é o tempo gasto para usinar parte da peça ou a peça inteira. A expressão para cálculo de tempo de corte é a seguinte:

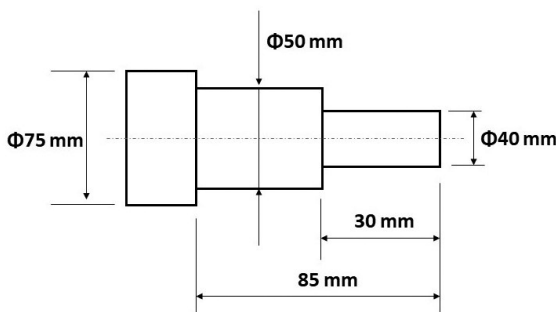
$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v_f} = \frac{l}{n \times f} \quad [1.4]$$

Em que Δs é o comprimento usinado = l (mm).



Suponha que você vai usinar uma peça conforme desenho indicado na Figura 1.4. Você deverá calcular o tempo total de corte para usinar a peça do desenho, considerando que serão dados dois passes, o primeiro passe torneando o diâmetro de 50 mm e o segundo torneando o diâmetro de 40 mm. São fornecidos os seguintes parâmetros: $v_c = 25 \text{ m/min}$ e $f = 0,40 \text{ mm/rotação}$.

Figura 1.4| Peça a ser torneada



Fonte: elaborada pelo autor.

A usinagem inicia-se pelo diâmetro de 50 mm e comprimento 85 mm (primeiro passo). Logo, podemos calcular a rotação (n) da peça:

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \Rightarrow n_1 = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times d} = \frac{25 \times 1000}{\pi \times 50} \approx 160 \text{ rpm}$$

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta s}{v_f} = \frac{l}{n \times f} = \frac{85}{160 \times 0,45} = 1,18 \text{ min}$$

Na segunda parte da usinagem (segundo passo), será usinado o diâmetro de 40 mm e comprimento 30 mm. Assim:

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \Rightarrow n_2 = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times d} = \frac{25 \times 1000}{\pi \times 40} = 199 \text{ rpm}$$

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta s}{v_f} = \frac{l}{n \times f} = \frac{30}{199 \times 0,45} = 0,32 \text{ min}$$

Desse modo, o tempo total de usinagem é a soma de $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 1,18 + 0,32 = 1,50 \text{ min}$

Note, meu caro aluno, que os parâmetros de usinagem calculados nessa nova situação-problema que acabamos de concluir utilizam

expressões que serão quase que rotineiras nos nossos estudos de usinagem. E vamos em frente!



Pesquise mais

Caro aluno, até o momento você estudou uma parte introdutória dos processos de usinagem, conhecendo histórico e a classificação dos processos de usinagem, máquinas e ferramentas de corte e aprendeu a calcular alguns parâmetros de usinagem. Dentro dessa temática, seria interessante você pesquisar alguns endereços na internet, principalmente vídeos, para consolidar esse primeiro contato com o mundo da usinagem.

Dicas:

- 1) <<https://www.youtube.com/watch?v=i1eBwrKzKQY>>. Acesso em: 27 ago. 2017 (é um vídeo curto de menos de 3 minutos).
- 2) <<https://www.youtube.com/watch?v=weO-9HYwi94>>. Acesso em: 27 ago. 2017 (vídeo curto de usinagem de curta duração – menos de 3 minutos).
- 3) <https://www.youtube.com/watch?v=u5QMlKkHm_Q&t=2s>. Acesso em: 27 ago. 2017 (vídeo curto de apenas 3,5 minutos).

Sem medo de errar

Caro aluno, lembrando que você foi contratado por uma oficina de usinagem e, em seu primeiro trabalho, seu gerente incumbiu-lhe de realizar a seguinte tarefa: a linha de produção do eixo que é usado na transmissão de automóveis quer alterar o tipo de aço carbono temperado (SAE 1045) utilizado, até então, para a fabricação desse eixo.

Sabendo que o novo material solicitado pelo novo cliente é o aço extraduro 1060, você foi incumbido de calcular alguns parâmetros de corte. Considerando os seguintes dados fornecidos pelo responsável do setor de usinagem, você deverá estabelecer os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte. Dados fornecidos pelo setor de usinagem: torneamento, utilize como base a expressão de cálculo de velocidade de usinagem (v_c), dada em metros/minuto, e considere que a peça a ser usinada tem diâmetro de 30 mm e a máquina operatriz trabalha em uma rotação de 500 rpm com avanço de 1,0 mm/rotação e o diâmetro inicial D do material a ser usinado é 40 mm.

Caro, iniciando a resolução dessa tarefa, temos o seguinte:

I - Dados fornecidos:

Material a ser usinado: aço extraduro 1060

Tipo de usinagem: torneamento

Diâmetro inicial (D): 40 mm

Diâmetro do eixo (d): 30 mm

Rotação (n): 500 rpm

Avanço (f): 1,0 mm/rot

II - Parâmetros a calcular:

- a) velocidade de corte (v_c);
- b) velocidade de avanço (v_f) e;
- c) profundidade de corte (a_p).

III - Cálculos:

Iniciaremos os cálculos para obter a velocidade de corte (v_c) que se trata de um dos importantes parâmetros de usinagem:

a) Velocidade de corte:

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} (m / \min) = \frac{\pi \times 30 \times 500}{1000} = 47,12 (m / \min)$$

Apenas para fins de percepção, a velocidade de corte aqui calculada (47,12 m/min) não chega a ser considerada uma velocidade elevada (há casos — é claro que depende do material e da peça a ser usinada —, em que a velocidade de corte ultrapassa os 150 m/min).

b) Velocidade de avanço:

$$v_f = \frac{f \times 1000 \times v_c}{\pi \times d} (mm / \min) = \frac{1 \times 1000 \times 47,12}{\pi \times 30} = 500 mm / \min$$

Caro aluno, note aqui que, nos itens (a) e (b), calculamos as velocidades de corte v_c e de avanço v_f em módulo. Lembre-se, sempre, que essas velocidades são grandezas vetoriais que, se somadas vetorialmente, obteremos a chamada “velocidade efetiva de corte” (v_{ec}), que podemos representar da seguinte maneira: $\vec{v}_{ec} = \vec{v}_c + \vec{v}_f$

c) Profundidade de corte:

$$a_p = p = \frac{D - d}{2} (mm) = \frac{40 - 30}{2} = 5,0 mm$$

Com os cálculos aqui realizados, você determinou os parâmetros de corte solicitados pelo seu gerente da oficina de usinagem, aplicando os conhecimentos adquiridos nesta seção inicial da disciplina Manufatura Mecânica: Usinagem.

Concluindo nossa SP e retomando a observação de que $\vec{v}_{ec} = \vec{v}_c + \vec{v}_f$, a velocidade efetiva de corte, embora não tenha sido aqui solicitada, pode ser calculada também em módulo da seguinte forma:

$$\vec{v}_{ec} = \vec{v}_c + \vec{v}_f \Rightarrow v_{ec}^2 = v_c^2 + v_f^2$$

$$v_{ec} = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{(47,12)^2 + (0,5)^2}$$

$$v_{ec} = 47,1 \text{ m/min}$$

Nesse exemplo, percebe-se a predominância da velocidade de corte v_c sobre a velocidade de avanço v_f no resultado final da velocidade efetiva de corte v_{ec} . De qualquer forma, os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo que, com certeza, seu gerente será favorável às mudanças propostas.

Avançando na prática

Análise de variação de velocidade de corte e sua influência na rotação da peça usinada

Descrição da situação-problema

Suponha que, na oficina de usinagem na qual você está trabalhando, o processo de torneamento de uma peça cilíndrica faz uso de uma velocidade de corte v_{c1} . Para fins de não forçar demais a máquina-ferramenta e o processo de usinagem, foi solicitado a você que verifique o seguinte: caso a velocidade de corte seja reduzida em 1/3 da velocidade v_{c1} , mantendo os demais parâmetros constantes, qual vai ser a variação observada na rotação do eixo? Calcule e indique em seu relatório.

Resolução da situação-problema

A solução aqui é bem simples, pois basta comparar a atual velocidade de corte v_{c1} com a nova velocidade a ser calculada.

$$v_{c1} = \frac{\pi \times d \times n_1}{1000} (m / \min) \Rightarrow n_1 = \frac{v_{c1} \times 1000}{\pi \times d}$$

A nova velocidade de corte proposta é:

$$v_{c2} = \left(1 - \frac{1}{3}\right) \times v_{c1} = \frac{2}{3} \times v_{c1}$$

Assim, a nova rotação prevista (calculada) será:

$$n_2 = \frac{\frac{2 \times v_{c1}}{3}}{\pi \times d} \times 1000 = \frac{2}{3} \times \frac{v_{c1} \times 1000}{\pi \times d} = \frac{2}{3} n_1$$

Como há uma relação diretamente proporcional entre a rotação (n) e a velocidade de corte (v_c), a variação de um desses parâmetros afeta de forma linear a variação da outra, ou seja, aumentando a velocidade de corte v_c , aumentamos a rotação n e vice-versa. Lembrando, é claro, que estamos mantendo constantes os demais parâmetros (no caso o diâmetro d da peça usinada).

Faça valer a pena

1. Os cavacos são materiais removidos das peças durante o processo de usinagem. São eles, os cavacos, que caracterizam a manufatura mecânica por usinagem. O formato do cavaco é variado, indo desde cavacos contínuos (parecidos como uma serpentina retorcida) até cavacos "lascados"; os primeiros são obtidos na usinagem de materiais maleáveis, de baixa dureza (por exemplo, aços de baixo e médio carbono), os segundos são obtidos na usinagem de materiais com nível de dureza mais elevada (por exemplo, aços de alto carbono ou aço temperado). Sejam contínuos ou "lascados", os cavacos podem proporcionar acidentes de trabalho graves, daí a necessidade do uso de EPIs (equipamentos de proteção individual) durante a realização da usinagem.

Com base no texto apresentado e na Figura 1.1 (aqui reproduzida), qual das assertivas indicadas é a verdadeira?

Figura 1.1| Classificação dos processos de fabricação por usinagem



Fonte: adaptada de Machado et al. (2011, p. 18).

Assinale a alternativa correta.

- a) Nos processos sem remoção de cavaco não há sobras de material.
- b) Só há cavaco nos processos convencionais de usinagem.
- c) Os processos sem remoção de cavaco não são caracterizados como sendo de usinagem.
- d) Na usinagem convencional, temos as etapas de desbaste e de acabamento, mas nos processos não convencionais não.
- e) Somente os cavacos contínuos são comercialmente viáveis de serem reciclados.

2. Vimos, ao longo desta primeira seção da disciplina Manufatura Mecânica: Usinagem, que os processos mecânicos de usinagem podem ser classificados em duas categorias: (i) os processos de usinagem que utilizam ferramentas com geometria definida; e (ii) os processos de usinagem que utilizam ferramentas de geometria não definida. As ferramentas de geometria definida são aplicadas predominantemente em processos de

desbaste do material, enquanto que as ferramentas de geometria não definidas são utilizadas, predominantemente, em processos de acabamento da peça.

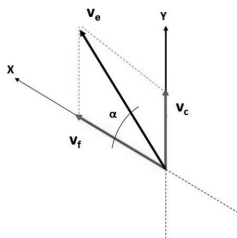
Considerando a classificação quanto à geometria das ferramentas de usinagem e suas aplicações, podemos dizer que as brocas, os rebolos de retificadoras, as pastilhas de torneamento e as fresas são, respectivamente, ferramentas de geometria:

- a) Definida, definida, definida e não definida.
- b) Não definida, não definida, definida e não definida.
- c) Definida, não definida, não definida e definida.
- d) Definida, não definida, definida e definida.
- e) Todas são de geometria definida.

3. Em uma representação do processo de usinagem de uma peça (por torneamento, por exemplo) as velocidades de corte (v_c) e de avanço (v_f) são indicadas por vetores. Logo, originalmente, são grandezas vetoriais que, quando somadas, resultam em uma velocidade efetiva de corte (v_e) que possui módulo, direção e sentido.

Representando as velocidades de corte (v_c) e de avanço (v_f) em um sistema plano (x, y), como mostra a Figura 1.5, podemos afirmar:

Figura 1.5 | Representação das velocidades de corte (v_c) e de avanço (v_f) na forma vetorial em um sistema de coordenadas (x, y)



Fonte: elaborada pelo autor.

a) $\vec{v}_e = \vec{v}_c x + \vec{v}_f y$

b) $\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f$

c) $v_c = v_e \times \cos \alpha$

d) $\arctg \frac{v_f}{v_c} = \alpha$

e) $v_f = v_e \times \text{sen} \alpha$

Seção 1.2

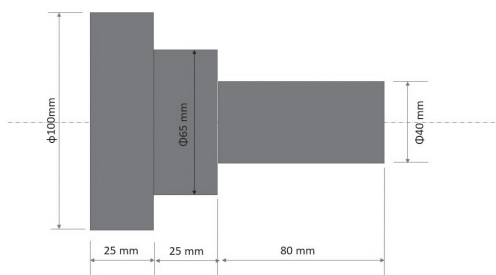
Parâmetros de usinagem

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, vamos trabalhar os seguintes conceitos: o cavaco, considerando suas características gerais, geometria, tipos, periculosidade e reciclagem; a influência da temperatura nos processos de usinagem e o uso de fluidos de corte; as condições econômicas de corte trabalhando a velocidade máxima de produção, velocidade econômica de corte e intervalo de máxima eficiência e, finalmente; as noções de operações de corte e segurança pessoal no uso de equipamentos de usinagem.

Lembre-se de que você foi contratado por uma oficina de usinagem para solucionar uma série de problemas e sua criatividade deve ser explorada ao máximo. Segundo a oficina de usinagem na qual você foi contratado, há um novo eixo a ser usinado para um novo cliente que tem o perfil indicado na Figura 1.6. Você foi incumbido de calcular o tempo de usinagem (torneamento) que será gasto para cada peça, baseando-se na área do cavaco a ser removida. Para tanto, você deverá calcular o tempo de corte " t_c " que, em linhas gerais, consiste em dividir o comprimento total " l_f " percorrido pela ferramenta pela velocidade de trabalho " v_c " utilizada. No desgaste de cada diâmetro, será usada uma profundidade de corte de 2,00 mm, avanço de 0,3 mm/rotação, velocidade de corte 150 m/min, considerando o tempo de troca de ferramenta $t_{tr} = 1,0 \text{ min}$

Figura 1.6 | Perfil do eixo a ser usinado



Fonte: elaborada pelo autor.

Você ainda deverá avaliar a necessidade ou não do uso de fluido de corte nessa operação, além de calcular as condições econômicas de corte: velocidade máxima de produção, velocidade econômica de corte. Lembre-se de que o material do eixo é o aço extraduro SAE 1060.

Finalmente, concluindo a nossa problematização, procure avaliar quais parâmetros calculados são os mais relevantes nesse processo de usinagem. Caso esses parâmetros fossem alterados, qual seria a influência no resultado final do problema aqui proposto?

Os conceitos aplicados nessa situação-problema devem ser sempre reforçados nos estudos, pois constituem elementos importantes tanto para o seu desempenho nesta disciplina como também para seu desempenho futuro como profissional de engenharia. Bons estudos!

Não pode faltar

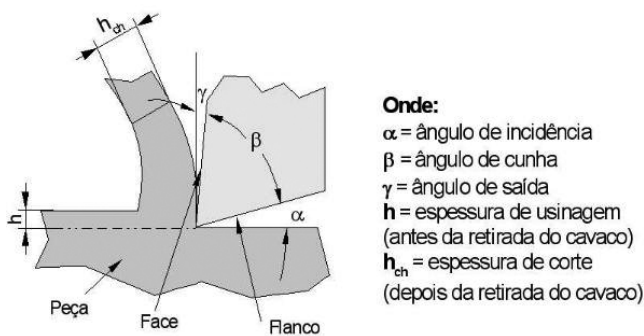
Caro aluno, vamos iniciar o estudo dos conteúdos previstos nesta seção pelas características gerais: geometria, tipos, periculosidade e reciclagem dos cavacos. Você já tinha imaginado a importância que os cavacos têm nos processos de usinagem?

Um dos elementos mais característicos dos processos de usinagem, até porque é o que define o processo de usinagem, é o cavaco. Podemos dizer que cavaco é o material extraído da peça durante o processo de usinagem, cujas características estão associadas ao material da peça que está sendo usinada, ao tipo de ferramenta de corte utilizada e aos parâmetros de usinagem aplicados (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte), entre outras.

Nos processos de usinagem, temos a etapa de desbaste, que é a etapa em que ocorre a maior quantidade de remoção de cavaco, na qual é definida a forma da peça em termos dimensionais e geométricos, e a etapa de acabamento, em que a quantidade de cavaco removida é significativamente menor que a etapa anterior, visando a dar à peça as dimensões finais, tanto geométricas quanto de acabamento superficial. A rugosidade da superfície é um parâmetro que, juntamente com os aspectos citados no parágrafo anterior, vão afetar a geometria do cavaco, como veremos a seguir. Vale destacar também, que durante a operação de usinagem, cabe ao operador

da máquina-ferramenta saber extrair o máximo da ferramenta de corte e obter a melhor taxa de remoção de material, ou seja, de cavaco. Nos processos de usinagem em que são utilizadas máquinas ferramentas do tipo universais, que são as mais simples e comuns, há a obrigatoriedade de o operador utilizar equipamento de proteção individual (EPI), pois o cavaco é um produto que pode ocasionar acidentes de trabalho, dada a sua periculosidade. A Figura 1.7 ilustra como ocorre a formação de cavaco na usinagem e os parâmetros geométricos associados.

Figura 1.7 | Formação de cavaco na usinagem e fatores geométricos envolvidos

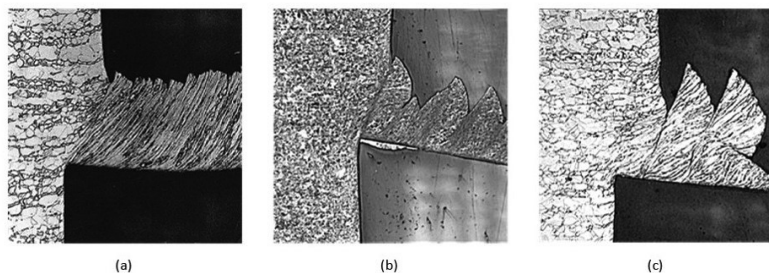


Fonte: adaptada de <goo.gl/tZ7bmC>. Acesso em: 29 set. 2017

Note que a forma do cavaco será fortemente impactada variando o ângulo de incidência α , que é o ângulo de posicionamento de corte da ferramenta e o ângulo β característico do tipo de ferramenta utilizada, pois a posição ou inclinação da ferramenta de corte define o formato do cavaco e a quantidade removida.

Basicamente, podemos classificar os cavacos, quanto à forma, em três tipos: cavacos contínuos, que são aqueles que têm um formato aparente de “serpentina” retorcida ou ondulada; cavacos descontínuos, são aqueles também conhecidos como “quebrados” ou cisalhados; e cavacos segmentados, que são aqueles que se rompem em pequenos segmentos por causa de elementos de dureza elevada presentes no material. No entanto, a Norma ISO 3685 de 1993 faz uma divisão mais refinada das formas de cavacos produzidas na usinagem de metais. Outras classificações as subdividem em contínuo, lamelar e cisalhado como ilustra a Figura 1.8.

Figura 1.8 | Formatos de cavacos: (a) Contínuo; (b) Lamelar; (c) Cisalhado



Fonte: Souza (2016, p. 54).

Vale ressaltar que o cavaco tem um valor comercial importante para as indústrias, visto que pode ser reciclado em processos de fundição para reaproveitamento da matéria-prima. Um exemplo de reaproveitamento de cavaco é a sua transformação em pó metálico para uso em processos de metalurgia do pó.



Pesquise mais

Caro aluno, a formação de cavaco em processo de usinagem é um processo que envolve cisalhamento entre a ferramenta de corte e o material. Veja no vídeo, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6c7l_mZYPwY>, acesso em: 3 set. 2017, como esse fenômeno acontece. Vale a pena!

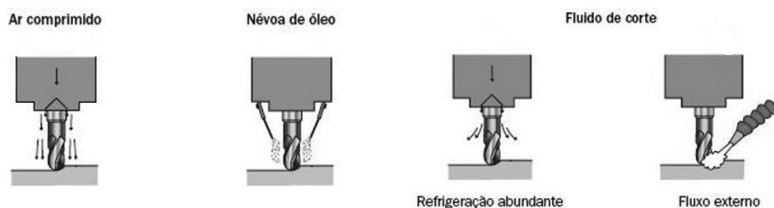
Caríssimo aluno, vejamos, na sequência, a influência da temperatura nos processos de usinagem e o uso de fluidos de corte, dando ênfase tanto ao caráter funcional quanto ao econômico.

A temperatura tem uma influência significativa nos processos de usinagem, visto que, a partir do contato entre a peça usinada e a ferramenta de corte, o atrito entre elas provoca uma elevação localizada na temperatura, que pode afetar tanto a peça como a ferramenta em termos dimensionais, de acabamento, vida útil da ferramenta etc.

Assim, dependendo das condições de usinagem (do material a ser usinado e da ferramenta de corte, em particular), o processo pode ser realizado sem ou com o uso de um fluido de corte. O fluido de corte, também chamado de lubrificante, ou ainda refrigerante, é uma solução à base de fluidos sintéticos ou emulsões (óleos solúveis ou fluidos semissintéticos) utilizada nos processos de usinagem visando

a proteger a peça usinada contra efeitos de aquecimento, proteger a ferramenta de corte quanto ao seu desgaste e vida útil, facilitar a saída (remoção) de cavaco etc. A Figura 1.9 mostra possibilidades de refrigeração durante um processo de usinagem.

Figura 1.9 | Usinagem com uso de fluido refrigerante



Fonte: <<https://goo.gl/WbB9Mg>>. Acesso em: 10 set. 2017.

Os fluidos refrigerantes ou de corte podem possuir diversas características, sejam de caráter funcional ou de caráter econômico, de tal maneira que:

i) **Referente ao aspecto funcional:** o fluido poderá contribuir para a diminuição do atrito existente entre ferramenta, peça usinada e cavaco; facilitar a saída de cavaco; auxiliar no controle de temperatura da ferramenta, colaborando, assim, para uma vida útil maior da mesma, entre outras funcionalidades.

ii) **Referente ao aspecto econômico:** fica evidente a redução de consumo de energia, de custo do ferramental utilizado e, dada a formação de uma película protetora na peça usinada, o fluido auxilia na diminuição ou até na eliminação da possibilidade de corrosão na peça.

Podemos, ainda, destacar que os fluidos refrigerantes possuem baixa viscosidade (escoam com facilidade), acentuando suas características de refrigeração e, além disso, atuam como elemento lubrificante nos processos de usinagem. Os fluidos podem ser de vários tipos, tais como: óleos minerais, fluidos miscíveis em água, gasosos e até sólidos.

Chegamos agora em um tópico de extrema importância para os processos de manufatura mecânica, que são aqueles que abordam as condições econômicas de corte: velocidade máxima de produção, velocidade econômica de corte e intervalo de máxima eficiência.

A velocidade de corte (v_c) é um dos parâmetros de usinagem que exerce grande influência na vida de uma ferramenta, afetando diretamente nas condições econômicas de corte. O tempo

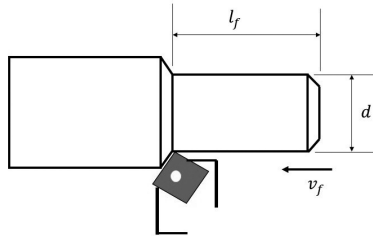
de usinagem de uma peça (t_u) pode ser calculado segundo a seguinte relação:

$$t_u = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a + t_c + \frac{t_{tf} \times n_t}{Z} \quad (I)$$

Em que t_u = tempo de usinagem de uma peça; t_p = tempo de preparo da máquina; t_s = tempo de carga e descarga da máquina; t_a = tempo de aproximação e de afastamento da ferramenta de corte; t_c = tempo de corte; t_{tf} = tempo de troca de ferramenta; n_t = número de troca de arestas na produção do lote de Z peças e; Z = número de peças. Os tempos são dimensionados em minutos.

Para usinar a peça mostrada na Figura 1.10, vamos tomar como exemplo um torneamento cilíndrico, utilizando as seguintes relações importantes:

Figura 1.10 | Usinagem de uma peça cilíndrica



Fonte: adaptada de Machado et al. (2011, p. 330).

Temos que:

$$t_c = \frac{l_f \times \pi \times d}{f \times v_c \times 1000} \quad (II)$$

Adotando Z_T como um valor inteiro, tal que: $Z_T = (T/t_c)$, em que T é o tempo de vida de uma aresta, a equação de t_u pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$t_u = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a - \frac{t_f}{Z} + \frac{l_f \times \pi \times d}{1000 \times f \times v_c} + \left(\frac{t_{tf} \times l_f \times \pi \times d}{1000 \times K \times f} \right) \times v_c^{x-1} \quad (III)$$

Em que $K = T \times v_c^x$ (Equação de Taylor), sendo que K e x são valores particulares para cada par de ferramenta/peça, obtidos experimentalmente e tabelados conforme veremos na sequência. A mesma expressão pode ser reescrita da seguinte maneira, a fim de

facilitar consulta a algumas tabelas e cálculos: $v_c \times T^y = C$ onde $y = \frac{1}{x}$ e $C = K^{\frac{1}{x}}$.

Os valores de x e de y são obtidos de tabelas que relacionam as ferramentas de usinagem e o material a ser usinado, tal qual a Tabela 1.2:

Tabela 1.2| Valores de x e de y para a Equação de Taylor

Ferramenta	Peça (material)	x
Aço Rápido (AR)	Aço	6 a 8
	Ferro Fundido	4 a 7
	Latão	4
	Cobre	7,7
	Alumínio	2,44
Metal Duro (MD)	Aço	5
	Ferro Fundido	4
	Alumínio	2,44
Cerâmica	Aço	2

Fonte: adaptada de Souza (2016, p. 159).

A equação de t_u pode ser dividida em três partes, segundo as expressões: $t_1 = \frac{t_p}{Z} + t_s + t_a - \frac{t_f}{Z}$;

$$t_2 = \frac{l_f \times \pi \times d}{1000 \times f \times v_c} \text{ e } t_3 = \left(\frac{t_{ff} \times l_f \times \pi \times d}{1000 \times K \times f} \right) \times v_c^{x-1}.$$

As três partes, quando somadas, apresentam uma curva do tipo “parabólica”, tal que, no seu ponto mínimo, vamos obter a velocidade máxima de produção (v_{mxprod}) e o correspondente tempo mínimo de usinagem ($t_{u\min}$).

A velocidade máxima de produção (v_{mxprod}) ocorre no ponto mínimo de $t_u = t_1 + t_2 + t_3$ com o correspondente tempo de usinagem mínimo ($t_{u\min}$). Assim, a partir da derivação da curva de t_u no seu ponto mínimo, a velocidade máxima de produção v_{mxprod} pode ser calculada pela expressão:

$$v_{mxprd} = \sqrt[x]{\frac{K}{t_{ff} \times (x-1)}} \quad (IV)$$

A equação IV pode ser reescrita da seguinte maneira: $t_{ff} \times (x-1) \times v_{\max}^x = K$, sendo que $T = t_{ff} \times (x-1)$ é o tempo de vida da ferramenta de corte.



Refleta

Note que, da expressão para cálculo de t_u , somente a parcela t_c (tempo de corte da peça) depende dos chamados “parâmetros de corte”. As demais parcelas da expressão de t_u são variáveis “operacionais” dos processos de usinagem (preparo da máquina-ferramenta, colocação, fixação e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta de corte). Qual é a importância desses parâmetros nos processos de usinagem?

Vamos agora passar para a etapa de cálculo da velocidade econômica de corte (v_{ec}).

Dada a complexidade que envolve questões que abordam custos, apresentaremos aqui um modelo de cálculo de custo para uma única operação de usinagem. A expressão é a seguinte:

$$c_p = c_m + c_c + c_{mq} + c_f \quad (V)$$

Em que c_p = custo de usinagem de uma peça de um lote de Z peças; c_m = custo da matéria-prima para uma peça; c_c = custo do corte em usinagem; c_{mq} = custo de operação da máquina e; c_f = custo referente à ferramenta de corte. Todo custo é calculado em reais (R\$).

Há uma outra forma de escrever a mesma equação:

$$c_p = c_m + \frac{t_c}{60} \times (S_h + S_{mq}) + \frac{t_c}{T} [c_{ff} + \frac{t_{ff}}{60} \times (S_n + S_m)] \quad (VI)$$

Temos que S_h é o custo do operador da máquina, S_{mq} é o custo de operação da máquina e S_m está associado ao custo da matéria-prima.

Podemos dividir a equação (VI) em três parcelas, a saber: $c_1 = c_m$; $c_2 = \frac{S_h + S_{mq}}{60}$ e; $c_3 = [c_{ff} + \frac{t_{ff}}{60} \times (S_n + S_m)]$. Assim: $c_p = c_1 + t_c \times c_2 + \frac{t_c}{T} \times c_3$.

Para a peça da Figura 1.10, utilizada para exemplificar a usinagem de uma peça, temos que:

$$c_p = c_1 + c_2 \times \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times v_c} + c_3 \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times K} \times v_c^{x-1} \quad (VII)$$

Que também pode ser dividida em três partes: $c_{p1} = c_1$;
 $c_{p2} = c_2 \times \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times v_c}$ e; $c_{p3} = c_3 \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times K} \times v_c^{x-1}$.

A exemplo do que fizemos com a equação de t_u , a soma das três partes gera um gráfico do tipo “parabólico” tal que, no seu ponto mínimo, vamos obter a velocidade econômica de corte (v_{ec}) e seu correspondente custo mínimo de produção (c_{pmin}).

Em posse do gráfico, derivando a curva de c_p no seu ponto mínimo, obtemos a expressão para a velocidade de mínimo custo $v_{ec} = \sqrt[x]{\frac{c_2 \cdot K}{(x-1) \cdot c_3}}$, na qual os parâmetros x , K , c_2 e c_3 já foram definidos anteriormente.



Assimile

Segundo Machado et al. (2011), podemos definir o “intervalo de máxima eficiência” como sendo aquele “compreendido entre a velocidade econômica de corte v_{ec} e a de máxima produção v_{mxprod} ”, ou seja: $v_{ec} \leq I_{mxf} \leq v_{mxprod}$. A combinação (superposição) dos gráficos qualitativos das Figuras 1.11 e 1.12 nos permite chegar a essa conclusão.

Vejamos na sequência um exemplo conceitual importante.



Exemplificando

Vimos que a velocidade de corte é um parâmetro que afeta em muito as condições econômicas de usinagem. Na usinagem de uma peça, devemos levar em consideração a necessidade da busca de um valor ideal de velocidade de corte, pois, elevando-se a velocidade de corte, embora o tempo de usinagem diminua, fatores tais como o desgaste de ferramenta e a maior necessidade de troca de ferramenta podem comprometer o aspecto econômico. Por outro lado, baixas velocidades de corte aumentam o tempo de fabricação de uma peça. Portanto, a experiência do operador de máquina-ferramenta associada à adequada determinação dos parâmetros de corte na fase de projeto da peça se fazem necessárias.

Caro aluno, neste final de seção, vamos discutir brevemente as operações de corte e segurança pessoal no uso de EPI.

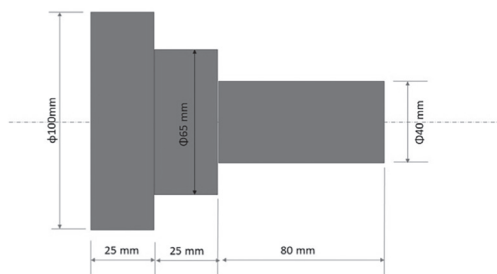
As operações de corte envolvem o contato direto da ferramenta com a peça usinada, e o acompanhamento do processo pelo operador da máquina-ferramenta deve ser sempre realizado. Na operação de corte, o cavaco é retirado da peça com uma velocidade e geometria que podem causar sérios acidentes de trabalho. Assim, as normas de segurança do trabalho exigem o uso de EPI pelo operador da máquina-ferramenta, visando sua integridade física durante a operação de usinagem.

Para os operadores de máquinas-ferramenta, os mais recomendados são os óculos de proteção, protetores auriculares, botas e avental, podendo, eventualmente, utilizar algum outro EPI em um caso especial.

Sem medo de errar

Caro aluno, lembre-se de que, na oficina de usinagem na qual você foi contratado, há um novo eixo a ser usinado que tem o perfil indicado na Figura 1.11, conforme solicitado pelo cliente. Você terá de calcular o tempo de usinagem (torneamento) que será gasto para cada peça, levando em conta o tempo de corte que, em linhas gerais, consiste em dividir o comprimento total percorrido pela ferramenta pelo avanço de trabalho usado. No desbaste de cada diâmetro, será usada uma profundidade de corte de 2,00 mm, avanço de 0,3 mm/rotação, velocidade de corte 150 m/min e considere o tempo de troca de ferramenta $t_{ff} = 1,0 \text{ min}$. Você também deverá recomendar se o processo de usinagem será realizado com fluido de corte ou sem fluido de corte. Considere também a viabilidade de cálculo de velocidade máxima de produção e da velocidade econômica de corte para a peça usinada.

Figura 1.11| Eixo a ser usinado



Fonte: elaborada pelo autor.

A usinagem deste eixo envolverá três etapas. A primeira etapa será a usinagem do diâmetro de 100 mm, na segunda etapa teremos a usinagem do diâmetro de 65 mm e, na terceira etapa a usinagem do diâmetro de 40 mm.

Lembrando que o tempo de corte (t_c) é calculado pela expressão: $t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c}$, sendo que vamos calcular esse tempo para cada etapa da usinagem.

1ª Etapa: $l_f = 130\text{mm}$, $d = 100\text{mm}$ e $f = 0,3\text{mm} / \text{rotação}$

$$t_{c1} = \frac{130 \cdot \pi \cdot 100}{1000 \cdot 0,3 \cdot 150} = 0,9 \text{ min} \text{ (ou, aproximadamente, 55 segundos).}$$

2ª Etapa: $l_f = 105\text{mm}$, $d = 65\text{mm}$ e $f = 0,3\text{mm} / \text{rotação}$

$$t_{c2} = \frac{105 \cdot \pi \cdot 65}{1000 \cdot 0,3 \cdot 150} = 0,476 \text{ min} \text{ (ou, aproximadamente, 29 segundos).}$$

3ª Etapa: $l_f = 80\text{mm}$, $d = 40\text{mm}$ e $f = 0,3\text{mm} / \text{rotação}$

$$t_{c3} = \frac{80 \cdot \pi \cdot 40}{1000 \cdot 0,3 \cdot 150} = 0,223 \text{ min} \text{ (ou, aproximadamente, 13,5 segundos).}$$

Assim, o tempo total de corte, que é o nosso tempo total de usinagem de uma peça, será:

$$t_{tc} = t_{c1} + t_{c2} + t_{c3} = 0,9 + 0,476 + 0,223 = 1,60 \text{ min} \approx 96 \text{ segundos}$$

Cálculo da velocidade máxima de produção:

$$v_{mxprd} = \sqrt[3]{\frac{K}{t_{tf} \times (x-1)}}$$

O aço do eixo é o aço SAE 1060 extraduro, mas observe na Tabela 1.2 que não há uma especificação de tipos de aço para os parâmetros x e y da Equação de Taylor. Segundo Machado et al. (2011), podemos adotar um valor médio para C e y , tal que $C = 127$ e $y = 0,3$.

Como $C = K^{\frac{1}{x}} \Rightarrow K = C^x$ e lembrando que $x = \frac{1}{y} = \frac{1}{0,3} = 3,33$, logo:

$$K = 127^{3,33} = 10,28.10^6$$

$$\text{Finalmente: } v_{mxprd} = \sqrt[3,33]{\frac{10,28.10^6}{1(3,33-1)}} = 98,48 \text{ m / min}$$

Observe que a v_{mxprd} é igual 98,48 m/min, valor bem menor que a velocidade de corte que está sendo utilizada (150 m/min); o que pode provocar um superaquecimento na ferramenta de corte, o que nos leva a considerar a possibilidade do uso de fluido refrigerante na operação de usinagem.

Note que, na resolução desse problema, pudemos colocar em prática fundamentos de ferramentas de corte e cálculo de alguns parâmetros de usinagem, a fim de avaliar os principais fundamentos dos processos convencionais de usinagem.

Note também que o cálculo da velocidade econômica de corte para a peça usinada depende de parâmetros não fornecidos pela oficina de usinagem, tais como variáveis de custos, imprescindíveis para o cálculo.

Quanto aos questionamentos finais feitos nessa problematização, note que o tempo de corte (t_c) é inversamente proporcional à velocidade de corte (v_c) e ao avanço da ferramenta (f). Logo, esses parâmetros, quando alterados, exercem influência no tempo de corte de forma significativa. Apenas como um exemplo final, se diminuíssemos o avanço de 0,3 mm/rot para algo em torno de 0,1 mm/rot essa alteração seria muito mais adequada para uma operação de acabamento do que para a operação em execução (desbaste).

Avançando na prática

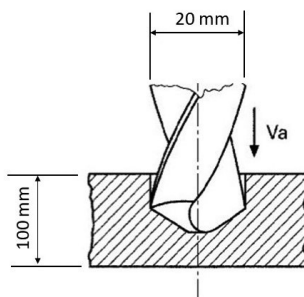
Cálculo de tempo de usinagem em um processo de furação

Descrição da situação-problema

Suponha que a oficina de usinagem na qual você foi contratado está testando uma nova furadeira e você foi designado para realizar o seguinte teste: a furação de uma chapa de aço SAE 1020 de 100 mm de espessura, como mostra a Figura 1.12. Você tem disponível uma broca de 20 mm de diâmetro e você deverá utilizar uma velocidade de usinagem de 15 m/min e usar um avanço de 0,6 mm/rotação. Você deverá determinar qual o tempo necessário para realizar essa furação (considere apenas o tempo de usinagem nos cálculos). Suponha que, entre a broca e o furo, há uma folga de apenas 0,50 mm, e com base nos dados disponibilizados, faça uma estimativa de vida para

ferramenta, sabendo que a broca é de carbeto e que o tempo de troca de ferramenta é $t_{ff} = 1,0 \text{ min}$.

Figura 1.12 | Esquema de furação da chapa SAE 1020



Fonte: elaborada pelo autor.

Resolução da situação-problema

Para iniciarmos o teste da furadeira, considerando que ela está operando adequadamente, vamos calcular o tempo de usinagem

utilizando a expressão $t_u = t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c}$.

Substituindo os valores fornecidos pela oficina de usinagem:

$$t_u = t_c = \frac{100 \cdot \pi \cdot 21}{1000 \cdot 0,6 \cdot 15} = 0,733 \text{ min} = 44 \text{ s}.$$

Observe que o diâmetro da broca é de 20 mm, mas como a folga entre a broca e o furo é de 0,5 mm, o valor de d na expressão é de $d_{broca} + 2 \times 0,5 = 20 + 2 \times 0,5 = 21 \text{ mm}$.

Como a broca é de carbeto e a peça a ser furada é aço SAE 1020, segundo Machado et al. (2011), temos que $y = 0,282$. Sabemos que

$$x = \frac{1}{y} = \frac{1}{0,282} = 3,546 \text{ e que } T = t_{ff}(x - 1), \text{ logo: } T = 1(3,546 - 1) = 2,546 \text{ min}.$$

Note que o tempo de usinagem (t_u) é de apenas 44 segundos e que o tempo estimado de vida da broca é de 2,546 minutos (ou 152,8 segundos), o que nos leva a concluir que tal broca tem a capacidade de realizar essa mesma operação cerca de 3,5 vezes, ou seja, após a terceira utilização da broca, ela deve ser trocada.

Faça valer a pena

1. Sabemos que os processos de usinagem podem ser classificados em duas categorias: os processos convencionais e os processos não convencionais. Além dessa classificação, os processos de usinagem podem ser divididos entre aqueles que utilizam ferramentas de corte com geometria definida e aqueles que utilizam ferramentas de corte com geometria não definida.

Leia as afirmações abaixo e avalie se são verdadeiras (V) ou falsas (F):

() A formação de cavacos é mais pronunciada na fase de desbaste do material que utiliza ferramentas com geometria definida.

() Na fase de acabamento, a utilização de ferramenta de geometria não definida não produz cavacos.

() O cavaco é formado tanto na usinagem convencional como na usinagem não convencional.

a) V – V – V.

b) V – F – F.

c) V – F – V.

d) F – V – F.

e) V – V – F.

2. Sabemos que a velocidade de corte é um parâmetro que afeta em muito as condições econômicas de usinagem. Na usinagem de uma peça, há de se levar em conta a necessidade da busca de um valor ideal de velocidade de corte, pois quando se eleva a velocidade de corte, embora o tempo de usinagem diminua, fatores como desgaste de ferramenta e maior necessidade de troca de ferramenta podem comprometer o aspecto econômico. Por outro lado, baixas velocidades de corte aumentam o tempo de fabricação de uma peça.

A equação a seguir nos orienta no cálculo da velocidade ideal de corte, que é a velocidade de máxima produção v_{mxprd} e também permite avaliar a vida da ferramenta.

$$v_{mxprd} = \sqrt[x]{\frac{K}{t_{ff} \times (x-1)}}$$

Analise as asserções a seguir e a relação proposta entre elas:

I – O tempo T de vida da ferramenta pode ser calculado pela parcela $t_{ff} \times (x-1)$ da equação de cálculo de v_{mxprd}

PORQUE

II – As variáveis t_{ff} e x dependem tanto do material usinado como do material da ferramenta de corte.

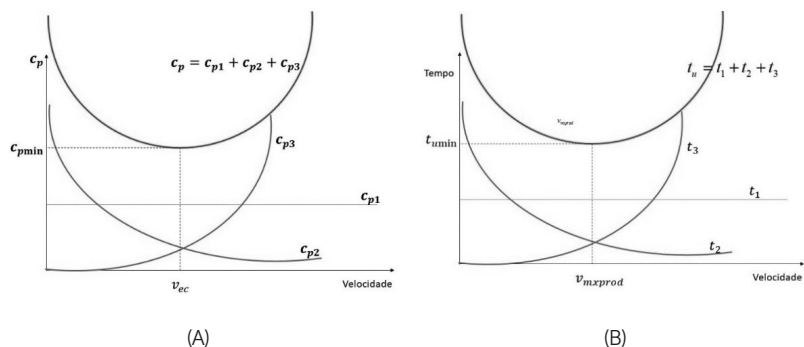
A respeito das asserções apresentadas, assinale a alternativa correta:

- a) As duas asserções são falsas.
- b) A asserção I é verdadeira, e a asserção II é falsa.
- c) A asserção I é falsa, e a asserção II é verdadeira.
- d) As asserções são verdadeiras, mas a segunda não complementa a primeira.
- e) Ambas asserções são verdadeiras, e a segunda complementa a primeira.

3. Segundo Machado et al. (2011, p. 338), podemos definir o “intervalo de máxima eficiência” como sendo aquele “compreendido entre a velocidade econômica de corte v_{ec} e a de máxima produção v_{mxprod} ”, ou seja: $v_{ec} \leq I_{m.xef} \leq v_{mxprod}$.

Temos ainda dois diagramas qualitativos (mostrados a seguir) que ilustram o comportamento econômico dos parâmetros de usinagem. A composição dos dois diagramas, apresentados na Figura 1.13, é que nos permite chegar ao intervalo de máxima eficiência aqui apresentado.

Figura 1.13 | Diagramas qualitativos de velocidade econômica de corte (A) e de velocidade de máxima produção (B)



Fonte: adaptada de Machado et al. (2011, p. 332 e 337).

Reforçando que a composição dos dois diagramas (A) e (B) é que nos permite chegar ao intervalo de máxima eficiência, assinale a alternativa que representa a asserção correta.

- a) Diminuindo a v_{mprod} a um valor ainda superior a v_{ec} , o tempo de usinagem aumenta sem afetar significativamente o custo de produção mínimo (C_{pmin}).
- b) As parcelas C_{p1} e t_1 indicadas nos gráficos são constantes que podem ser alteradas variando-se a velocidade de corte e, portanto, podem alterar o intervalo de máxima eficiência.
- c) Se diminuirmos o valor de v_{ec} , não alteramos a v_{mprod} .
- d) O intervalo de máxima eficiência I_{mxf} , uma vez estabelecido, não pode ser alterado por nenhuma das variáveis indicadas nos diagramas (A) e (B).
- e) Diminuindo a v_{mprod} a um valor ainda superior a v_{ec} , o tempo de usinagem diminui afetando significativamente o custo de produção mínimo (C_{pmin}).

Seção 1.3

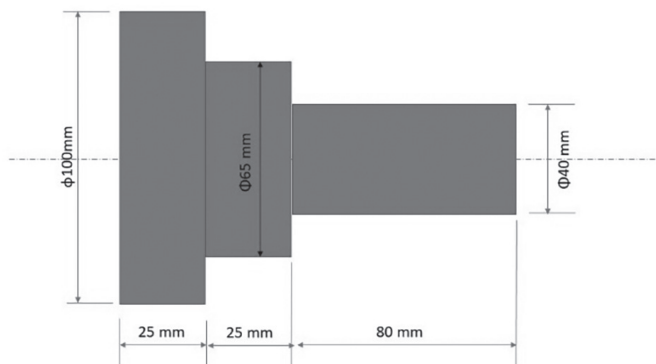
Materiais de ferramentas de corte; forças e potências

Diálogo aberto

Prezado aluno, nesta seção, você vai aplicar os conceitos de força e potência de corte, além de conhecer a vasta gama de materiais possíveis para ferramentas de usinagem.

Lembre-se de que, na oficina de usinagem que o contratou, foram estabelecidos os parâmetros de corte para o eixo apresentado na SP2, replicado na Figura 1.14, tais que: $a_p = 2,0\text{mm}$, $f = 0,30\text{mm/rot}$ e $v_c = 150\text{m/min}$ como sendo a velocidade ideal de corte. Com base nos dados fornecidos e nos resultados obtidos na problematização da seção anterior, seu gerente o incumbiu de realizar mais alguns cálculos a fim de estabelecer novos parâmetros de usinagem. Você lembra do conceito de velocidade de corte? Você pode imaginar a influência da velocidade nos resultados de potência e força de corte? Pois bem, tais cálculos solicitados são os seguintes: (a) Quais as potências e forças de usinagem envolvidas nesta usinagem? (b) Qual o valor do coeficiente de força específica de corte K_c (MPa), considerando o material do eixo usinado (Aço Extraduro SAE 1060)? (c) Finalmente, qual a potência do motor necessária para a operação de usinagem, considerando um rendimento de 75%?

Figura 1.14 | Eixo usinado na problematização proposta



Fonte: elaborada pelo autor.

Fique atento porque, para resolver essa situação proposta, os conteúdos abordados nesta seção – força de corte e potência de corte – serão necessários e você deverá estudá-los com dedicação. Mãos à obra!

Não pode faltar

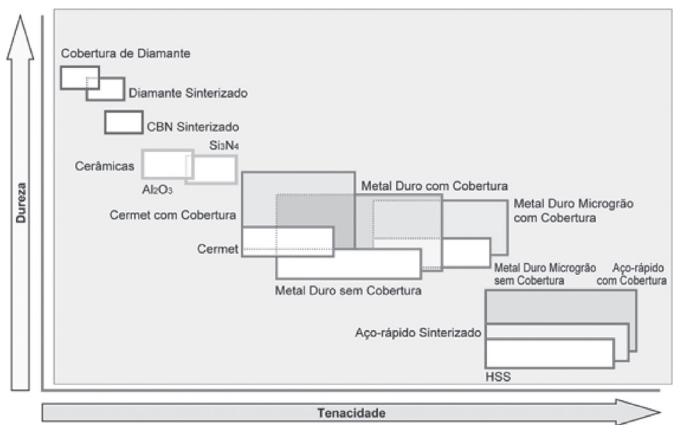
Materiais de ferramentas de corte

Caro aluno, uma das variáveis de extrema importância em processos de usinagem é a escolha e uso correto das ferramentas de corte. Cada processo de usinagem requer uma ferramenta própria para sua execução, e o resultado da operação de usinagem dependerá muito do material da ferramenta, além, é claro, de outras variáveis, tais como tipo de máquina, uso ou não de fluido de corte etc. Os materiais das ferramentas de corte são extremamente variados e, como talvez seja um tanto óbvio deduzir, quanto mais complexos são esses materiais mais caro é o custo do ferramental.

O tipo de material da ferramenta de corte vai impactar em uma série de variáveis na usinagem, tais como: desgaste da ferramenta (vida útil), número de trocas de ferramentas, qualidade de acabamento da peça usinada (dimensional e superficial), necessidade ou não de uso de fluidos de corte, velocidade de corte, tempo de corte, entre outras.

A Figura 1.15 ilustra os diversos tipos de materiais de ferramentas de corte associados às propriedades de dureza e tenacidade.

Figura 1.15 | Materiais de ferramentas de corte



Fonte: <google/6rGXqg>. Acesso em: 24 set. 2017.

De acordo com uma importante indústria fabricante de ferramentas de usinagem, o metal duro com e sem cobertura e o cermet com base TiC-TiN são os principais materiais para ferramentas no mercado, pois possuem o melhor equilíbrio entre dureza e tenacidade.

Observe, na Figura 1.15, que dos diversos materiais possíveis para ferramentas de corte, as ferramentas com cobertura de diamante e de diamante sinterizados são as mais duras e, as de aço rápido com cobertura e as de aço rápido sinterizadas são as mais tenazes. Entre essas duas categorias de materiais de ferramentas há um universo de outros materiais intermediários, também muito utilizados para as mais variadas operações de usinagem.

Segundo Machado et al. (2011, p. 195), os materiais das ferramentas de corte devem apresentar as seguintes propriedades desejáveis: alta dureza, tenacidade suficiente para evitar falhas por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência à compressão, alta resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas, alta resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente.



Pesquise mais

O universo dos materiais para ferramentas é extremamente amplo e diversificado. Você pode ampliar seus conhecimentos sobre esse tema tão importante na usinagem se dedicando à leitura e estudo do capítulo 7 de Machado et al. (2011) da página 195 a 246.

Veja que, ao longo de sua utilização nos processos de usinagem, as ferramentas de corte vão se desgastando em suas arestas de corte, perdendo, assim, sua eficácia no processo de remoção de cavaco, ou seja, no processo de corte. Alguns eventos podem contribuir de forma significativa para que isso ocorra: avarias ocasionais, desgaste da ferramenta e deformação da ferramenta.

As avarias são aquelas ocorrências bruscas e inesperadas nas quais a ferramenta de corte sofre uma quebra, um lascamento ou uma trinca na aresta de corte; ocorrências que condenam o uso da ferramenta, obrigando a sua imediata troca.

O desgaste é um processo natural de perda de capacidade de corte devido ao atrito da aresta de corte com a peça usinada, que

impacta na forma da aresta de corte, influenciando negativamente em todo o processo de usinagem. Nesse caso, a ferramenta não chega à condição de descarte, pois uma eventual operação de afiação dessa ferramenta pode recuperá-la para uso novamente.

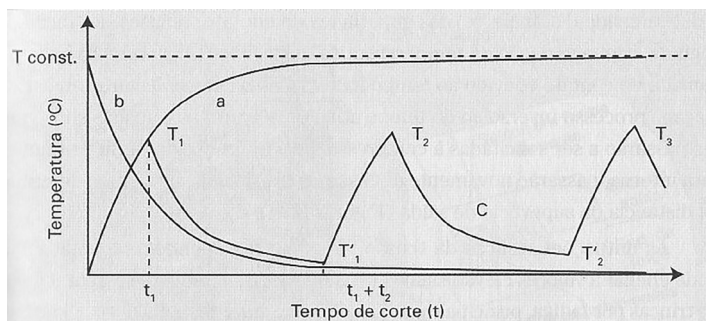
A deformação (plástica) da ferramenta caracteriza-se por um fenômeno de cisalhamento em função das altas tensões na superfície da aresta de corte, comprometendo a sua capacidade de corte ao extremo devido à mudança geométrica observada na aresta de corte.

Os três tipos de avarias descritos são as chamadas “avarias mecânicas”. Além delas, as ferramentas podem sofrer avarias causadas por fenômenos térmicos.

As avarias causadas por fenômenos térmicos se devem, principalmente, ao calor gerado pelo atrito entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Assim, o uso de fluido refrigerante pode contribuir para evitar esse tipo de avaria. Vamos tomar dois exemplos aqui: um de fresamento e um de torneamento.

No fresamento, a ferramenta de corte (fresa) se caracteriza por possuir mais de uma aresta de corte, ou seja, ela possui mais de um dente de corte. No torneamento, as pastilhas de corte são monocortantes, ou seja, possuem apenas uma aresta de corte. Por causa dessa diferença, podemos dizer que, no fresamento, temos um processo de corte interrompido, enquanto que, no torneamento, temos um processo de corte contínuo. Vale destacar que a denominação “corte interrompido” do fresamento é porque, enquanto um dente da fresa está em operação de remoção de cavaco, os demais dentes de corte estão em fase inativa, etapa em que ocorre o resfriamento temporário dos dentes de corte inativos. Logo, podemos dizer que a temperatura tem uma influência mais significativa nas pastilhas de torneamento do que nos dentes da fresa para a usinagem de um mesmo material. A Figura 1.16 ilustra a variação da temperatura de corte nos processos de torneamento e de fresamento.

Figura 1.16| Variação cíclica da temperatura de corte em dois processos de usinagem: torneamento (curva a) e fresamento (curva c)



Fonte: Machado et al. (2011, p. 255).

A curva (b) na Figura 1.16 representa o resfriamento contínuo da aresta de corte. A variação da temperatura, de forma cíclica, que ocorre entre a ferramenta e o cavaco leva à formação de trincas térmicas na ferramenta e, por outro lado, devido a variações de tensões também provocadas pela variação de temperatura poderão ocasionar o surgimento de trincas por fadiga, que ocorrem principalmente em ferramentas de metal duro, pois é raríssimo encontrar na literatura trincas de origem térmica em ferramentas de outros materiais. Outro tipo de avaria em ferramenta de corte causada por temperatura são os sulcos de origem térmica que se apresentam na forma de "pentes".

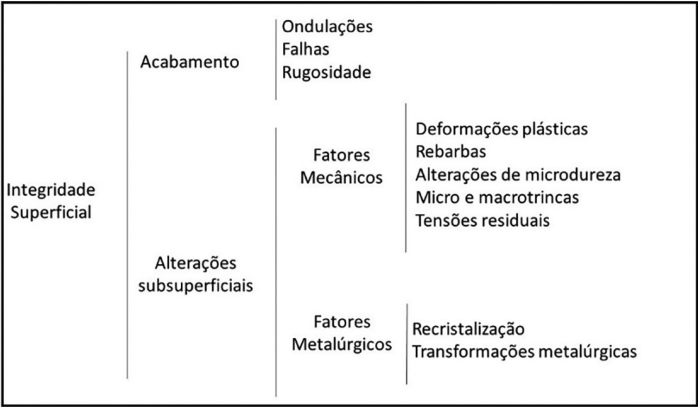


Refleta

As avarias causadas por temperatura, principalmente as trincas de origem térmica, são as principais responsáveis pelas falhas das ferramentas em altas velocidades de corte. No caso das baixas velocidades de corte, as trincas de origem mecânica prevalecem. Você saberia responder por quê?

Não há dúvida de que os parâmetros de corte, tais como a velocidade de corte e de avanço, por exemplo, e também o tipo e material da ferramenta de corte, exercem uma forte influência no acabamento superficial da peça usinada. Porém, a integridade superficial de uma peça usinada é dependente de uma série de fatores que vão além dos parâmetros de corte, tais como: calor gerado na operação, eventuais reações químicas (no estado sólido), forças de corte, vibrações, tensões etc. A Figura 1.17 ilustra as alterações que podem ocorrer em superfícies usinadas e suas classificações.

Figura 1.17| Classificação da integridade superficial usinada



Fonte: adaptada de Machado et al. (2011, p. 297).



Assimile

As operações de usinagem induzem, na peça, tensões de origem mecânica e térmica que normalmente têm efeito adverso sobre sua integridade. Essas tensões ocorrem tanto em camadas superficiais como nas subsuperficiais, podendo, em alguns casos, afetar a microestrutura da peça (e até da ferramenta) usinada.

Veja você, caro aluno, mudando um pouco de assunto, que o conhecimento das forças e potências de usinagem são de fundamental importância para avaliar as forças atuantes nos elementos das máquinas-ferramentas. Importante também destacar que somente os componentes de corte e de avanço das forças de usinagem é que contribuem para a potência de usinagem.

Vamos começar trabalhando com a potência de corte (P_c) nos processos de torneamento e de fresamento para fins de exemplificação, pois, nos outros processos de usinagem, também podemos avaliar a potência e força de corte. As expressões a seguir nos servem para o cálculo da potência de corte:

$$P_{cT} = \frac{a_p \cdot f \cdot v_c \cdot K_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} \quad (\text{Potência de corte em kW no torneamento})$$

$$P_{cF} = \frac{a_p \cdot ae \cdot v_f \cdot K_c}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta} \quad (\text{Potência de corte em kW no fresamento})$$

Em que a_p (mm) é a profundidade de corte; f (mm/rot) é o avanço por rotação; v_c (m/min) é a velocidade de corte; K_c (MPa) é o coeficiente de força específica de corte; η é o coeficiente de eficiência da máquina; a_e (mm) é largura de corte no fresamento; v_f (mm/min) é o avanço da mesa no fresamento.

Ressalta-se que a constante K_c pode ser definida como sendo a força (ou pressão) específica de corte (pois advém da força de corte) para um cavaco de seção de 1 mm x 1 mm.

Observação importante: a constante K_c (MPa), embora apareça nas duas expressões de cálculo de potência, possui valores distintos para os processos de usinagem por torneamento e por fresamento. A Tabela 1.3 nos mostra os valores de K_c para o torneamento.

Tabela 1.3 | Coeficiente de força específica de corte K_c (MPa) – Torneamento

Material Usinado	Resistência à tração (MPa)	Coeficiente de Força Específica de Corte K_c (MPa)				
		0,1 (mm/rot)	0,2 (mm/rot)	0,3 (mm/rot)	0,4 (mm/rot)	0,6 (mm/rot)
Aço baixo carbono	620	3080	2700	2570	2450	2300
Aço duro	720	4050	3600	3250	2950	2640
Aço ferramenta	670	3040	2800	2630	2500	2400
Aço Cr-Mn	770	3830	3250	2900	2650	2400
Aço Cr-Mo	730	4500	3900	3400	3150	2850
Aço Cr-Ni-Mo	900	3070	2650	2350	2200	1980

Fonte: adaptada de: <goo.gl/AeziUU>. Acesso em: 26 set. 2017.

A Tabela 1.4 nos mostra os valores de K_c para a operação de fresamento.

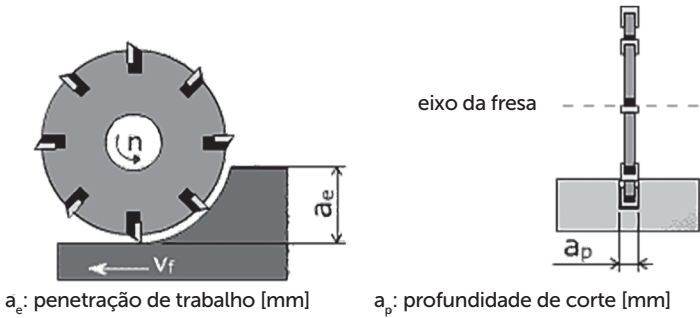
Tabela 1.4| Coeficiente de força específica de corte K_c (MPa) – Fresamento

Material Usinado	Resistência à tração (MPa)	Coeficiente de Força Específica de Corte K_c (MPa)				
		0,1 (mm/rot)	0,2 (mm/rot)	0,3 (mm/rot)	0,4 (mm/rot)	0,6 (mm/rot)
Aço baixo carbono	620	1980	1800	1730	1600	1570
Aço duro	720	2520	2200	2040	1850	1740
Aço ferramenta	670	1980	1800	1730	1700	1600
Aço Cr-Mn	770	2300	2000	1880	1750	1660
Aço Cr-Mo	730	2540	2250	2140	2000	1800
Aço Cr-Ni-Mo	940	2000	1800	1680	1600	1500

Fonte: adaptada de: <goo.gl/AeziUU>. Acesso em: 26 set. 2017.

A Figura 1.18 ilustra, para o fresamento, os principais parâmetros considerados para cálculo da potência de corte na usinagem.

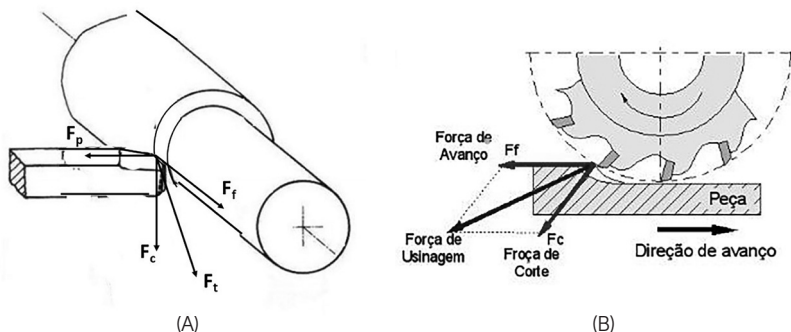
Figura 1.18| Alguns parâmetros de corte no fresamento



Fonte: <goo.gl/nwoCTB>. Acesso em: 26 set. 2017.

A potência de usinagem depende, em grande parte, das forças de usinagem envolvidas no processo de manufatura mecânica. Assim, seja no torneamento, seja no fresamento ou em outros processos de usinagem, sempre haverá forças de usinagem advindas do contato peça/ferramenta. A Figura 1.19 ilustra, para os processos de torneamento e de fresamento, as forças de usinagem envolvidas.

Figura 1.19] Forças de usinagem nos processos de (a) torneamento e de (b) fresamento



Fonte: adaptada de: <<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3079/Power.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2017.

No caso do torneamento, Figura 1.19(a), as forças envolvidas são as seguintes: F_f = força de avanço, F_p = força de profundidade; $F_c = F_{ap}$ = força de corte (ou de apoio); e F_t = força ativa. No fresamento, Figura 1.19(b), temos: F_f = força de avanço; F_c = força de corte e; F_u = força de usinagem.

Assim, na usinagem por torneamento: $F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2}$ e, na usinagem por fresamento, simplificada, podemos escrever que $\bar{F}_u = \bar{F}_p + \bar{F}_t$.

A potência de corte (P_c) está relacionada à força de corte (F_c) pela seguinte expressão:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4}$$

Em que P_c em [kW], F_c em [N] e v_c em [m/min].

De uma forma simplificada, podemos calcular também a potência do motor (P_m) em kW da máquina-ferramenta com rendimento $\eta(\%)$ pela seguinte expressão: $P_m = \frac{P_c}{\eta}$.

Valem aqui duas observações, meu caro aluno: (i) o rendimento das máquinas-ferramenta $\eta(\%)$ varia entre 60% e 80% para as máquinas convencionais, podendo chegar a 95% para as CNC; (ii) podemos converter a potência de W para CV por meio do seguinte fator de conversão: $1W = 1,359 \cdot 10^{-3} CV$.



Exemplificando

Caro aluno, suponha que você tenha que realizar a seguinte operação de usinagem: fresar aço ferramental com velocidade de corte de 70 m/min; profundidade de corte de 2 mm; largura de corte 100 mm, avanço da mesa 250 mm/min com uma fresa de $\phi = 250$ mm e 8 insertos. Eficiência da máquina 80%. Para tanto, foi solicitado que você calcule a potência de corte necessária para realizar essa operação de usinagem. Com base na potência de corte calculada, você terá de determinar também a força de corte e a potência do motor.

Vamos realizar o cálculo:

Inicialmente, calcule a rotação da ferramenta.

$$n = \frac{1000.v_c}{\pi.d_1} = \frac{1000.70}{\pi.250} = 89,12 \text{ rpm}$$

Por ser uma operação de fresamento, precisamos agora calcular o avanço por dente, lembrando-se que a fresa utilizada tem 8 insertos, logo, tem 8 dentes:

$$f_z = \frac{v_f}{z.n} = \frac{250}{8.89,12} = 0,350 \text{ mm / dente}$$

Da Tabela 1.4, temos que, para fresar aço ferramental, $K_c = 1730$ MPa para 0,3 mm/rot e $K_c = 1700$ MPa para 0,4mm/rot. Como temos 0,350 mm/rot, vamos adotar um valor intermediário para K_c , ou seja, $K_c = 1715$ MPa.

Assim, substituindo a força específica de corte na fórmula: $P_{cF} = \frac{a_p.ae.vf.K_c}{60.10^6.\eta}$.

Teremos:

$$P_{cF} = \frac{2.100.250.1715}{60.10^6.0,8} = 1,78 \text{ KW}$$

Essa é, portanto, a potência de corte necessária na operação de usinagem de fresamento do aço ferramental.

Vamos agora ao cálculo da força de corte necessária para essa operação de usinagem:

$$P_c = \frac{F_c.v_c}{6.10^4} \Rightarrow F_c = \frac{P_c.6.10^4}{v_c} = \frac{1,78.6.10^4}{70} = 1526 \text{ N}$$

A força de corte de 1526 N é a força de usinagem necessária para a operação de fresamento em análise.

Finalmente, calculemos agora a potência do motor da máquina-ferramenta:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} = \frac{1,78}{0,80} = 2,225 \text{ KW}$$

Como complemento, podemos converter a potência do motor de W para CV, lembrando que $1W = 1,359.10^{-3}CV \Rightarrow P_m = 2225.1,359 \times 10^{-3} = 3,0CV$.

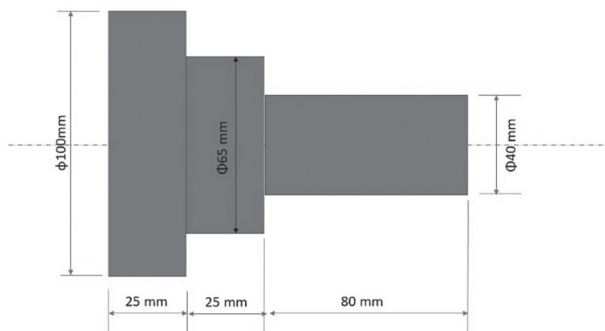
Assim, concluímos nosso exemplo, no qual pudemos aplicar os conceitos que estamos estudando nesta seção, esses mesmos conceitos podem ser utilizados na prática profissional.

Sem medo de erro

Chegou a hora de colocar em prática o aprendizado dos conteúdos estudados nesta seção e retomar o ambiente da oficina de usinagem que lhe contratou para determinar uma série de parâmetros de usinagem de um eixo para um novo cliente. Vamos retomar o seu desafio nesta nova SP.

Na oficina de usinagem que o contratou, foram estabelecidos os parâmetros de corte para o eixo apresentando na SP2, replicado na Figura 1.14, tais que: $a_p = 2,0mm$, $f = 0,30mm/rot$ e $v_c = 150m/min$. Com base nos dados fornecidos e nos resultados obtidos na SP2 (vide Seção 2) e com base no que está sendo exigido na presente SP, vamos à resolução.

Figura 1.14 | Eixo usinado na SP2



Fonte: elaborada pelo autor.

Começemos a resolver a SP calculando a potência de corte (P_c):

lembre-se de que temos um torneamento e, portanto: $P_{cT} = \frac{a_p \cdot f \cdot v_c \cdot K_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta}$.

Das variáveis da equação de P_{cT} não temos somente o valor de K_c .

Como o material do eixo usinado é o aço extraduro SAE 1060, e foi dado que $f = 0,30 \text{ mm / rot}$: da Tabela 1.3: Coeficiente de força específica de corte K_c (MPa) – Torneamento não temos especificado este aço, mas sim o aço duro (HD), que podemos considerar equivalente (ou até superior) ao aço extraduro SAE 1060.

Dessa mesma tabela (1.3), obtemos que $K_c = 3250 \text{ MPa}$ (item b da nossa SP). Assim:

$$P_{cT} = \frac{2,0 \cdot 0,3 \cdot 150 \cdot 3250}{60000 \cdot 0,75} = 6,50 \text{ kW}$$

Note que, pelo fato de termos calculado uma potência de corte para um "aço equivalente" ao aço do eixo a ser usinado, podemos tomar essa potência como sendo uma "potência estimada".

Vamos agora ao cálculo da força de corte necessária para essa operação de usinagem:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \Rightarrow F_c = \frac{P_c \cdot 6 \cdot 10^4}{v_c} = \frac{6,5 \cdot 6 \cdot 10^4}{150} = 2600 \text{ N}$$

A força de corte de 2600 N é a força de usinagem necessária para a operação de torneamento do eixo dessa SP.

Finalmente, calculemos agora a potência do motor da máquina-ferramenta:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} = \frac{6,5}{0,75} = 8,67 \text{ kW}$$

Podemos especificar a potência do motor de W para CV fazendo a devida conversão, lembrando que $1 \text{ W} = 1,359 \cdot 10^{-3} \text{ CV} \Rightarrow P_m = 8670 \cdot 1,359 \cdot 10^{-3} = 11,8 \text{ CV}$

Note, caro aluno, que com a solução dessa SP, mobilizamos uma série de conteúdos abordados nesta seção, em particular conhecimentos de cálculo de potência e de força de usinagem. Com essa SP (e as demais SP anteriores – SP1 e SP2) pudemos alcançar os objetivos desta unidade de ensino, que vislumbrou a parte de seleção dos materiais de ferramentas de corte e cálculo de forças e potências, a fim de avaliar os principais fundamentos dos processos de usinagem.

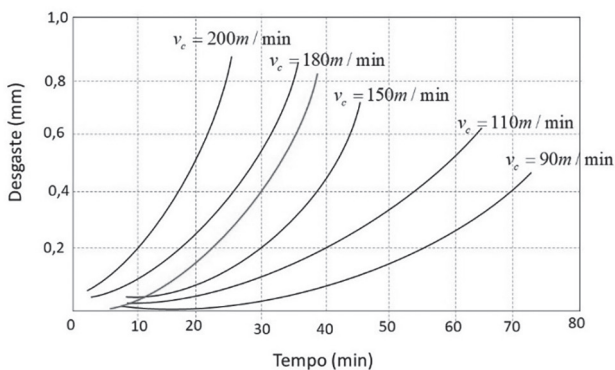
Desgaste da aresta de corte da ferramenta e o tempo de desgaste associado

Descrição da situação-problema

Um torno é acionado por um motor de potência igual a 10 kW e com rendimento de 80%. Esse torno, recentemente adquirido pela oficina de usinagem, será utilizado para usinar um eixo cilíndrico de aço SAE 1045. O mestre da oficina lhe passou as seguintes informações sobre a usinagem do eixo: operação a ser realizada – desbaste, avanço por volta igual a 0,4 mm/rot, profundidade de corte igual a 2,0 mm e constante $K_c = 2850$ MPa. O mestre da oficina informou também que as ferramentas utilizadas têm apresentado um tempo de vida útil médio de 30 minutos.

Com o auxílio do gráfico hipotético de desgaste da aresta da ferramenta apresentado na Figura 1.20 e da Tabela 1.5 você deverá determinar o desgaste da aresta de corte da ferramenta e o tempo de desgaste associado. Você deverá também indicar qual o material da ferramenta de corte.

Figura 1.20| Desgaste de aresta de ferramenta em função do tempo e da velocidade de corte (v_c)



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 1.5 | Velocidade de corte para operação de torneamento

TABELA DE VELOCIDADE DE CORTE (V) PARA O TORNO					
(EM METROS POR MINUTO)					
MATERIAIS	FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO			FERRAMENTAS DE CARBONETO-METÁLICO	
	DESBASTE	ACABAMENTO	ROSCAR RECARILHAR	DESBASTE	ACABAMENTO
AÇO 1020	25	30	10	200	300
AÇO 1045	20	25	8	120	160
AÇO EXTRADURO 1060	15	20	6	40	60
FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	20	25	8	70	85

Fonte: <goo.gl/Qefx8v>. Acesso em: 30 set. 2017.

Resolução da situação-problema

Vamos começar a resolver essa SP calculando a potência de corte (P_c).

$$P_M = \frac{P_c}{\eta} \Rightarrow P_c = P_M \cdot \eta = 10.0,8 = 8,0kW$$

Sabemos que $P_c = \frac{a_p \cdot f \cdot v_c \cdot K_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} \Rightarrow v_c = \frac{P_c \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot \eta}{a_p \cdot f \cdot K_c} = \frac{8.60 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{2,0 \cdot 4 \cdot 2850} = 168,4m / min$

Voltando ao gráfico fornecido e fazendo uma interpolação aproximada (ver linha vermelha) indicada no gráfico da Figura 1.20, para o tempo de 30 minutos, o desgaste da aresta será de 0,40 mm.

Finalmente, considerando que a operação será de desbaste e a velocidade de corte calculada foi de 168,4 m/min, da Tabela 1.6 apresentada podemos deduzir que a ferramenta de corte é de carboneto metálico, embora a velocidade de corte indicada na tabela seja menor que a calculada.

Tabela 1.6 | Velocidade de corte para operação de torneamento

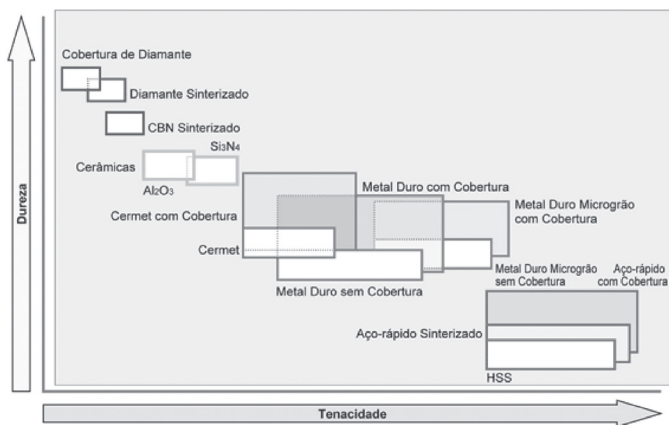
TABELA DE VELOCIDADE DE CORTE (V) PARA O TORNO					
(EM METROS POR MINUTO)					
MATERIAIS	FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO			FERRAMENTAS DE CARBONETO-METÁLICO	
	DESBASTE	ACABAMENTO	ROSCAR RECARILHAR	DESBASTE	ACABAMENTO
AÇO 1020	25	30	10	200	300
AÇO 1045	20	25	8	120	160
AÇO EXTRADURO 1060	15	20	6	40	60
FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	20	25	8	70	85

Fonte: adaptada de: <goo.gl/Qefx8v>. Acesso em: 30 set. 2017.

Faça valer a pena

1. As ferramentas de corte para usinagem são manufaturadas por materiais diversificados, que vão desde ferramentas de aço carbono comum a ferramentas de materiais tecnologicamente mais desenvolvidos, tais como diamante sinterizado e cerâmicas especiais. O tipo e qualidade do material da ferramenta de corte, assim como os parâmetros de corte utilizados afetam a vida útil da ferramenta. A Figura 1.21 nos mostra os mais diversos tipos de materiais para ferramentas e algumas propriedades.

Figura 1.21| Materiais de ferramentas e suas propriedades



Fonte: <<http://mitsubishicarbide.net/contents>>. Acesso em: 27 set. 2017.

Com base no texto e na figura, que nos mostra os diversos tipos de ferramentas, podemos dizer que:

- I. A maior dureza dos materiais sinterizados e cerâmicos usados em ferramentas de corte contribui para seu menor desgaste.
- II. As ferramentas de materiais de maior dureza estão sujeitas a menores avarias térmicas e mecânicas que as ferramentas de tenacidade mais elevada.
- III. O menor desgaste das ferramentas de elevada dureza se deve ao fato de produzirem menor calor no contato peça-ferramenta na usinagem, devido ao maior atrito entre ambos.
- IV. As ferramentas de propriedades intermediárias, como as de metal duro (com ou sem cobertura) são as que apresentam melhores resultados nos processos de usinagem, independentemente dos parâmetros de corte adotados.

Com base nas afirmativas, assinale a alternativa correta quanto a serem verdadeiras (V) ou falsas (F):

- a) V – V – F – F.
- b) F – V – V – F.
- c) V – F – F – F.
- d) V – V – V – V.
- e) F – V – F – V.

2. Força e potência de usinagem são variáveis dos processos de manufatura mecânica de extrema importância, pois são fatores que influenciam diretamente na vida útil de uma ferramenta de corte. A força de corte na usinagem surge da interação entre a ferramenta de corte e a peça usinada, devido ao contato entre ambas que, por sua vez, provoca tensões que podem gerar trincas e falhas na ferramenta de corte. Outras variáveis que influenciam a força e a potência de usinagem estão ligadas às velocidades de corte e de avanço, além da profundidade de corte e da largura de corte e também do rendimento da máquina-ferramenta.

Sendo assim, podemos afirmar que:

I. Além das variáveis citadas, que afetam a força e a potência de corte, existe um parâmetro K_c chamado de coeficiente de força específica de corte que varia de acordo com o material usinado e com o valor do avanço por rotação (mm/rot).

Podemos dizer também que:

II. O valor de K_c independe do processo de usinagem que está sendo executado.

Analisando as afirmativas acima, concluímos que:

- a) A afirmativa I é verdadeira, e a afirmativa II complementa a primeira.
- b) A afirmativa I é falsa, e a afirmativa II é verdadeira.
- c) A afirmativa I é falsa, mas a afirmativa II complementa a primeira.
- d) A afirmativa I e II são verdadeiras, mas a afirmativa II não complementa a I.
- e) A afirmativa I é verdadeira, e a afirmativa II é falsa.

3. Nas operações de usinagem vários fatores impactam no cálculo da potência de corte, tal como mostra a expressão $P_{cT} = \frac{a_p \cdot f \cdot v_c \cdot K_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta}$ quando a operação de usinagem é o torneamento. Incluído nessas variáveis, o material a ser usinado apresenta uma forte influência na potência de corte, por meio do coeficiente de força específica de corte K_c (MPa), como podemos observar tanto na expressão de P_{cT} como na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 | Coeficiente de força específica de corte K_c (MPa) – Torneamento

Material Usinado	Resistência à tração (MPa)	Coeficiente de Força Específica de Corte K_c (MPa)				
		0,1 (mm/rot)	0,2 (mm/rot)	0,3 (mm/rot)	0,4 (mm/rot)	0,6 (mm/rot)
Aço baixo carbono	620	3080	2700	2570	2450	2300
Aço duro	720	4050	3600	3250	2950	2640
Aço ferramenta	670	3040	2800	2630	2500	2400
Aço Cr-Mn	770	3830	3250	2900	2650	2400
Aço Cr-Mo	730	4500	3900	3400	3150	2850
Aço Cr-Ni-Mo	900	3070	2650	2350	2200	1980

Fonte: adaptada de: <<http://mitsubishicarbide.net/contents>>. Acesso em: 27 set. 2017.

Em uma operação de usinagem, foi determinado que o motor da máquina-ferramenta deveria ser de 4,0 kW para um rendimento de 85%. Nos cálculos realizados pelo engenheiro responsável, encontrou-se uma potência de corte de 2,75 kW para uma operação de torneamento na qual foram utilizadas uma velocidade de corte de 100 m/min, uma profundidade de corte de 2,0 mm e um avanço de 0,3 mm/rot.

Com base na expressão do texto-base e na tabela apresentada, especifique qual o material que seria usinado e assinala a alternativa correta.

- Aço baixo carbono.
- Aço duro.
- Aço Cr-Mn.
- Aço ferramenta.
- Aço Cr-Ni-Mo

Referências

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica – processos de fabricação e tratamento**. v. 2, 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica. **Variáveis e parâmetros de corte**. Disponível em: <goo.gl/nwoCTB>. Acesso em: 26 set. 2017.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

SOUZA, André João de. **Processos de fabricação por usinagem**. Porto Alegre: UFRS, 2016.

Processos convencionais de usinagem

Convite ao estudo

Caríssimo aluno, seja bem-vindo aos estudos desta nossa segunda unidade de ensino, na qual abordaremos os processos convencionais de usinagem. Até onde eles de usinagem podem ser úteis nos dias atuais de tecnologias cada vez mais desenvolvidas?

Nesta unidade, veremos os processos de usinagem de torneamento, fresamento, furação, retificação, mandrilamento, roscamento e serramento, cujos conceitos que abordaremos serão de suma importância para que você desenvolva as competências técnicas previstas para esta unidade. Com isso, você estará apto a realizar análises dos procedimentos básicos relacionados aos principais processos convencionais de usinagem.

Aqui, você irá se deparar com uma empresa do setor metal-mecânico que é especializada em serviços de operação de usinagem, trabalhando com todos os processos convencionais de usinagem e atendendo uma vasta gama de clientes. Muitas das peças fabricadas pela empresa são de alumínio, porém tem-se constatado que diversas dessas peças vêm apresentando problemas, identificados pelo setor de qualidade, referentes ao grau de acabamento pós-desbaste. Tais problemas têm ocasionado a reclamação e, em muitos casos, a devolução do produto comprado pelo cliente, pelo fato de termos um produto não conforme, ou seja, porque a peça não atende aos requisitos exigidos pelo comprador. Você verá que a empresa adquiriu uma fresadora, um torno e uma furadeira, todos reconicionados, que estão precisando ser ajustados para algumas operações rotineiras de usinagem. Como a empresa

está em fase de expansão, ela irá te contratar como um *trainee* para trabalhar no setor de usinagem, portanto, caberá a você fazer uso de sua criatividade e curiosidade para solucionar os problemas apresentados por esses equipamentos.

Os conteúdos que serão abordados aqui permitirão que você, como *trainee*, resolva as situações da realidade profissional no contexto desta empresa. Como você imagina que é possível melhorar o acabamento dimensional e superficial de peças por meio dos processos convencionais de usinagem? Você acha que é possível regular os parâmetros de usinagem das máquinas-ferramentas a partir de cálculos teóricos? Se possível, como essa regulação é feita?

Os principais conteúdos que iremos desenvolver envolvem o estudo do torneamento, destacando suas características gerais, maquinário (torno universal) e ferramentas (pastilhas de usinagem), tipos de torneamento, seleção de rotações por minuto (rpm), movimento relativo entre a peça e a aresta cortante da ferramenta. No fresamento, veremos também as características gerais, maquinário e ferramenta. Faremos um comparativo fresamento versus torneamento. Você saberá diferenciar os tipos de fresamento (concordante e discordante) e as vantagens e desvantagens dos tipos de fresamento. Você também irá conhecer a fresa (ferramenta) com suas características gerais, tipos e geometrias. Finalizando, você conhecerá as características gerais, ferramentas e máquinas utilizadas na furação, na retificação, no mandrilamento, no serramento e no brunimento.

Sendo assim, mãos à obra e bons estudos!

Seção 2.1

Torneamento

Diálogo aberto

Caríssimo aluno, nesta seção, abordaremos o processo convencional de usinagem, chamado de torneamento, envolvendo: o processo, as variáveis e as características do torneamento, de forma que você seja apto a entender esse tipo de manufatura mecânica, a fim de aplicar seus parâmetros de usinagem em cálculos de velocidade de corte, força de corte, velocidade e avanço etc. O torneamento é um processo que faz parte do nosso cotidiano, por exemplo: móveis de madeira em estilo clássico são, em muitos casos, torneados totalmente ou parcialmente (pés de mesas, pés de cadeiras etc.), além de não nos darmos conta de que várias peças de um carro são produzidas por torneamento (eixos, principalmente).

Você foi contratado como *trainee* por uma empresa do setor metalúrgico especializada em serviços de operação de usinagem. No setor de torneamento, são usinadas peças de alumínio e utiliza-se uma ferramenta de aço rápido para sua usinagem, com velocidade de corte da ordem de 70 m/min. Porém, foi identificado um sério problema de acabamento em muitas peças nos processos pós-desbaste. Considerando que a peça tem um diâmetro de 100 mm, fazendo uso da Tabela 2.1, apresentada a seguir, especifique qual rotação n (rpm) deve ser utilizada para fazer a operação de desbaste, sabendo que o painel do torno possibilita a seleção das seguintes rotações: 100 – 200 – 300 – 400 – 500 – 800 – 1.000 rpm. Sua criatividade e curiosidade serão fundamentais para chegar à solução do problema proposto. Compare o resultado caso seja utilizada uma ferramenta de carboneto metálico para a mesma operação. Pense, ainda, como você procederia caso seus cálculos não permitissem escolher uma das rotações do painel do torno? Quais variáveis poderiam ser alteradas nesse caso?

Tabela 2.1 | Velocidade de corte para torno

TABELA DE VELOCIDADE DE CORTE (V) PARA O TORNO (EM METROS POR MINUTO)					
MATERIAIS	FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO			FERRAMENTAS DE CARBONETO-METÁLICO	
	DESBASTE	ACABAMENTO	ROSCAR RECARILHAR	DESBASTE	ACABAMENTO
AÇO 1020	25	30	10	200	300
AÇO 1045	20	25	8	120	160
AÇO EXTRADURO 1060	15	20	6	40	60
FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	20	25	8	70	85
FERRO FUNDIDO GRIS	15	20	8	65	95
FERRO FUNDIDO DURO	10	15	6	30	50
BRONZE	30	40	10-25	300	380
LATÃO E COBRE	40	50	10-25	350	400
ALUMÍNIO	60	90	15-35	500	700
FIBRA E EBNITE	25	40	10-20	120	150

Fonte: <goo.gl/aTu3hw>. Acesso em: 26 out. 2017.

Lembre-se de que, ao concluir o problema proposto, você deverá apresentar os resultados obtidos ao seu gerente na oficina de usinagem. Veja que responsabilidade!

Fique tranquilo, porque os conteúdos abordados nesta seção, que envolvem o conceito de usinagem por torneamento e como proceder para calcular os parâmetros de usinagem desta modalidade de processo de fabricação, serão úteis para que você solucione esse problema.

Bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno, vamos iniciar o estudo desta seção conhecendo um dos processos de manufatura mecânica mais tradicionais: o torneamento.

O torneamento é um processo de usinagem que, para dar forma e dimensões finais à peça usinada, utiliza uma máquina-ferramenta chamada torno. Uma das características principais do torneamento é que na sua execução a peça é o elemento que rotaciona e a ferramenta

tem um movimento retilíneo de avanço e penetração, removendo cavaco durante a usinagem. A Figura 2.1 ilustra como este processo ocorre.

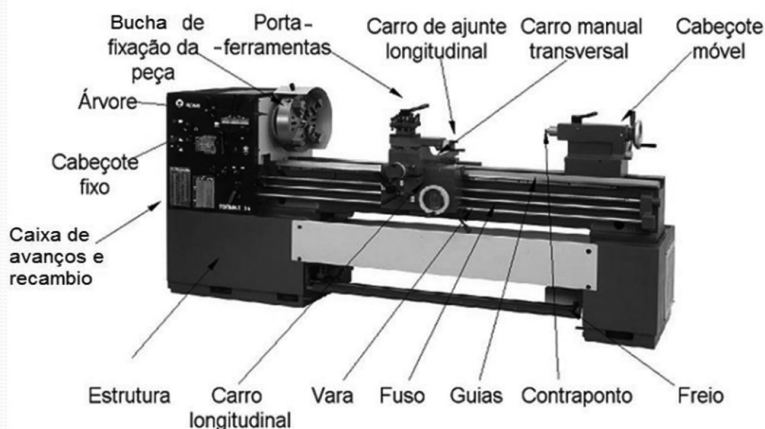
Figura 2.1 | Usinagem mecânica por torneamento



Fonte: <goo.gl/3QTqxy>. Acesso em: 5 out. 2017.

A máquina-ferramenta utilizada no torneamento é chamada de torno, cujas partes principais estão destacadas na Figura 2.2. O torno apresentado nesta imagem é o chamado “torno universal”, que é o modelo mais básico desse tipo de equipamento e também o mais comum de se encontrar nas oficinas de usinagem.

Figura 2.2 | Usinagem mecânica por torneamento



Fonte: <<http://1.bp.blogspot.com/-F-8pkqJZRIs/VCw2ev6HbaI/AAAAAAAAAME/WhS7jWjoa4/s1600/Torno%2Bmec%C3%A2nico.png>>. Acesso em: 5 out. 2017.

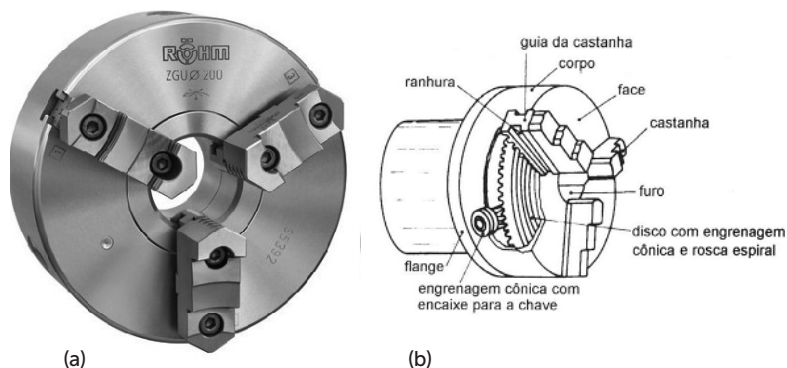
Observando a Figura 2.2, que ilustra o torno universal, a peça é fixada na árvore junto à placa de fixação, e a ferramenta é fixada no porta-ferramenta. A base do torno deve ser fortemente fixada (chumbada) no solo, ou em uma mesa de apoio no caso de um torno de pequenas dimensões, para evitar que a máquina sofra fortes vibrações e, conseqüentemente, comprometa o processo de usinagem. Dependendo das condições de usinagem (material usinado, rotação da máquina, velocidade de corte, material da pastilha de corte etc.), o torneamento pode ser realizado sem ou com o uso de fluido de corte.

Entre os tornos universais mecânicos, há os seguintes tipos mecânico paralelo, mecânico vertical e mecânico de faces. O torno mecânico paralelo é o mais utilizado nas operações de torneamento, sendo que o vertical se aplica na usinagem de peças robustas (pesadas) que não poderiam ser fixadas no torno paralelo, e o torno de faces aplica-se, principalmente, para peças de grandes dimensões e de pequenas espessuras.

Há, ainda, os tornos automáticos, que são os de Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Veja, meu caro aluno, em detalhes, na Figura 2.3, como é a placa de fixação do torno universal. Além da placa de fixação, as peças podem ser fixadas ao torno por meio de outros dispositivos: pinças (fixas e expansivas), placas indexáveis (para peças não concêntricas) e arrastador frontal (usadas em equipamentos CNC).

Figura 2.3 | Placa de fixação de um torno mecânico universal: (a) a placa; (b) detalhes da placa



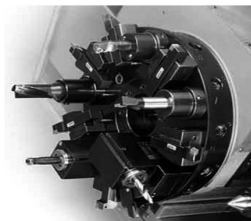
Fonte: (a) <http://www.platec.ind.br/produtos/13/PLACA_MECÂNICA>; (b) <<http://slideplayer.com.br/slide/294748/>>. Acessos em: 5 out. 2017.

No caso de tornos mais complexos e avançados, os chamados tornos comando numérico computadorizado (CNC) de centros de usinagem, o porta-ferramenta comporta diversas ferramentas para as mais variadas operações de usinagem; são os porta-ferramenta do tipo “revólver”, que você pode conferir na Figura 2.4 (b).

Figura 2.4 | Porta-ferramentas: (a) de torno mecânico universal; (b) do tipo revólver (de máquinas CNC)



(a)



(b)

Fonte: (a) <<http://www.citrinus.com/produtos.php?id=328>>; (b) <<http://www.tornoautomatico.com.br/index.php?pagina=materias&tipo=submenu&subid=55>>. Acesso em: 6 out. 2017.



Pesquise mais

A ROMI, localizada em Santa Bárbara do Oeste - SP, é uma empresa consolidada na fabricação de tornos dos mais variados modelos. Vale a pena fazer um tour pelo site da empresa: <<http://www.romi.com/>>. Acesso em: 25 out. 2017, que equivale a uma visita técnica, na qual você encontrará uma série de informações importantes sobre essa máquina-ferramenta.

As ferramentas utilizadas nos processos de torneamento são as pastilhas de usinagem, que podemos ver na Figura 2.5.

Figura 2.5 | Pastilhas de corte usadas em usinagem por torneamento



(a)



(b)

Fonte: <<http://www.fermec.com.br/usinagem/ferramentas-corte-torno-mecanico.php>>. Acesso em: 5 out. 2017.

Observe que as pastilhas de corte (a) possuem os mais variados formatos geométricos (daí o nome de ferramentas de corte de geometria definida), fabricadas nos mais diversos tipos de materiais e fixadas no porta-ferramenta, como podemos ver na figura (b). A pastilha pode ser fixada no porta-ferramenta por soldagem.

Existem dois acessórios muito importantes em um torno: a luneta e o cabeçote móvel.

A luneta é um acessório do torno mecânico muito útil na usinagem de eixos longos e de diâmetro pequeno. A luneta atua como uma espécie de apoio (ou mancal), evitando que ocorram desvios na usinagem da peça (eixo).

O cabeçote móvel é outro acessório dos tornos mecânicos que fica apoiado no barramento da máquina (que é a base do torno). Esse acessório fica do lado oposto do cabeçote fixo. Uma das principais funções do cabeçote móvel é o de servir como suporte à contraponta, destinada a apoiar um dos extremos da peça a torner.

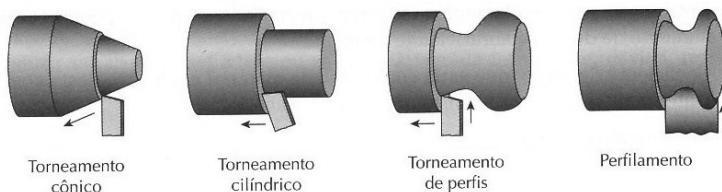


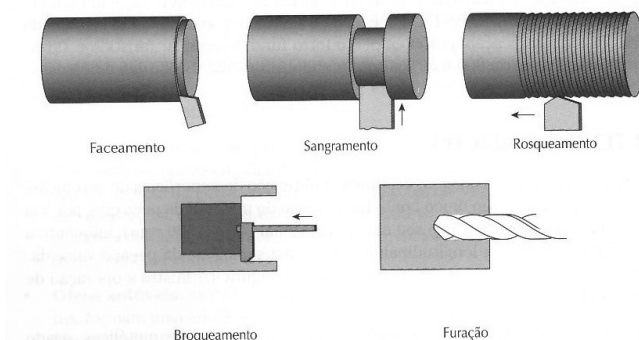
Assimile

Reforçando os conhecimentos adquiridos, as pastilhas de corte são fabricadas em metal duro, por processos de metalurgia do pó, utilizando, entre outras matérias-primas, o carboneto de tungstênio (WC), o carboneto de titânio e o carboneto de tungstênio (Ti,W)C, o cobalto, o carboneto de tântalo e o carboneto de nióbio (Ta, Nb)C.

Dada a diversidade de formas geométricas das ferramentas e a versatilidade do torno, é possível realizar diversas operações de torneamento, como mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6 | Tipos de operações de usinagem possíveis de se realizar no torno

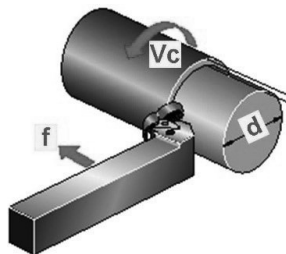




Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 113).

Caro aluno, a usinagem por torneamento caracteriza-se pela existência de um movimento relativo entre a peça e a aresta cortante da ferramenta, de tal forma que a peça rotaciona conforme a rotação (rpm) especificada para a operação por meio do painel do torno. A peça, ao rotacionar, e a ferramenta, ao avançar longitudinalmente e radialmente, realizam a operação de torneamento, de forma que a ferramenta extrai cavaco da peça. Ao penetrar radialmente na peça, a quantidade de cavaco removida dependerá da profundidade dessa penetração, chamada de profundidade de corte. A profundidade de corte (a_p) no torneamento pode ser calculada pela relação: $a_p = \frac{D-d}{2}$ [mm], em que D = diâmetro inicial da peça usinada [mm] e d é o diâmetro final da peça usinada [mm]. Vide esquema do processo na Figura 2.7.

Figura 2.7 | Movimentos da peça (rotação) e da ferramenta (avanço longitudinal) no torneamento



Fonte: <http://usinagemsemsegredos.blogspot.com.br/2010_08_01_archive.html>. Acesso em: 5 out. 2017.

A rotação da peça, presa na placa de fixação do torno, é especificada pela rpm do painel do torno, que pode variar em valores fixos, como: 100, 200, 400, 600, 800 rpm.



Vimos que no torneamento a peça rotaciona e a ferramenta de corte avança longitudinalmente e radialmente. Você acha que neste tipo de operação de usinagem seria possível ocorrer o inverso, ou seja, a ferramenta rotacionar e a peça avançar longitudinalmente? Seria viável?

Já vimos, em seções anteriores, que dentre os parâmetros de usinagem em torneamento, podemos destacar a velocidade de avanço, a velocidade de corte e a profundidade de corte. Veremos agora como fazer a correta seleção de rpm conforme as opções estabelecidas no painel do torno. A partir da velocidade de corte, podemos calcular a rotação (em rpm) pela expressão:

$$n = \frac{1000.v_c}{\pi.d} \text{ [rpm]}$$

Observe que, embora a rotação (rpm) possa ser calculada pela expressão acima, ela nos mostra a rotação teórica, a rotação real a ser usada no torno deve ser ajustada de forma a compatibilizar a operação de torneamento com os tipos de materiais da ferramenta e da peça usinada. Esse ajuste é realizado a partir de tabelas, tal como a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 | Velocidades de corte (v_c) em [m/min] para tornos

Materiais	Velocidade de Corte (m/min)				
	Ferramenta de Aço Rápido			Ferramentas de Carboneto Metálico	
	Desbaste	Acabamento	Roscar e Recartilhar	Desbaste	Acabamento
1020 - 1030 Aço Carbono Macio	25	30	10	200	300
1045 - 1050 Aço Carbono Duro	15	20	8	120	160
1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro	12	16	6	40	60
Ferro Fundido Maleável	20	25	8	70	85
Ferro Fundido Cinzento	15	20	8	65	95
Ferro Fundido Duro	10	15	6	30	50
Bronze	30	40	10 a 25	300	380
Latão e Bronze	40	50	10 a 25	350	400

Fonte: <<https://goo.gl/vxF2YL>>. Acesso em: 26 out. 2017.

O exemplo a seguir ilustra como utilizar a Tabela 2.2 para ajustar a rotação do torno.



Exemplificando

Um torno mecânico universal apresenta, em seu painel, um seletor de rotação (rpm) com as seguintes opções: 100 – 200 – 300 – 400 – 500 – 600 – 800 [rpm]. Na oficina de usinagem, você irá usinar um aço SAE 1070 fazendo uma operação de desbaste, utilizando uma ferramenta de aço rápido. A peça terá diâmetro final de 25 mm. Foi indicado para você utilizar uma velocidade de corte de 10 m/min.

Inicialmente, você irá solucionar este problema aplicando a expressão de cálculo de rotação.

$$n = \frac{1000.v_c}{\pi.d} = \frac{1000.10}{\pi.25} = 127,3 \text{ rpm}$$

No entanto, não há a opção de 127,3 rpm no painel do torno. Das rotações disponíveis, podemos optar por 100 rpm ou 200 rpm.

Se você selecionar a rotação de 100 rpm, a nova velocidade de corte será:

$$v_c = \frac{n.d.\pi}{1000} = \frac{100.25.\pi}{1000} = 7,85 \text{ m/min}$$

Se você optar pela rotação maior de 200 rpm, a nova velocidade de corte será:

$$v_c = \frac{n.d.\pi}{1000} = \frac{200.25.\pi}{1000} = 15,7 \text{ m/min}$$

Observe que na Tabela 2.2, para torneamento de desbaste em aço SAE 1070, a velocidade de corte indicada é de 12 m/min.

A rotação calculada (teórica) de 127,3 rpm está mais próxima de 100 rpm do que a de 200 rpm, logo, a rotação a ser ajustada é a de 100 rpm. Com essa rotação, você poderá utilizar uma velocidade de corte de até 12 m/min (Tabela 2.2). Como foi indicada a velocidade de 10 m/min, você está um pouco abaixo do limite máximo, portanto, não deverá forçar demais a ferramenta com a utilização dessa velocidade.

Assim, veja o quanto é importante fazer uma operação de usinagem com a rotação adequada (com dados a partir de tabelas), a fim de obter os melhores resultados tanto em termos de tempo de usinagem, como também de um melhor aproveitamento da ferramenta de corte.

Sem medo de errar

Caro aluno, lembrando: você foi contratado como *trainee* por uma empresa do setor metalúrgico e, neste momento, você deverá buscar uma possível solução para o problema de acabamento em muitas peças nos processos pós-desbaste, especificando alguns parâmetros de usinagem por torneamento, fazendo uso de sua criatividade.

Você deve calcular, inicialmente, a rotação do torno quando estiver usando a ferramenta de aço rápido. Para isso, use a expressão para cálculo teórico da rotação, que é a seguinte:

$$n = \frac{1000.v_c}{\pi.d} = \frac{1000.70}{\pi.100} = 222,8 \text{ rpm}$$

Porém, no painel do torno você pode usar 200 ou 300 rpm para esta operação. Para isso, você irá agora dimensionar a rotação necessária:

i) Para 200 rpm: $v_c = \frac{n.d.\pi}{1000} = \frac{200.100.\pi}{1000} = 62,8 \text{ m/min}$

ii) Para 300 rpm: $v_c = \frac{n.d.\pi}{1000} = \frac{300.100.\pi}{1000} = 94,2 \text{ m/min}$

A Tabela 2.1 indica a velocidade de 60 m/min para desbaste de alumínio. Portanto, você escolherá a rotação de 200 rpm, quando do uso de ferramenta de aço rápido.

Ao tentar substituir a ferramenta de aço rápido pela ferramenta de carbeto metálico para desbaste do alumínio, note na Tabela 2.1 que a velocidade de corte é da ordem de 500 m/min e com isso a rotação mínima necessária seria:

$$n = \frac{1000.v_c}{\pi.d} = \frac{1000.500}{\pi.100} = 1591 \text{ rpm}$$

Porém, como a rotação máxima no painel do torno é de 1.000 rpm, a rotação calculada fica impraticável, tornando inviável, nas condições da oficina de usinagem, o uso de ferramenta de metal duro para o desbaste da peça de alumínio.

Observe que para solucionar esse problema você teve que ter os conceitos de cálculo de rotação (rpm) do torno e saber fazer o ajuste desta rotação calculada, que é teórica, em relação à rotação real do

torno estabelecida pelo painel do mesmo em valores fixos (100 – 200 – 300 – 400 – 500 – 800 – 1000).

Note, ainda, que a oficina de usinagem que o contratou como *trainee* estava fazendo uso de uma velocidade de corte de 70 m/min para desbastar o alumínio, que é um material extremamente maleável (mole) e, possivelmente, a rotação que estava sendo usada era maior que a de 200 rpm recomendada, o que pode ser a causa das imperfeições na peça após a fase de desbaste.

No caso de trocar a ferramenta de aço rápido para aço de metal duro, tanto a rotação como a velocidade de corte teriam que ser elevadas em valores muito superiores aos utilizados com a ferramenta de aço rápido, conforme pode ser observado na Tabela 2.1. Isso responde, em parte, ao seguinte questionamento: “(...) como você procederia caso seus cálculos não permitissem escolher uma das rotações do painel do torno? Quais variáveis poderiam ser alteradas nesse caso?”. Tem-se que a rotação depende diretamente da velocidade de corte e, caso os cálculos não permitissem selecionar uma das rotações do painel, você deveria alterar a velocidade de corte ou alterar o material da ferramenta (vide Tabela 2.1), visto que não é recomendado alterar o diâmetro “d” da peça sem consultar previamente o cliente.

Finalmente, os resultados que você obteve com seus cálculos deverão ser entregues ao seu gerente, que lhe incumbiu de fazer essa verificação na forma de um relatório, demonstrando quais reais parâmetros de usinagem devem ser adotados para que a peça seja usinada de forma correta.

Avançando na prática

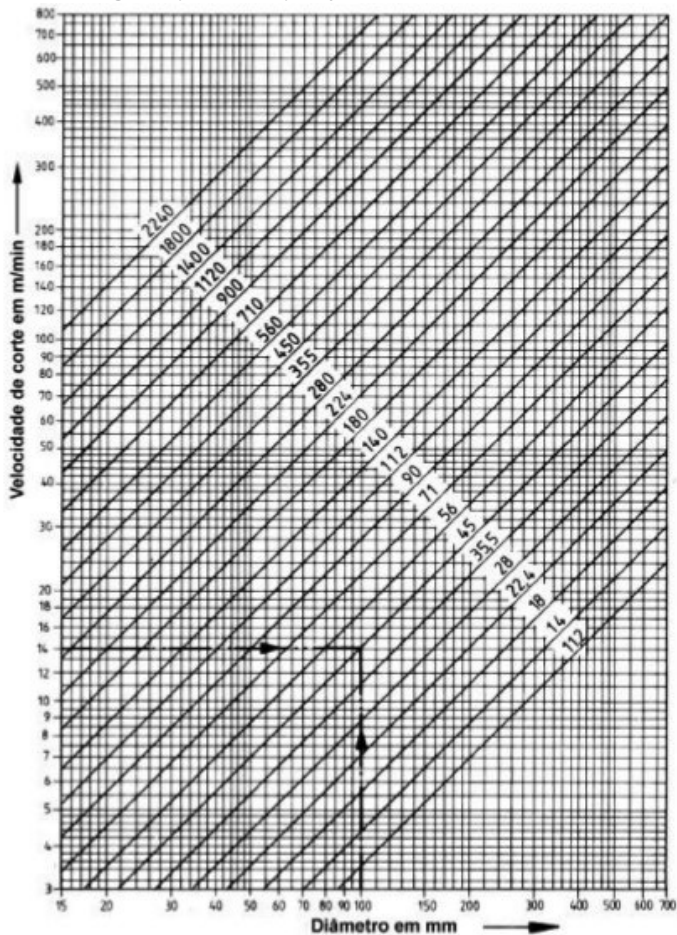
Determinação da rpm pelo nomograma de torneamento

Descrição da situação-problema

Ao ter que realizar o torneamento de uma peça, você recebeu um nomograma, que é um gráfico que relaciona velocidade de corte, diâmetro de usinagem da peça e rotação (rpm), para definir qual é a rotação a ser utilizada nesta operação. O nomograma está

representando na Figura 2.8, que ilustra um exemplo de uso. Nesse exemplo, temos um diâmetro de 100 mm e uma velocidade de corte de 14 m/min, o que nos leva a 45 rpm. Considerando que você vai tornear uma peça de aço SAE 1020, de diâmetro 120 mm, com uma ferramenta de aço rápido, e com uma velocidade de corte de 50 m/min, use o gráfico para estimar a rotação a ser utilizada. Como você havia feito o cálculo da rotação pela fórmula, compare os resultados encontrados. A que conclusão você chegou?

Figura 2.8 | Nomograma para uma operação de torneamento



Fonte: <<https://goo.gl/XidNMa>>. Acesso em: 14 out. 2017.

Resolução da situação-problema

Atente, caro aluno, para o nomograma apresentado, que a partir do cruzamento da linha vertical ($d = 120$ mm) com a linha horizontal de $v_c = 50$ m/min, encontramos a linha inclinada, que nos indica uma rotação $n = 140$ rpm (vide analogia com o exemplo apresentado no monograma, linha com seta).

Ao calcular a rotação pela expressão, temos que

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 50}{\pi \cdot 120} = 132,6 \text{ rpm}.$$

Porém, você consultou a Tabela 2.1 e verificou que, para o aço SAE 1020 usinado com ferramenta de aço rápido, a velocidade de corte recomendada é de 25 m/min (metade da que está sendo utilizada).

Com isso, a rotação seria de $n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 25}{\pi \cdot 120} = 66,3$ rpm.

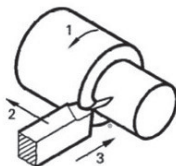
Voltando ao nomograma, para a velocidade de corte de 25 m/min e diâmetro da peça 120 mm, a rotação indicada é de 71 rpm.

Assim, você deve indicar em seu relatório conclusivo que a velocidade de corte nesta operação de usinagem está superestimada (50 m/min), o que torna a rotação do torno mais elevada, forçando tanto a máquina-ferramenta como a ferramenta de corte. Logo, deve se recomendar diminuir a velocidade de corte pela metade (25 m/min) para se trabalhar com uma rotação mais adequada, fazendo uso daquela indicada no nomograma (71 rpm).

Faça valer a pena

1. Os processos de fabricação por usinagem mecânica convencional, devido à versatilidade das máquinas-ferramentas que são usadas para este fim, são as mais utilizadas pela indústria mecânica. Vejamos a Figura 2.9, que demonstra um processo de usinagem convencional:

Figura 2.9 | Usinagem mecânica convencional



Fonte: <<https://pt.scribd.com/document/345241471/apostila-senai-processos-mecc3a2nicos-de-usinagem-pdf>>. Acesso em: 14 out. 2017.

Este processo de usinagem é o _____, no qual o número 1 indica o _____ da peça, o número 2 indica o _____ da ferramenta e o número 3 nos mostra o movimento de _____ executado pela ferramenta.

Qual das alternativas complementa de forma correta os espaços do texto?

- a) torneamento – movimento de rotação – movimento de avanço – movimento de corte.
- b) torneamento – movimento de corte – movimento de avanço – profundidade de corte.
- c) fresamento – movimento de corte – movimento de avanço – profundidade de corte.
- d) torneamento – movimento de avanço – movimento de corte – profundidade de corte.
- e) faceamento – movimento de rotação – profundidade de corte – movimento de corte.

2. O torneamento é um processo convencional de usinagem cujo resultado depende muito da rotação utilizada no processo. Tais rotações podem ser estabelecidas a partir dos valores indicados no painel da máquina. Assim:

(I) A rotação de um torno pode ser calculada pela relação $n = \frac{1000.v_c}{\pi.d}$ em rpm se conhecidas a velocidade de corte e o diâmetro da peça usinada.

Porém,

(II) As máquinas-ferramentas, inclusive o torno, possuem rotações (rpm) específicas indicadas no seu painel, o que exige que a velocidade de corte e a própria rotação sejam ajustadas para uma determinada operação de torneamento.

Assinale qual das alternativas a seguir é a correta.

- a) A assertiva (I) é verdadeira, mas a assertiva (II) é falsa.
- b) A assertiva (I) é falsa e a assertiva (II) é verdadeira.
- c) A assertiva (I) é verdadeira e a assertiva (II) a complementa.
- d) A assertiva (I) é verdadeira, mas a assertiva (II) não a complementa.
- e) As assertivas (I) e (II) são falsas.

3. Ao usinar (tornear) um eixo de 45 mm de diâmetro de aço SAE 1060 extraduro usando uma ferramenta de carboneto metálico para uma operação de desbaste com a velocidade de corte estabelecida pela Tabela 2.2, a seguir, deve-se fazer um ajuste na rotação.

Tabela 2.2 | Velocidades de corte (v_c) em [m/min] para tornos

Materiais	Velocidade de Corte (m/min)				
	Ferramenta de Aço Rápido			Ferramentas de Carboneto Metálico	
	Desbaste	Acabamento	Roscar e Recartilhar	Desbaste	Acabamento
1020 - 1030 Aço Carbono Macio	25	30	10	200	300
1045 - 1050 Aço Carbono Duro	15	20	8	120	160
1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro	12	16	6	40	60
Ferro Fundido Maleável	20	25	8	70	85
Ferro Fundido Cinzento	15	20	8	65	95
Ferro Fundido Duro	10	15	6	30	50
Bronze	30	40	10 a 25	300	380
Latão e Bronze	40	50	10 a 25	350	400

Fonte: <<https://goo.gl/vxF2YL>>. Acesso em: 26 out. 2017.

De acordo com o texto-base apresentado, qual rotação deve ser ajustada no torno, sabendo que as opções do painel são as seguintes: 100 – 200 – 300 – 400 – 600 rpm?

- 100 rpm.
- 200 rpm.
- 300 rpm.
- 400 rpm.
- 600 rpm.

Seção 2.2

Fresamento

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, iremos tratar do processo de usinagem por fresamento, com a missão de calcularmos alguns parâmetros de usinagem, tal como foi realizado no torneamento. Procure fazer uma analogia com as expressões usadas no torneamento e veja a similaridade das mesmas, com pequenas diferenças que fazem do fresamento uma operação singular.

Uma situação rotineira similar ao funcionamento de uma fresa seria o funcionamento de uma roçadeira rotativa de trator, que ao girar em torno de seu próprio eixo e, ao avançar longitudinalmente (puxada pelo trator), realiza a extração da planta do solo.

Na empresa em que você ingressou como *trainee* no setor de usinagem, uma máquina de fresamento reconcondicionada foi adquirida e seu chefe designou você para ajustar a máquina, fazendo um teste de uma operação de usinagem (fresamento). As seguintes informações lhe foram fornecidas, considerando a Tabela 2.3, usada como referência em uma operação de usinagem de fresamento:

Tabela 2.3 | Velocidade de corte em função do tipo de operação (desbaste ou acabamento) e do material usinado em fresamento, utilizando fresa de aço rápido HSS

Material	V_c (m/min)		
	Desbaste		Acabamento
	Até 8 mm	Até 5 mm	(1,5 mm)
Aço até 60 kgf / mm^2	16 – 20	22 – 26	32 – 36
Aço de 60 a 90 kgf / mm^2	14 – 16	20 – 24	26 – 30

Aço de 90 a 110 <i>kgf / mm²</i>	12 – 14	18 – 22	22 – 26
Aço acima de 110 <i>kgf / mm²</i>	8 – 12	14 – 16	16 – 20
Ferro fundido até 180 HB	18 – 22	24 – 28	18 – 32

Fonte: <<http://www.grupointaco.com.br/downloads/Catalogo-Indaco.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

Com base nesta tabela, determinou-se que a velocidade média de corte de usinagem deveria ser de 15 m/min em uma operação de desbaste de 7 mm. Utilizando-se de criatividade e de raciocínio crítico para solução problemas, você deverá determinar: (a) qual é a resistência do material a ser usinado? (b) Para essa velocidade de corte de 15 m/min, sabendo que o diâmetro da fresa a ser utilizada é de 12 mm e que a mesma possui seis dentes e um avanço de 0,05 mm/dente, qual é a rotação calculada? (c) Se no painel da fresadora as rotações especificadas são (100 – 200 – 300 – 400 – 500 rpm), qual é a mais indicada a ser adotada? Justifique seus cálculos em seu relatório.

Caro aluno, lembre-se de que os conteúdos necessários para a resolução do problema proposto serão apresentados em detalhes ao longo deste material, mas podemos antecipar que é fundamental saber utilizar as equações para cálculos de parâmetros de usinagem, as tabelas que relacionam material usinado com operações de desbaste ou acabamento e também com a velocidade de corte.

É importante que você solucione o problema proposto utilizando os conhecimentos adquiridos, pois, no mundo da usinagem, profissionais que nele atuam precisam ter os conhecimentos aqui apresentados consolidados para uma boa prática profissional. Vamos aos estudos!

Não pode faltar

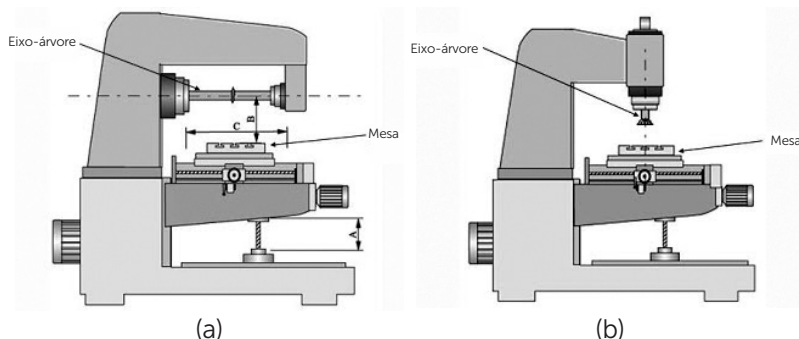
Fresamento: características gerais, maquinário e ferramenta. Comparativo fresamento versus torneamento

Caro aluno, estamos na Seção 2 desta unidade, estudando, agora, a manufatura mecânica por fresamento.

O fresamento é uma operação de usinagem do tipo convencional que faz uso da máquina-ferramenta chamada de fresadora, cuja ferramenta é a fresa, que se caracteriza por possuir mais de uma aresta de corte, portanto, é multicortante.

A Figura 2.9 ilustra fresadoras mecânicas universais, destacando suas principais partes. As fresadoras podem ter uma configuração horizontal e vertical.

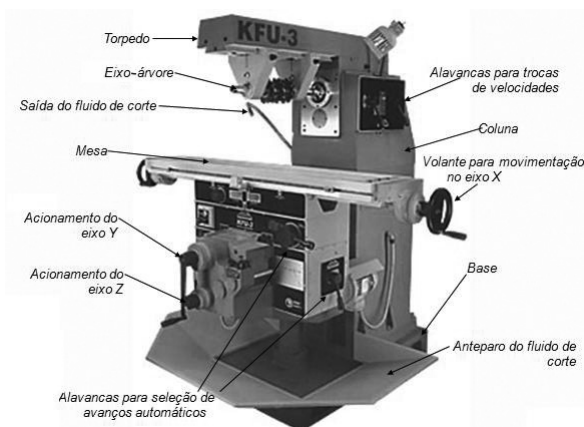
Figura 2.9 | Fresadora mecânica universal: (a) horizontal; (b) vertical



Fonte: <<https://tecmecanico.blogspot.com.br/2011/10/fresadoras.html>>. Acesso em: 19 out. 2017.

As fresadoras, por exemplo a máquina apresentada na Figura 2.10, evoluíram muito a partir de máquinas plainadoras e, quando adaptadas ao sistema comando numérico computadorizado (CNC), apresentam versatilidade e elevado desempenho.

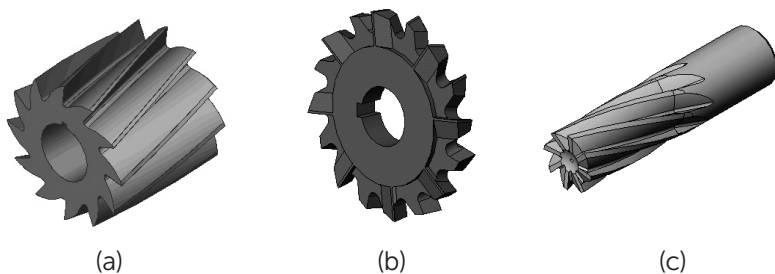
Figura 2.10 | Componentes principais de uma fresadora universal



Fonte: <<https://tecmecanico.blogspot.com.br/2011/10/fresadoras.html>>. Acesso em: 19 out. 2017.

A Figura 2.11 nos mostra exemplos de tipos de fresa, que é a ferramenta de corte das fresadoras.

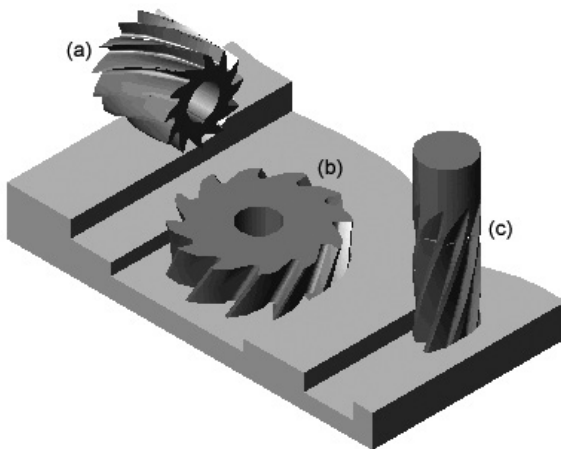
Figura 2.11 | Tipos de fresa: (a) cilíndrica horizontal; (b) fresa de disco; (c) fresa cilíndrica vertical (ou de topo)



Fonte: (a) <<http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/c-24-103-3040-6523.gif>>; (b) <<http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/c-24-103-3357-7133.gif>>; (c) <<http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/c-24-103-3433-7257.gif>>. Acesso em: 19 out. 2017.

Observe, a partir da Figura 2.12, como cada um desses tipos de fresa pode operar.

Figura 2.12 | Formas de operação de fresamento em função do tipo de fresa: (a) cilíndrico tangencial, (b) frontal, (c) de topo



Fonte: <<http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/c-24-103-5020-9711.gif>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Independentemente do tipo de fresa, a característica marcante desse tipo de ferramenta são seus “dentes de corte”, que podem variar em formato e quantidade.

No que diz respeito às principais diferenças entre as fresadoras e os tornos, podemos destacar:

- i. No torno a peça usinada rotaciona (gira) e a ferramenta avança longitudinalmente e radialmente, enquanto que na fresadora é a fresa (ferramenta) que rotaciona e a peça movimenta-se longitudinal ou transversalmente (ou, até, pode ficar estacionada).
- ii. A pastilha de corte do torno é monocortante (possui uma única aresta de corte), enquanto que no fresamento a fresa possui diversas arestas (dentes) de corte.

Apesar das diferenças, tanto o torno como a fresadora podem ser automatizados no padrão CNC e operar ou não com fluido de corte.



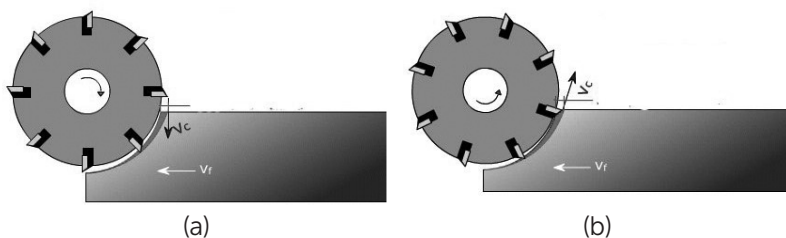
Refleta

Você acha que é possível realizar na fresadora as mesmas operações de usinagem que são realizadas no torno, por exemplo, criar superfícies de revolução? Você acha também que a fresa, por possuir várias arestas de corte, sofre um desgaste menor que uma pastilha de corte do torneamento? *Funda a cuca!*

Tipos de fresamento (concordante e discordante), vantagens e desvantagens dos tipos de fresamento.

Uma vez fixada no porta-ferramenta, as fresas têm uma característica peculiar: elas podem girar (e cortar) tanto no sentido horário como no sentido anti-horário, como é possível observar na Figura 2.13.

Figura 2.13 | Tipos de fresamento: (a) concordante; (b) discordante



Fonte: adaptada de: <<http://www.metalica.com.br/fresamento-e-suas-finalidades>>. Acesso em: 19 out. 2017.

Observe que, da combinação dos movimentos relativos da peça e da fresa, podemos ter o fresamento concordante, no qual o sentido de rotação da fresa acompanha o movimento de avanço da peça usinada [Figura 2.13 (a)]; no fresamento discordante o sentido de rotação da fresa opõe-se ao movimento de avanço da peça usinada [Figura 2.13 (b)].

Observe que pelo fato de a fresa se opor ao movimento de avanço da peça, no fresamento discordante a fresa é mais exigida e é, portanto, mais susceptível ao desgaste.

No fresamento concordante, por sua vez, a fresa é menos exigida na usinagem e proporciona um acabamento superficial superior ao do fresamento discordante. Além disso, nas fresadoras convencionais, que não são CNC, a movimentação do carro é por rosca sem-fim e parafuso. Folgas aparecem entre os dois e, no caso da concordante, isso causa uma perda de qualidade e precisão. Na discordante isso não afeta a operação.

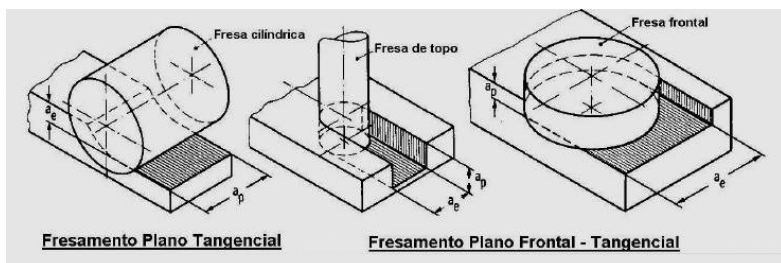


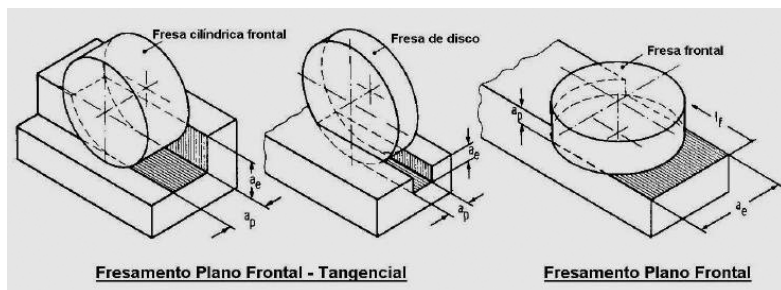
Assimile

A mesa das fresadoras, onde são fixadas as peças usinadas, pode ter deslocamentos segundo dois eixos perpendiculares (x, y), fazendo com que a fresa possa realizar operações diversas, tais como aplainamentos de superfícies, rasgos e furos, gerando superfícies com excelente acabamento.

A Figura 2.14 ilustra os principais tipos de fresamento.

Figura 2.14 | Principais tipos de fresamento





Fonte: <<http://docplayer.com.br/23226549-Tecnico-em-fabricacao-mecanica-usinagem-convencional-fresagem-prof-msc-doroteu-afonso-coelho-pequeno.html>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Fresa (ferramenta): características gerais, tipos e geometria

Veremos agora, em maiores detalhes, as principais características das fresas, que são as ferramentas de corte das fresadoras.

Segundo o Centro de Informações Metal Mecânica (CIMM) (2017), as fresas possuem uma série de classificações, dentre as quais podemos separar em: (a) quanto ao método de fresamento; (b) quanto ao tipo de construção de fresas; (c) quanto à forma geométrica da fresa; (d) quanto ao tipo de flanco ou superfícies de incidência da fresa; (e) quanto à forma dos dentes das fresas e dos canais entre os dentes; (f) quanto ao sentido de corte das fresas; (g) quanto à montagem e fixação das fresas nas máquinas (fresadora) e; (h) quanto à aplicação das fresas.



Pesquise mais

As geometrias das fresas são muito variadas, o que torna impossível sua apresentação por completo neste livro didático. Para visualizar outros possíveis tipos de fresas, consulte catálogos on-line de fabricantes, tais como o disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/8014/8092/3464/catalog_c007z_j.pdf>. Acesso em: 19 out. 2017.

Parâmetros de usinagem em fresamento: velocidades de avanço e de corte, rotação e seleção de rpm e de velocidade de corte (desbaste e acabamento)

A exemplo do que você viu no torneamento, aqui no fresamento os parâmetros de usinagem podem ser estabelecidos, tais como a velocidade de corte v_c (no desbaste e no acabamento), a velocidade de avanço v_f e rotação n (rpm) e a seleção adequada da rotação por meio da indicação no painel da máquina fresadora.

A velocidade de corte pode ser assim calculada: $v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$ [m/min], em que D é o diâmetro da fresa [mm] e n é a rotação do eixo da fresa [rpm].

Como as fresas possuem dentes (insertos) de arestas cortantes, o avanço da fresa por dente (f_z) pode ser obtido pela expressão: $f_z = \frac{v_f}{z \cdot n}$ [mm/dente], em que v_f é a velocidade de avanço da mesa em [mm/min], z é o número de insertos (dentes) e n é a rotação em [rpm].

$$\text{Assim: } v_f = z \cdot f_z \cdot n = \frac{1000 \cdot v_c \cdot z \cdot f_z}{\pi \cdot D} \text{ [m/min].}$$

O tempo de corte (t_c) no fresamento pode ser calculado a partir da relação $t_c = \frac{L}{v_f}$ [min], em que L em [mm] é o comprimento total do avanço da mesa, que inclui o comprimento da peça (l) mais o diâmetro da fresa (D), ou seja, $L = (l + D)$.

Outro parâmetro importante no fresamento é o cálculo de cavaco removido (Q), que pode ser obtido pela expressão: $Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f$ [mm^3/min], em que a_p é a profundidade de corte [mm] e a_e é a penetração de trabalho [mm].

As tabelas fornecidas pelos fabricantes de fresas relacionam os tipos de operação (desbaste e acabamento) com o material a ser usinado, o tipo de fresa (disco ou topo, por exemplo) e as velocidades de corte recomendadas. No entanto, a velocidade de corte tem sempre que ser ajustada (ou corrigida) em função da rotação [rpm] da máquina indicadas no painel da mesma, como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 | Referência para velocidade de corte em fresamento com fresa de topo de aço rápido do tipo M2

ESCOLHA DA VELOCIDADE DE CORTE - Fresa de Topo - M2

MATERIAL a ser cortado	Velocidade de corte, em m/min		
	Desbaste até a profundidade de		Acabamento 1,5 mm
	8 mm	5 mm	
Aço até 60 kg/mm²	16 – 20	22 – 26	32 – 36
Aço de 60-90 kg/mm²	14 – 16	20 – 24	26 – 30
Aço de 90-110 kg/mm²	12 – 14	18 – 22	22 – 26
Aço acima de 110 kg/mm²	8 – 12	14 – 16	16 – 20
Ferro fundido, até 180 HB	18 – 22	24 – 28	18 – 32
Ferro fundido, acima de 180 HB	10 – 14	12 – 18	18 – 22
Latão	32 – 48	46 – 72	60 – 120
Metais leves	220 – 320	280 – 480	400 – 520
Cobre	40 – 50	60 – 80	80 – 100

Fonte: adaptada de <<http://www.grupoindaco.com.br/parametros/parametros.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2017.

Assim, fechamos com um exemplo prático mais um importante tópico da usinagem convencional: o fresamento.



Exemplificando

Caro aluno, suponha que você irá realizar uma operação de usinagem (fresamento) para desbaste de 7,0 mm em um aço de resistência $100 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$. Considere que será usada uma fresa de topo (mandril) de diâmetro $D = 25$ mm e com $z = 4$ dentes e um avanço por dente $f_z = 0,22$ [mm/dente]. Calcule os parâmetros de corte dessa operação, sabendo que a fresadora opera nas seguintes rotações (rpm): 50 – 100 – 200 – 350 – 600 rpm.

Vamos à solução:

Da nossa Tabela 2.4, para aço com $100 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$ e desbaste de 7 mm: $V_c = 12 - 14$ m/min.

Escolhemos a V_c média $v_c = 13$ m/min, daí:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 13}{\pi \cdot 25} = 165,5 \text{ rpm.}$$

No painel da fresadora temos: 50 – 100 – 200 – 350 – 600 rpm. Escolhemos o maior valor, que é mais próximo de 165,5 rpm. Escolhemos 200 rpm.

Corrigindo a v_c :

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 25}{1000} = 15,7 \text{ m/min} > 14 \text{ m/min.}$$

Logo, escolho uma nova rotação (rpm) para a fresadora, ou seja, $n = 100$ rpm e, novamente, corrigimos a v_c :

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 25}{1000} = 7,85 \text{ m/min.}$$

Observe que para a rotação de 200 rpm, a velocidade de corte deveria ser de 15,7 m/min (acima da estabelecida pela tabela para desbaste até 8 mm) e, para rotação de 100 rpm a velocidade de corte de 7,85 m/min está bem abaixo da velocidade mínima recomendada pela tabela para até 8 mm de desbaste (que é de 12 m/min). Assim, o mais prudente é optar pela velocidade de corte de 14 m/min (limite superior para desbaste até 8 mm para aço com $100 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$).

Velocidade de avanço da mesa (v_f):

$$v_f = \frac{1000 \cdot v_c \cdot z \cdot f_z}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 14 \cdot 4 \cdot 0,22}{\pi \cdot 25} = 157 \text{ mm/min}$$

Podemos concluir, portanto, que para as condições de usinagem impostas na situação-problema, considerando o intervalo admissível de rotação da fresadora e os limites de velocidade de corte estabelecidos pela Tabela 2.4, o ajuste da velocidade final de corte (14 m/min) foi escolhido para atender aos parâmetros de usinagem adequados à operação.

Sem medo de errar

Caro aluno, lembre-se de que o fresamento é uma importante operação de usinagem convencional e dada a variedade de possibilidades de formas de fresamento, o processo é extremamente versátil.

Essa versatilidade fez com que a empresa que o contratou comprasse uma fresadora recondicionada e o incumbisse de fazer alguns testes com ela, utilizando-se de criatividade e de raciocínio crítico para a solução de problemas.

Você realizará uma usinagem de desbaste de 7,0 mm a uma velocidade de corte de 15 m/min. Assim, com base nesses dados, você

procurou encontrar qual material é possível de ser usinado analisando a Tabela 2.5 fornecida.

Tabela 2.5 | Referência para velocidade de corte em fresamento com fresa de topo de aço rápido do tipo M2

Material	v_c (m/min)		
	Desbaste		Acabamento
	Até 8 mm	Até 5 mm	(1,5 mm)
Aço até 60 kgf / mm^2	16 – 20	22 - 26	32 – 36
Aço de 60 a 90 kgf / mm^2	14 – 16	20 - 24	26 – 30
Aço de 90 a 110 kgf / mm^2	12 – 14	18 – 22	22 – 26
Aço acima de 110 kgf / mm^2	8 – 12	14 - 16	16 – 20
Ferro fundido até 180 HB	18 – 22	24 - 28	18 – 32

Fonte: adaptada <<http://www.grupointaco.com.br/parametros/parametros.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2017.

Do cruzamento de dados (destacado) na tabela, você pode concluir que o material a ser usinado se trata do aço de 60 a 90 kgf / mm^2 , visto que você irá desbastar 7,0 mm e deve recorrer à coluna de “Até 8 mm”.

A sua velocidade de corte está na média das velocidades indicadas na tabela, ou seja, $v_c = \frac{14 + 16}{2} = 15$ m/min.

Portanto: $v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 15}{\pi \cdot 12} = 397,9$ [rpm].

No entanto, o painel da fresadora disponibiliza as seguintes rotações: 100 – 200 – 300 – 400 – 500 rpm. A rotação calculada (397,9 rpm) se aproxima muito da rotação de 400 rpm do painel. Assim, você deverá selecionar a rotação de 400 rpm, que não afetará de forma significativa a sua velocidade de corte de 15 m/min, que não precisará ser ajustada para a rotação do painel.

Note que, para solucionar esta situação, bastaram alguns conhecimentos fundamentais do processo de usinagem por fresamento, que envolvem cálculo de rotação (rpm) e o uso adequado de tabela de dados, geralmente, disponibilizados por fabricantes de fresas e fresadoras, o que permitiu, dentro da sua simplicidade, realizar a análise dos procedimentos básicos relacionados aos principais processos convencionais de usinagem, no caso o fresamento.

Como você também possui a informação de que a fresa tem seis dentes e o avanço por dente é de 0,05 mm/dente, é possível calcular a velocidade de avanço da mesa (v_f), tal que:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,05 \cdot 6 \cdot 400 = 120 \text{ mm/min.}$$

Portanto, seu relatório sobre o teste da fresadora deverá conter as seguintes informações:

- Material usinado: aço de 60 a 90 **kgf / mm²**.
- Velocidade de corte: 15 m/min.
- Velocidade de avanço: 120 mm/min.
- Rotação da fresadora: 400 rpm.

Garantimos, assim, que os parâmetros mínimos de usinagem sejam determinados por meio dos cálculos realizados e com o auxílio da Tabela 2.5.

Avançando na prática

Cálculo de volume de cavaco extraído no fresamento

Descrição da situação-problema

Você deverá usinar por fresamento de desbaste, utilizando uma fresa cilíndrica, uma placa de aço de 55 **kgf / mm²** de resistência. O diâmetro da fresa é de 70 mm e com seis dentes e você usará uma velocidade de corte de 17 m/min. A fresadora dispõe das seguintes rotações: 25 – 50 – 75 – 100 – 200 – 300 – 400 – 500 rpm. A fresa tem um motor de potência 3 kW e rendimento de 75%. Com essas informações, você deverá selecionar a rpm mais adequada na fresadora e calcular a quantidade de cavaco extraída da peça por minuto. São dados ainda:

profundidade de corte $a_p = 10\text{mm}$, penetração de trabalho $a_2 = 20\text{mm}$ e $f_z = 0,2\text{mm/dente}$.

Resolução da situação-problema

Você irá, inicialmente, calcular a rotação teórica da fresadora pela expressão $n = \frac{1000.v_c}{\pi.D} = \frac{1000.17}{\pi.70} = 77,3$ rpm. Com base nessa rotação e conforme estabelece a fresadora, as rotações mais indicadas seriam as de 75 e 100 rpm. Como 77,3 está mais próxima de 75 do que a de 100 rpm, opta-se pela menor, ou seja, a rotação selecionada será a de $n = 75$ rpm.

Em uma segunda etapa, você irá calcular o volume de cavaco extraído por minuto nessa operação. Para tanto, fazendo uso da expressão $Q = a_p.a_e.v_f$, sendo que $v_f = f_z.z.n$, logo:

$$Q = a_p.a_e.f_z.z.n = 4.20.0,2.6.75 = 7200\text{mm}^3 / \text{min} = 7,2\text{cm}^3 / \text{min}$$

Conclui-se, portanto, que para as condições de usinagem apresentadas, a rotação da fresadora regulada no seu painel deverá ser de 75 rpm e o volume de cavaco produzido por minuto de operação será de $7,2\text{cm}^3 / \text{min}$.

Faça valer a pena

1. A fresadora utiliza uma ferramenta chamada fresa, cujo diâmetro (D) tem uma forte influência na operação de usinagem, afetando os parâmetros de corte. Suponha que um operador de fresadora estava usando uma fresa de diâmetro d_1 e de quatro dentes. Logo em seguida, ele trocou a ferramenta por uma outra de diâmetro $\frac{d_1}{3}$ e de seis dentes, mantendo os demais parâmetros constantes.

Quais foram as variações de rotação da fresa e da velocidade de avanço da mesa observada? Assinale a alternativa que corresponda aos valores corretos.

- a) $n_2 = 3.n_1$ e $v_{f2} = 18.v_{f1}$.
- b) $n_2 = \frac{n_1}{3}$ e $v_{f2} = \frac{2}{9}.v_{f1}$.
- c) $n_2 = 3.n_1$ e $v_{f2} = 6.v_{f1}$.
- d) $n_2 = n_1$ e $v_{f2} = v_{f1}$.
- e) $n_2 = 3.n_1$ e $v_{f2} = 4,5.v_{f1}$.

2. No processo de fresamento existem dois tipos básicos de operação: o fresamento concordante e o fresamento discordante. Considere as assertivas a seguir.

(I) No fresamento discordante, pelo fato de a fresa se opor ao movimento de avanço da peça, as forças de corte e potência de corte são mais intensas do que no fresamento concordante, daí;

(II) A fresa sofre um atrito mais intenso com a peça usinada e torna-se, portanto, mais susceptível ao desgaste e a possíveis quebras das arestas cortantes.

Com base nas assertivas (I) e (II), assinale a alternativa correta.

- a) As assertivas (I) e (II) estão corretas e a assertiva (II) complementa a primeira.
- b) A assertiva (I) é falsa, mas a assertiva (II) é verdadeira.
- c) A assertiva (I) é correta, mas a assertiva (II) é falsa.
- d) As assertivas (I) e (II) estão corretas, mas a assertiva (II) não complementa a primeira.
- e) As assertivas (I) e (II) são falsas, pois tratam, ambas, do movimento concordante.

3. Na operação de usinagem por fresamento, os parâmetros de corte que descrevem o movimento da ferramenta e/ou peça são: rotação [rpm], velocidade de corte [m/min] e velocidade de avanço [mm/min]. Há também as chamadas dimensões de corte, que incluem a _____ de corte, a _____ de trabalho, o _____ da ferramenta e o seu número de dentes além da taxa de _____ de material e o tempo de corte.

Qual das alternativas abaixo possui os termos (palavras) que completam corretamente o texto-base apresentado?

- a) velocidade – taxa – raio – deformação.
- b) profundidade – penetração – eixo – remoção.
- c) largura – largura – diâmetro – remoção.
- d) profundidade – penetração – diâmetro – remoção.
- e) largura – taxa – raio – deformação.

Seção 2.3

Furação, retificação, mandrilamento, roscamento e serramento

Diálogo aberto

Prezado aluno, nesta seção, trabalharemos os processos de fabricação (usinagem) que envolvem furação, retificação, mandrilamento, serramento e aplainamento. Na problematização desta seção, porém, ficaremos concentrados na operação de furação.

Furação é um dos processos mais comuns na usinagem, embora no nosso dia a dia fazemos uso dessa técnica para, por exemplo, furar uma parede a fim de pendurar um quadro ou um objeto qualquer.

Sendo assim, voltando à nossa problematização, ainda na empresa especializada em serviços de usinagem na qual você foi contratado como *trainee*, uma furadeira recondicionada foi adquirida e precisa ser testada antes de ser colocada em operação de usinagem rotineira. Para tanto, usando sua criatividade e curiosidade, você foi designado para realizar esse teste, realizando uma operação de usinagem – furação – em uma chapa de aço AISI 4140, utilizando uma broca de 12 mm, considerando uma rotação de 1200 rpm. Para tal, você deverá calcular (especificar) os seguintes parâmetros de usinagem:

a) Levando em conta os parâmetros fornecidos, qual seria a velocidade de corte?

b) Com base nos conhecimentos adquiridos por você, de quanto seria o avanço do eixo principal, sabendo que o avanço por rotação é de 0,2 mm/rotação?

c) Considerando que a profundidade do furo na chapa será de 40 mm, qual é o tempo de furação necessário para realizar esta operação?

Resuma seus resultados em um relatório para a gerência de usinagem. Além disso, qual tipo de broca você acha que seria a ideal para essa operação? Será necessário o uso de um alargador?

Note, caro aluno, que para solucionar o problema você deverá compreender toda a parte de conteúdo exposto nesta seção, pois esses

conteúdos o habilitarão a solucionar os itens do problema proposto.

É de extrema importância que você compreenda todo o processo desenvolvido para chegar à solução do problema proposto, pois trata-se de uma situação com a qual você poderá deparar-se em algum momento da sua vida profissional. Vamos aos estudos!

Não pode faltar

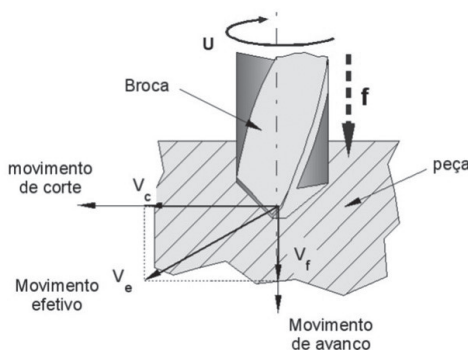
Caro aluno, estamos avançando no aprendizado em nossa disciplina e chegamos à terceira seção desta segunda unidade, na qual estudaremos alguns outros importantes processos de manufatura mecânica convencional, que são: furação, alargamento, retificação, mandrilamento, brunimento e serramento.

Furação: características gerais, ferramentas (brocas e alargadores) e máquina

Note que a operação de usinagem chamada de furação é um processo de fabricação mecânica que envolve a realização de um furo em uma peça fazendo uso de uma ferramenta chamada broca. A máquina-ferramenta utilizada para tal operação é a furadeira.

O movimento de corte realizado pela broca é rotativo (ou seja, a broca gira em torno do seu eixo) e observe que avança penetrando na peça removendo cavaco. A Figura 2.15 mostra como o processo de furação é realizado.

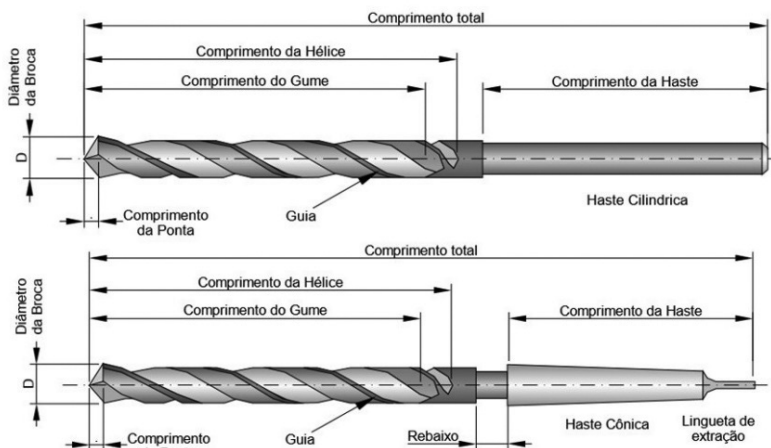
Figura 2.15 | Cinemática do processo de furação



Fonte: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

Existem diversos tipos de brocas, porém, a mais utilizada nos processos de furação é a broca helicoidal, que é a mais comercializada. Tenha em mente que este tipo de broca pode ser utilizado tanto para furos curtos como para furos profundos e, por ser uma ferramenta de geometria definida, é possível encontrar perfis diversificados para os mais variados tipos de furos. A Figura 2.16 ilustra uma broca helicoidal típica.

Figura 2.16 | Broca helicoidal típica com a denominação de suas partes principais



Fonte: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

As brocas são fixadas ao mandril, sendo que o aperto pode ser realizado manualmente ou por chave. As brocas de haste cilíndricas são fixadas por meio de mandris e tem um limite de diâmetro menor que o das brocas com haste cônica, que são fixadas em furos cônicos do próprio eixo ou, ainda, por meio de buchas de redução de furos cônicos. Em geral, as brocas de haste cilíndricas têm diâmetros de até $\frac{1}{2}$ ", enquanto as de haste cônica o diâmetro é maior que $\frac{1}{2}$ ".

A fixação da broca na furadeira é realizada no chamado cone morse, cujas dimensões são estabelecidas pela norma NBRISO5413 – Ferramentas para usinagem – Haste cone morse com arraste.

As furadeiras são máquinas-ferramentas de portes diversos. Vão desde as furadeiras manuais (as furadeiras comuns e as chamadas furadeiras de impacto) até as furadeiras mais robustas, que são as de bancada (manuais ou não) e as furadeiras de grande porte, que podem

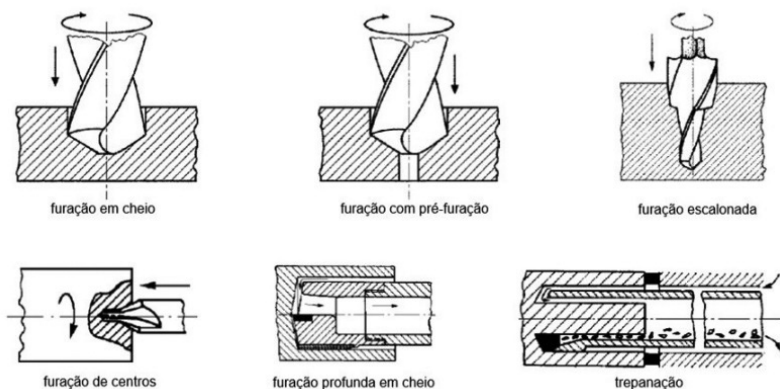
ser do tipo CNC. As furadeiras são predominantemente verticais, mas há alguns modelos horizontais. No torno, por exemplo, é possível fazer um furo em uma peça fixando a broca no porta-ferramenta.

Temos dois modelos de furadeiras muito comuns: as furadeiras de coluna e as furadeiras múltiplas. As furadeiras de coluna se caracterizam por apresentarem uma coluna de união entre a base e o cabeçote. Esse arranjo possibilita a furação de elementos com as formas mais diversificadas, singularmente e em série (CIMM, s/d). As furadeiras múltiplas, por sua vez, possuem diversos modelos construtivos, a saber: furadeiras de árvores múltiplas, furadeiras múltiplas de cabeçote único e furadeiras múltiplas de múltiplos cabeçotes.

Os parâmetros de corte na furação, a saber, velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f), tempo de usinagem (ou de corte) (t_c), força de corte (F_c) e potência de corte (P_c) são calculados de forma análoga ao torneamento e ao fresamento, pois tratam de processos de usinagem por movimento rotativo. Assim, na furação são válidas as expressões $v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$, $v_f = f \cdot n$, $t_c = \frac{l_f \times \pi \times d}{f \times v_c \times 1000}$ e $P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6.10^4}$, já vistas nas seções anteriores.

Com o uso de brocas adequadas é possível realizar uma grande variedade de tipos de furos, a Figura 2.17 nos mostra algumas dessas possibilidades:

Figura 2.17 | Broca helicoidal típica com a denominação de suas partes principais



Fonte: <<https://lcsimeif.files.wordpress.com/2013/01/apostila-senai-processos-mecc3a2nicos-de-usinagem.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

Ao realizar um furo em uma peça, nem sempre conseguimos obter a dimensão final exigida para o furo. Daí, surge a necessidade de se utilizar outra ferramenta, que é denominada de alargador. Como o próprio nome diz, a função principal do alargador é dar a dimensão final ao furo realizado pela broca, alargando o mesmo até a sua medida final.

O alargador permite obtermos um furo com excelente precisão geométrica e dimensional (são os alargadores de desbaste), além de contribuir para dar acabamento final à superfície do furo (alargadores de acabamento).

A exemplo das brocas, existem diversos tipos de alargadores (quanto ao formato geométrico). Porém, há dois tipos básicos: os alargadores de múltiplos gumes e os alargadores de gume único.



Pesquise mais

As brocas para usinagem apresentam uma série de características peculiares, seja de caráter geométrico, seja quanto ao material da mesma. Todas essas características (e outras) podem ser exploradas em catálogos de fabricantes que as apresentam com riqueza de detalhes. Vale a pena pesquisar sobre as brocas de usinagem no catálogo disponível em: <http://www.osg.com.br/v4/fotos/download/Cat_Brocas_Low2014.pdf>. Acesso em: 31 out. 2017.

Boa pesquisa e aumente seus conhecimentos!

Retificação: características gerais, ferramentas e máquinas

Em muitas situações os critérios de acabamento, dimensão e forma geométrica da peça são especificados de forma muito rigorosa. Para atender essas exigências, o processo de retificação se apresenta como ideal. A retificação é uma operação de usinagem realizada por uma máquina-ferramenta denominada de retificadora, cuja ferramenta de corte é o rebolo de retificação.

O rebolo nada mais é que uma ferramenta na forma de disco ou cilindro, constituída de material abrasivo, que opera de forma rotativa em torno de seu eixo.

O processo de retificação pode ser realizado em superfícies externas e internas de uma peça, dependendo do tipo de rebolo utilizado. Além

disso, a retificação pode ser do tipo cilíndrica, cônica, plana, entre outras menos comuns.

A retificação é muito empregada também para corrigir irregularidades observadas em processos de fabricação precedentes e, em geral, correções de caráter geométrico e de acabamento, variáveis essas estudadas em disciplinas de Metrologia e que podem ser posteriormente conferidas por instrumentos de metrologia industrial (paquímetro, rugosímetro, entre outros).

As retificadoras podem ser classificadas em três tipos clássicos: retificadora plana (tangencial e vertical), retificadora cilíndrica universal e retificadora *center less* (sem centros).

A Figura 2.18 mostra em (a) uma retificadora em operação e em (b) um exemplo de reboło (que é a ferramenta das retificadoras).

Figura 2.18 | Retificadora em operação (a); reboło (b)



(a)



(b)

Fonte: (a) <<http://diamaxdiamantes.com.br/images/produtos/1992006956342.jpg>>; (b) <[http://www.aguado.com.br/upimg/produtos/12/Rebolo_12\(48\).JPG](http://www.aguado.com.br/upimg/produtos/12/Rebolo_12(48).JPG)>. Acesso em: 31 out. 2017.

Em linhas gerais, o reboło é constituído de um material abrasivo que pode ser óxido de alumínio (que é o mais comum), óxido de alumínio branco, zircônio e óxido de alumínio, carbeto de silício e grãos abrasivos cerâmicos.

O índice de qualidade do desempenho de um reboło depende das condições específicas de uma dada aplicação, envolvendo variáveis tais como o tipo da máquina e a composição da peça-obra trabalhada.



Um motor de um automóvel tem uma vida útil longa. Porém, ao final dela é possível, em alguns casos, recuperá-lo. Conhecemos essa recuperação como sendo retificação de motor. Considerando que o cilindro do motor é a parte que sofre maior desgaste ao longo da vida dele, afinal, o motor é retificado ou suas partes são brunidas?

Mandrilamento e brunimento: características gerais, ferramentas e máquinas

O mandrilamento é uma operação de usinagem que visa obter superfícies de revolução com o uso de uma máquina-ferramenta chamada mandriladora e cuja ferramenta de corte é uma barra de mandrilar montada sobre um mandril, dotado de movimento de rotação, sendo que a peça é presa (fixada) na mesa da máquina. As ferramentas de mandrilar são selecionadas em função das dimensões (comprimento e diâmetro) e características das operações a serem realizadas. Elas têm pequenas dimensões porque, geralmente, trabalham no interior de furos previamente executados por brocas. São feitas de aço rápido ou carboneto metálico e montadas em uma barra de mandrilar.

As principais operações de mandrilamento são classificadas em: mandrilamento cilíndrico, mandrilamento radial e mandrilamento cônico.

O mandrilamento é uma forma de usinagem realizada em peças de grandes dimensões, que são mais difíceis de serem usinadas no torno ou na fresadora.

Como estamos falando de um processo de usinagem que utiliza ferramenta de material abrasivo, não podemos deixar de lembrar do brunimento, que é aplicado principalmente em furos visando corrigir problemas de diâmetro interno, de cilindridade e conicidade (correções geométricas), melhoria de acabamento superficial de furos, além de também corrigir o alinhamento de furos. Os principais elementos de um processo de brunimento são: a brunidora (que é a máquina-ferramenta), a ferramenta de brunir (brunidor ou mandril), réguas superabrasivas (diamantadas ou de cubic boron nitride (CBN) ou nitreto cúbico de boro) e óleo lubrificante.

As indústrias de autopeças utilizam muito o brunimento para operações de acabamento (ou de correção) em cilindros de motores, cilindros de freios, cilindros de embreagem, em comandos hidráulicos, entre outros, porém, o processo de brunimento, por ser mais preciso que a retificação, também é mais caro!



Assimile

Embora façam uso de ferramentas rotativas e abrasivas, a retificação e o brunimento são operações de usinagem distintas, que possuem características próprias. Além disso, o brunimento, como já foi ressaltado, é indicado para operações em que o controle dimensional é mais rígido (com menores tolerâncias), enquanto que a retificação se aplica em operações menos exigentes no quesito acabamento e dimensional.

Serramento e aplainamento: características gerais, ferramentas e máquinas

Segundo o portal da Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM) (s/d, s.p.), serramento pode ser assim definido:

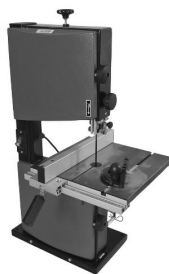
Operação que consiste em cortar, abrir fenda e iniciar ou abrir rasgos em um material, executada com serra ou serrote. A serra manual é uma ferramenta composta de um arco de aço carbono, onde deve ser montada uma lâmina de aço rápido ou aço carbono dentada. As lâminas das serras ainda devem possuir dentes travados alternadamente, cuja finalidade é facilitar o movimento da serra e reduzir seu atrito com a peça.



A operação de serramento pode ser manual ou mecanicamente realizada por máquina de serrar (serra elétrica ou mecânica).

A Figura 2.19 mostra uma serra manual típica: a serra a arco. O arco pode ser fixo ou ajustável.

Figura 2.19 | Serra manual (serra a arco) e serra de fita vertical



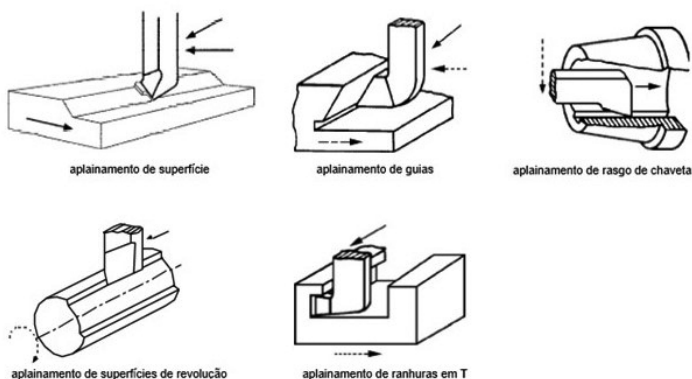
Fonte: <http://www.starrett.com.br/produtos/images_prod/thArco-de-Serra-Tubular-N-149---cabo-fechado_ImgProd348.jpg>; <http://www.estrela10.com.br/serra-fita-de-bancada-marcenaria-profissional-370w-220v-sfm-370-lynus-111146-p13178475?gclid=Cj0KCQiA3dTQBRDnARIsAGKSfIm945SRXp2kjudqFgsBveNdk0pbgX0L0JjeYyI0y2wvj6TomBTzY0aAvzKEALw_wcB>. Acesso em: 22 out. 2017.

Os dentes das serras podem variar na sua forma geométrica de tal forma que os dentes considerados “grossos” são indicados para serramento de metais maleáveis (moles), enquanto que os dentes de serra considerados “finos” são mais eficientes no serramento de metais duros.

As serras podem ser de fita (aquelas usadas em serra de arco) e podem ser na forma de disco (usadas em serras circulares). As serras de fita executam o corte tanto na forma alternada (vaivém) como na forma contínua, já as serras de disco têm corte contínuo, que é proporcionado pela sua rotação e avanço. Além disso, as serras de fita são as únicas que permitem seguir contornos e são compradas em rolos, pois não vêm prontas.

Outro processo de usinagem convencional muito utilizado é o aplainamento, que consiste em gerar superfícies planas, paralelas, perpendiculares e inclinadas, fazendo uso de uma máquina-ferramenta chamada plaina limadora, cuja ferramenta de corte caracteriza-se por ser do tipo monocortante e com deslocamento retilíneo alternado. O movimento para realização da usinagem por plaina limadora pode ser tanto da peça como da ferramenta, isto é, o movimento principal é aquele realizado pela ferramenta de aplainar e no movimento de avanço a peça que vai ser aplainada é movida contra a ferramenta. A Figura 2.20 mostra alguns tipos possíveis de aplainamento.

Figura 2.20 | Tipos de aplainamento



Fonte: <<https://lcsimei.files.wordpress.com/2013/01/apostila-senai-processos-mecc3a2nicos-de-usinagem.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

As plainas são de dois tipos: as limadoras (que já vimos) e as de mesa. Saiba que a de mesa realiza as mesmas operações que as plainas limadoras, no entanto, tem a vantagem de poder ser adaptada para usinagens de fresamento e retificação. Além disso, na plaina de mesa, é a peça que faz o movimento de vaivém.

Saiba também que a plaina limadora é uma máquina-ferramenta cuja ferramenta apresenta um movimento de corte linear periódico que chamamos de golpes por minuto (gpm). A máquina é regulada conforme o número de vezes o movimento de corte deve percorrer a peça por minuto, daí a nomenclatura de gpm. A expressão para cálculo de gpm é a seguinte:

$$n_g = \frac{1000.v_c}{2.C}, \text{ em que } n_g \text{ é o número de golpes por minuto [gpm],}$$

v_c é a velocidade de corte [m/min] e C é o percurso do movimento de corte [mm], tal que $C = (\text{comprimento da peça}) + (30 \text{ mm de folga})$.

Na usinagem de um rasgo de chaveira, por exemplo, pode se calcular o tempo de usinagem pela relação:

$$t_c = \frac{C.Np.Ns}{v_c}$$

Em que: t_c é o tempo de corte (usinagem) em [min]; $C = \frac{(L + 30)}{1000}$ em [m]; Np é o número de passes necessários para a usinagem do

rasgo; N_s é dado pela relação: $N_s = \frac{l+30}{f}$, em que: l é a largura do rasgo em [mm] e f é o avanço em [mm / golpe].



Exemplificando

Veja esse exemplo simples de aplainamento. Foi solicitado a você o cálculo do número de golpes por minuto em uma plaina limadora para usinar uma peça de 500 mm de comprimento, fazendo uso de uma velocidade de corte de 30 m/min.

Aplicando a relação para cálculo de [gpm], obtemos o seguinte resultado:

$$n_g = \frac{1000.v_c}{2.C} = \frac{1000.30}{2.(500+30)} = 28,3gpm$$

Logo, serão necessários 28 golpes por minuto no processo de aplainamento a ser realizado.

Sem medo de errar

Caro aluno, nesta seção, tratamos de uma série de processos de usinagem e, entre esses processos, estudamos a furação e as variáveis envolvidas nessa forma de usinagem.

Usando sua criatividade e curiosidade, você foi designado para testar uma furadeira reconcondicionada, com a qual você fará um furo em uma chapa de aço AISI 4140 utilizando uma broca de 12 mm a 1200 rpm. Os parâmetros de usinagem que você irá calcular são os seguintes: a) velocidade de corte; b) avanço do eixo principal, sabendo que o avanço por rotação é de 0,2 mm/rotação e; c) o tempo de furação para realizar um furo de 40 mm de profundidade. Vamos à solução do problema proposto!

Para calcular a velocidade de corte (v_c), a expressão consagrada é:

$$v_c = \frac{\pi.d.n}{1000} = \frac{\pi.12.1200}{1000} = 45,24 \text{ [m/min]}$$

O avanço pode ser assim calculado:

$$v_f = f.n = 0,2.1200 = 240 \text{ [mm/min]}$$

O tempo de furação, por sua vez, é obtido da seguinte expressão:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{f \cdot v_c \cdot 1000} = \frac{40 \cdot \pi \cdot 12}{0,245 \cdot 24 \cdot 1000} = 0,17 \text{ [min]} = 10 \text{ [seg]}$$

Veja, portanto, que se trata de uma operação de usinagem muito rápida (10 segundos apenas). Não foi considerado aqui o tempo de preparação da furadeira.

Observe que foi preciso que você fizesse uma análise dos procedimentos básicos relacionados aos principais processos convencionais de usinagem, sendo que, neste caso, foi a furação.

Usando sua curiosidade e criatividade, qual tipo de broca seria a ideal para esta operação? Você se deu conta de qual broca você usou? Você acha que será necessário o uso de um alargador?

É muito provável que você tenha usado uma broca helicoidal de aço rápido para fazer o furo na peça de aço AISI 4140, pois tais brocas são as mais indicadas para furar chapas metálicas.

O uso do alargador nesse caso pode ser dispensado, visto que o furo realizado foi apenas uma operação de teste da furadeira.

Lembre-se de que um relatório consubstanciado, com a apresentação dos resultados obtidos, deve ser entregue à sua gerência imediata.

Avançando na prática

Usinando um canal de chaveta com uma plaina limadora

Descrição da situação-problema

Nesse novo problema proposto, você deverá usinar um canal de chaveta utilizando uma plaina limadora. O canal de chaveta encontra-se em um furo com 100 mm de comprimento. As condições de corte estabelecem que você deverá utilizar uma velocidade de corte de 20 m/min. Para realizar esta operação você deverá calcular o número de golpes por minuto (gpm).

Finalmente, você estará incumbido também de calcular o tempo de corte para essa operação de usinagem. A chave terá 10 mm de largura ao longo dos 100 mm de comprimento do furo. Você utilizará um avanço (f) de 1 mm/golpe e deverá realizar três passos.

Resolução da situação-problema

Calculando o número de golpes por minuto (gpm):

$$n_g = \frac{1000.v_c}{2.C} = \frac{1000.20}{2.(100 + 30)} = 77 \text{ [gpm]}$$

Agora, será calculado o tempo de corte a partir da relação:

$$t_c = \frac{L.Np.Ns}{v_c}$$

em que: $L = (L + 30) / 1000$

Portanto:

$$L = (100 + 30) / 1000 = 0,13 \text{ [m]}$$

$$Ns = \frac{l + 30}{f} = \frac{10 + 30}{1} = 40 \text{ e } Np = 3$$

Logo:

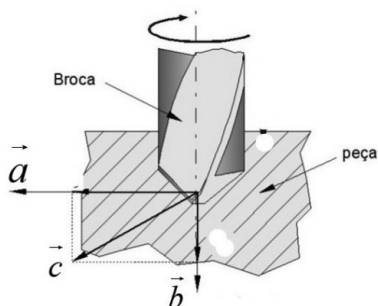
$$t_c = \frac{L.Np.Ns}{v_c} = \frac{0,13.3.40}{20} = 7,8 \text{ [min]}.$$

Assim, para usinar o rasgo de chave proposto, você deverá regular a plaina limadora para operar com 77 golpes por minuto (77 gpm) e gastará 7,8 minutos para concluir sua usinagem.

Faça valer a pena

1. A furação é um processo de usinagem que tem como ferramenta a broca que realiza o corte por meio de uma combinação de movimento de rotação e avanço. A Figura 2.21 mostra como ocorre esse processo.

Figura 2.21 | Furação com broca



Fonte: Stoeterau ([s. d.], p. 55).

Com base na figura apresentada no texto-base, os movimentos representados pelos vetores a , b e c correspondem, respectivamente, aos movimentos de:

- avanço – corte – efetivo.
- corte – avanço – tangencial.
- corte – avanço – efetivo.
- avanço – efetivo – corte.
- tangencial – corte – efetivo.

2. Retificação e brunimento são duas operações de usinagem que fazem uso de ferramentas compostas de _____. No entanto, pode-se dizer que o processo de _____ é uma operação de usinagem que proporciona um acabamento final melhor que o observado no processo de _____. Além disso, outra diferença entre retificação e brunimento consiste na velocidade de rotação, sendo que no brunimento ela já é bem _____.

Assinale a alternativa a seguir que completa de forma correta as lacunas do texto-base.

- material metálico – retificação – brunimento – menor.
- material abrasivo – retificação – brunimento – maior.
- material volátil – brunimento – retificação – maior.
- material abrasivo – brunimento – retificação – menor.
- material abrasivo – brunimento – retificação – maior.

3. Considere as seguintes assertivas:

I- A usinagem por abrasão é uma forma de usinagem convencional, dentre as quais podemos citar o brunimento e a retificação.

II- As serras circulares são semelhantes às fresas circulares de disco, pois possuem uma sucessão ordenada de dentes de corte.

III- Nas brocas helicoidais, durante o processo de furação, o cavaco é extraído por meio dos canais da ferramenta e apresentam-se na forma espiral.

IV- Os alargadores só são aplicados quando há furos vazados sem rebaxos (não escalonados).

Assinale qual das alternativas a seguir é a correta.

- a) Todas as assertivas são verdadeiras.
- b) Somente as assertivas I e III são verdadeiras.
- c) Somente as assertivas II e IV são verdadeiras.
- d) Somente as alternativas I, II e IV são verdadeiras.
- e) Somente as assertivas I, II e III são verdadeiras.

Referências

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986, p. 205-2015. v. II.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânico. Material didático. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/materia_didatico>. Acesso em: 31 out. 2017.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benicio de; OLIVEIRA, Marcelo Falcao de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

KIMINAMI, Cláudio Shyint et al. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2009.

_____. Teoria da usinagem dos materiais. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

SENAI-SP. **Usinagem – tecnologia de corte**. 1998. Disponível em: <<https://lcsime.files.wordpress.com/2013/01/apostila-senai-processos-mecc3a2nicos-de-usinagem.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

Starret Brasil. Disponível em: <http://www.starrett.com.br/produtos/images_prod/thArco-de-Serra-Tubular-N-149---cabo-fechado_ImgProd348.jpg>. Acesso em: 31 out. 2017.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Usinagem com ferramentas de geometria definida**. EP-USP. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

Processos não convencionais de usinagem

Convite ao estudo

Caríssimo aluno, chegamos à terceira unidade de ensino da disciplina Manufatura Mecânica: Usinagem, sendo que o tema desta unidade trata dos fundamentos dos processos não convencionais de usinagem. Esses processos são não convencionais porque, além de serem processos de usinagem diferenciados, são processos utilizados somente quando a usinagem tradicional não é possível de ser utilizada ou quando há critérios extremamente rigorosos em termos de geometria, dimensões, acabamento e tipo do material a ser usinado.

Veremos ao longo desta unidade as principais modalidades de usinagem não convencionais: características gerais e comparativo com os processos convencionais, suas vantagens e desvantagens.

Estudaremos para essas formas de fabricação as variáveis importantes e os parâmetros de usinagem envolvidos, suas máquinas e ferramentas e abordaremos quais parâmetros influenciam a escolha e o processo de usinagem não convencional em relação ao convencional, a fim de sermos capazes de selecionar os processos e de entender suas aplicações.

Daremos destaque aos processos eletroquímicos, por eletroerosão (por penetração e a fio), usinagem por feixe de elétrons e químico, usinagem por jato d'água, usinagem a laser e plasma, finalizando com os processos de ultrassom e abrasivos.

Nesta unidade, você, aluno, estará trabalhando em uma importante empresa metalúrgica multinacional que fabrica peças de precisão usadas em dispositivos mecânicos; no

caso, matrizes de estampagem. Embora tais matrizes possam ser manufaturadas em centros de usinagem CNC (comando numérico computadorizado), optou-se por fabricá-las pelo processo de eletroerosão, visando um melhor grau de acabamento superficial e dimensional. Nessa mesma empresa, você terá o desafio de trabalhar com cortes de perfis em chapas de aço inoxidável, tanto com corte por plasma como também com corte por jato d'água. Dessa maneira, como você é um profissional que vai atuar nesse setor da empresa, precisará ter bons conhecimentos dos processos não convencionais de usinagem, conhecer equipamentos e dispositivos inerentes a eles, variáveis de processos de usinagem, relação custo/benefício e noções de qualidade de acabamento superficial e dimensional.

Os conteúdos que trataremos nesta unidade de ensino abordarão, por exemplo, conceitos fundamentais dos processos não convencionais de usinagem; características gerais e um comparativo com os processos mais comuns; vantagens e desvantagens; variáveis importantes e parâmetros de usinagem; as máquinas e ferramentas; os parâmetros que influenciam a escolha do tipo de processo de usinagem não convencional e aplicações.

Respire fundo e vamos então aos nossos estudos!

Seção 3.1

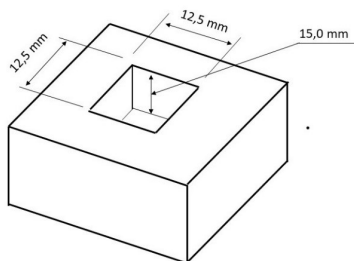
Processos não convencionais de usinagem: características gerais e aplicações

Diálogo aberto

Caro aluno, estamos dando início ao estudo de outras formas de fabricação que são muito utilizadas na indústria. Os conteúdos que aqui veremos irão capacitá-lo a solucionar o problema proposto nesta seção. Você já deve ter assistido a algum filme de ficção científica (Star Wars, por exemplo) ou mesmo um desenho animado (Os Incríveis, por exemplo), onde é comum uma cena de um laser provocar o maior estrago. Nos nossos estudos, que tratará de laser, entre outros, não haverá estragos, mas sim uma forma de energia que é usada para usinar materiais. Entraremos no mundo dos processos não convencionais de fabricação (ou usinagem)!

Nesta unidade, você, aluno, é o novo contratado do setor de processos de fabricação de uma metalúrgica que fabrica matrizes de estampagem. Foi decidido que as matrizes de estampagem passarão a ser fabricadas (usinadas) pelo processo de eletroerosão. A partir de um teste piloto, fazendo uso de sua criatividade e curiosidade, você foi designado a acompanhar a usinagem de uma matriz que possui uma cavidade central quadrada (de lado 12,5 mm como medida nominal) e uma profundidade de 15 mm, como mostrado na Figura 3.1. Para a usinagem do furo (cavidade central) quadrado (não vazado) no bloco prismático da matriz, o eletrodo pode ser de cobre eletrolítico, um material apropriado para a eletroerosão do aço.

Figura 3.1 | Esquema de cavidade usinada em bloco de matriz de estampagem



Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando as seguintes variáveis do processo especificadas a seguir, como você especificaria a dimensão final do eletrodo de desgaste? Dados: comprimento da centelha GAP = $25\mu\text{m}$; a rugosidade desejada $r = 15\ \mu\text{m}$; a tolerância dimensional = $0,1\ \text{mm}$ (lembrando que o coeficiente de segurança varia em torno de 10% da tolerância dimensional). Considere ainda que a máquina de eletroerosão apresenta uma capacidade de remoção de material de $450\text{mm}^3 / \text{h}$ operando a 500 A. Finalize seus cálculos determinando o tempo de usinagem t_u da cavidade. Concluída a solução do problema proposto, você deverá entregar, na forma de um relatório, os resultados obtidos ao seu superior no setor de processos de fabricação.

Observe, meu caro aluno, que para chegar à solução dessa problematização você deverá fazer uso dos conteúdos abordados nesta seção, e tenha em mente que o conhecimento desses procedimentos é importante para sua área de atuação em mecânica, pois são situações que estão sujeitas a serem resolvidas na rotina profissional. Vamos aos estudos!

Não pode faltar

Processos de usinagem não convencionais: características gerais e comparativo com os processos convencionais

Vantagens e desvantagens

Caro aluno, os processos de usinagem não convencionais recebem essa denominação porque, além de serem processos de usinagem diferenciados (ou seja, que fazem uso de maquinários bem distintos dos tradicionais e suas ferramentas de usinagem também se distinguem radicalmente dos tradicionais, usando fontes de energia térmica, elétrica, química ou uma combinação delas), são processos utilizados somente quando a usinagem convencional não é possível de ser utilizada ou quando há critérios extremamente rigorosos em termos de geometria, dimensões, de acabamento e tipo do material a ser usinado, sendo, portanto, muito difícil de obtê-los com a usinagem convencional.

Mesmo sendo um processo não convencional, esse modelo de usinagem também remove cavaco do material a fim de conferir formas e dimensões na peça final.

Em geral, as ferramentas utilizadas nos processos de usinagem

não convencional são do tipo de geometria não definida, ao contrário do que predomina nos processos convencionais, nos quais as ferramentas têm geometria definida.

Por se caracterizarem como processos diferenciados de manufatura mecânica, os processos de usinagem não convencionais são, geralmente, mais custosos que os processos convencionais.

A Tabela 3.1 a seguir mostra um mapa completo, que realiza a comparação entre os processos de usinagem convencionais e os vários processos de usinagem não convencionais.

Tabela 3.1 | Comparativo entre os processos de usinagem convencionais com os processos de usinagem não convencionais

Quadro comparativo dos métodos de usinagem (tradicionais e avançados)										
Processos Variáveis	Processos convencionais de usinagem	Processos avançados de usinagem								
	fornecimento, fresamento, retificação, apilamento etc.	Jato d'água	Laser	Oxícorte	Arco plasma	Eletroerosão	Química	Eletroquímica	Ultra-som	Feixe de elétrons
natureza energética	mecânica	mecânica	eletrotérmica	térmica	eletrotérmica	eletrotérmica	química	eletroquímica	mecânica	eletro-mecânica
agente de corte	cunha de corte	água sob pressão	radiação luminosa	alta temperatura	gases e alta temperatura	descarga elétrica	agente corrosivo	eletrolito	mantimento	elétrons
remoção do material	cisalhamento	erosão	fusão e vaporização	fusão	fusão e vaporização	fusão e vaporização	corrosão química	deslocamento de íons	erosão	fusão e vaporização
alterações na estrutura cristalina	não ocorre	não ocorre	localizada	não ocorre	não ocorre	não ocorre	não ocorre	não ocorre	não ocorre	localizada
velocidade de usinagem	variável, dependendo do processo	alta	alta	média	alta	baixa	baixa	baixa	baixa	alta
custo inicial de instalação	variável, de acordo com a precisão e o porte da máquina	alto	alto	baixo	médio	médio	baixo	médio	alto	alto
grau de acabamento	variável, de acordo com o processo	bom	bom	regular	médio	bom	bom	bom	bom	médio
materiais metálicos não ferrosos	aplicável	aplicável	aplicação limitada	não indicado	aplicável	aplicável	aplicável	aplicável	aplicável	aplicável
materiais mau condutores e não metálicos	aplicável	aplicável	aplicável	não indicado	não indicado	não aplicável	não indicado	não aplicável	aplicável	não indicado
formas complexas	apresentam muitas limitações	aplicável	recomendado	não indicado	aplicável	recomendado	recomendado	recomendado	aplicável	aplicável
peças delicadas	dependendo do processo, apresentam muitas limitações	aplicável	aplicável	não aplicável	aplicável	recomendado	recomendado	recomendado	aplicável	aplicável
microusinagem	não indicado	indicado	indicado	não aplicável	não recomendado	aplicável	indicado	indicado	indicado	indicado
materiais duros e frágeis	em materiais muito duros, é possível somente por abrasão	indicado	indicado, com restrições	não indicado	aplicável	recomendado	aplicável	aplicável	indicado	aplicável

Fonte: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/79proc.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

Segundo Chiaverini (1986, p. 228), os processos de usinagem não convencionais podem ser classificados de acordo com o tipo fundamental de energia empregada na usinagem:

- Processos baseados em energia mecânica: jato abrasivo, jato d'água e ultrassônico.
- Processos baseados em energia eletroquímica: processos eletroquímicos.
- Processos baseados em energia química: processos químicos.

iv. Processos baseados em energia termoelétrica: descarga elétrica, laser e arco-plasma.

Uma outra diferença observável entre os processos convencionais e os não convencionais de usinagem é que, nos primeiros, a forma de remoção de cavaco se dá predominantemente por cisalhamento, enquanto que nos processos não convencionais a remoção de cavaco ocorre por erosão, por reações químicas ou eletrolíticas e por fusão e/ou vaporização.

Há de se observar também que os processos que envolvem energia mecânica e termoelétrica têm sua aplicação focada em usinar materiais condutores, os processos que envolvem energia eletroquímica e química são indicados para a usinagem de materiais mau condutores, os processos de energia química podem ser usados nas usinagens de peças delicadas e, finalmente, os processos termoelétricos são recomendados a microusinagem (que engloba a micro e a nanomanufatura).

Variáveis importantes e parâmetros de usinagem para os processos não convencionais de usinagem

Os processos de usinagem não convencionais são diversos e, portanto, vários são os parâmetros de usinagem característicos de cada processo. Logo, caro aluno, abordaremos alguns desses parâmetros de usinagem nos processos que aqui selecionaremos.

Nos processos de eletroerosão, por exemplo, a taxa de remoção de material da peça (Q_{RM}) pode ser obtida a partir da relação:

$$Q_{RM} = \frac{664 \cdot i}{T_f^{1,23}}$$

Em que i é a corrente de descarga em Ampère e T_f é a temperatura de fusão em $^{\circ}C$.

De forma prática, é possível calcular a taxa de remoção de material a partir da relação:

$$(taxa_remoção_material) = \frac{volume}{tempo}$$

Em que a taxa de remoção de material é dada em mm^3 / min , o volume é dado em mm^3 e o tempo é dado em min.

Destaca-se que os dois principais parâmetros de usinagem na eletroerosão estão relacionados à corrente de descarga e à frequência de ocorrências dessas descargas.

O perfil do eletrodo tem como característica o fato de ter o mesmo formato do detalhe a ser obtido na peça usinada. No entanto, como não é possível ter a mesma dimensão da cavidade a ser desbastada, pois as dimensões finais da área usinada seriam maiores que as especificadas, é necessário haver uma dimensão para o eletrodo, tal que:

$$m_e = m_n - (2.GAP + 2.r + c_s)$$

Na qual m_e é a medida final do eletrodo [mm]; m_n é a medida nominal do eletrodo [mm]; GAP é o comprimento de centelha [μm]; r é a rugosidade [μm] e c_s é o coeficiente de segurança.

Outro parâmetro importante a se considerar é o grau de acabamento superficial da peça usinada. Esse acabamento tem que obedecer a um rigor, tal que o eletrodo de acabamento deve ter a seguinte dimensão:

$$m_e = m_n - (2.GAP + 2.r)$$

Em que os parâmetros dessa equação são os mesmos da equação anterior.



Assimile

É importante que você tenha em mente que, na usinagem por eletroerosão, a ferramenta é o eletrodo, que sempre deverá ter uma geometria de contorno similar à cavidade a ser erodida (usinada) e cuja dimensão possa ser tal que não conflite com as dimensões finais da cavidade usinada. Lembre-se também de que, por ser um processo elétrico de usinagem, o eletrodo na maioria das aplicações faz o papel de polo negativo e a peça, de polo positivo. Porém, dependendo do material do eletrodo e das peculiaridades da peça a ser usinada, poderá haver a necessidade de inversão de polaridade; ainda, no caso de não ser possível fixar a peça à mesa, ela é fixada no porta-eletrodo.

A Tabela 3.2 a seguir mostra como selecionar o eletrodo em função do material a ser usinado e do coeficiente para cálculo da amperagem em um processo de eletroerosão.

Tabela 3.2 | Eletrodo em função do material a ser usinado e o coeficiente para cálculo da amperagem em processo de eletroerosão

Eletrodo	Material a ser usinado	Coeficiente para Amperagem [A/mm^2]
Cobre eletrolítico	Aço	0,07
Grafite	Aço	0,01
Cobre e tungstênio	Aço	0,14
Cobre	Cobre	0,07
Cobre e tungstênio	Pastilha de metal duro	0,05

Fonte: adaptada de <<https://pt.scribd.com/document/16192394/Processo-Fabric-69proc>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

A amperagem (corrente – I) pode ser calculada pela expressão:

$$I = (\text{área a ser erodida}) \times (\text{coeficiente de amperagem})$$

Máquinas e ferramentas de processos não convencionais de usinagem

Começando pelo processo de eletroerosão (em inglês EDM – *Electrical Discharge Machining*), temos que o equipamento para a realização desse tipo de usinagem é a máquina de eletroerosão, cuja ferramenta utilizada é o eletrodo confeccionado em material condutor, como cobre ou grafite (vide Tabela 3.2).

Nos processos de usinagem por feixes de elétrons, temos um método no qual um feixe de elétrons concentrado gera calor, com o intuito de fundir o material usinado na zona de incidência. Exige-se a existência de vácuo, a fim de proteger o metal da atmosfera exterior para evitar sua oxidação. Porém, o principal motivo da utilização do vácuo é viabilizar o processo para que os elétrons não colidam com outras moléculas. É um processo indicado para o corte de diversos tipos de metais e suas ligas.

Embora possa haver similaridade, a usinagem química e a eletroquímica são processos muito diferentes. Na usinagem química, certas partes da peça metálica são submetidas à ação de soluções ácidas ou básicas fortes (agressivas), fazendo com que as partes não atingidas pela solução sejam protegidas, colocando-se o que se chama de “máscara”, que é composta de material insensível

à ação corrosiva da solução química. Tal “máscara” tem dimensões e formas específicas para cada tipo de peça a ser usinada.

Nos processos eletroquímicos a solução eletrolítica não tem o potencial de dissolver o material tal como ocorre na usinagem química, e a energia necessária para realizar a usinagem vem de uma fonte externa, sendo, portanto, de natureza elétrica. Em termos de tempo de usinagem, a usinagem química é mais lenta, quando comparada com a usinagem eletroquímica.

No processo de usinagem por jato d’água, podemos ter um jato de água puro ou um jato de água abrasivo, ou seja, com partículas abrasivas. No segundo caso, são as partículas abrasivas que realizam o corte do material, enquanto que, no primeiro (água pura), um jato supersônico corta o material. Vale destacar que o processo de jato abrasivo é muito mais potente que o processo de jato d’água pura.

Você sabia que o laser, que se refere a um tipo de luz e ao nome de um processo de usinagem não convencional, é uma sigla? Sim, LASER vem do inglês “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, que significa “amplificação de luz por emissão estimulada de radiação”. Na usinagem a laser, o material é atingido por um feixe de laser de alta intensidade que faz com que ocorra fusão e evaporação do material usinado. Isto se deve à elevada temperatura gerada na superfície ou em regiões da peça.

A técnica de uso de laser aplica-se a processos de soldagem, tratamento térmico e de microusinagem (corte a laser). No corte a laser, o processo é realizado de tal forma que se diz que é “assistido por oxigênio” (gás de assistência), sendo que esse gás protege a área de corte, removendo óxidos e material fundido.

Na usinagem a laser com assistência por oxigênio, uma característica é que a máquina deve operar em uma potência de cerca de $1,55.10^6 W / mm^2$ na operação de corte a $4,6.10^7 W / mm^2$ na operação de furação.

A usinagem por plasma (ou corte por plasma) utiliza um arco elétrico concentrado que funde o material por meio de um feixe de plasma de alta temperatura – lembrando que plasma pode ser considerado o quarto estado da matéria (além do sólido, líquido e gasoso).

A usinagem por ultrassom, também conhecida por usinagem ultrassônica, é um processo não convencional de usinagem que

faz uso de líquido abrasivo ou uma pasta que preenche a peça a ser usinada, sendo que a ferramenta vibra contra os abrasivos. Portanto, não há contato entre a ferramenta e a peça usinada, o abrasivo do líquido é o responsável pela remoção de material durante o processo. O líquido abrasivo – também conhecido como “lama química” – é fundamental para o sucesso do processo de usinagem ultrassônica.

Segundo o Portal Metálica ([s.d., s.p.]):



A usinagem abrasiva é um processo que envolve a utilização de produtos abrasivos na raspagem da superfície de objetos e peças metálicas mais endurecidos. Alguns produtos abrasivos contêm grânulos, ou pequenos grãos, e servem para a remoção de materiais que formam camadas sobrepostas às superfícies metálicas. Esses produtos abrasivos também são aproveitados para cortar materiais duros ou polir o aço, por exemplo, entre outras funções.



Pesquise mais

Dada a diversidade de processos de usinagem não convencionais, você pode saber um pouco mais sobre eles assistindo ao vídeo a seguir:

Usinagem não convencional. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Hh9b9pJoORI>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Pode ver ainda a apresentação da professora Anna Carla, da UFRJ:

Usinagem I: parte I – aula 6: processos não convencionais e microusinagem. Disponível em: <<http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/utl/b2evolution/media/blogs/annacarla/UsinagemI/Aula6-ProcessosNaoconvencionais.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Parâmetros que influenciam a escolha do processo de usinagem não convencional, seleção de processos e aplicações

Os processos de usinagem, sejam os convencionais ou os não convencionais, são geralmente flexíveis no sentido de estarem aptos a fornecer peças dos mais variados formatos geométricos, dimensionais e de acabamento. Mas quais fatores principais

podemos elencar para que a escolha recaia sobre um processo de usinagem não convencional?

Em primeiro lugar, devemos saber o que queremos usar. Seguem alguns questionamentos iniciais: (i) qual é o material da peça a ser usinada? (ii) qual é a ferramenta necessária para usar a peça? (iii) qual é a geometria e as dimensões da peça a ser usinada? (iv) qual é o acabamento desejado? (v) qual é a disponibilidade de equipamento para a usinagem? (vi) qual é a quantidade de peças a ser usinada? (vii) quais são os insumos econômicos? (mão de obra, tempo de usinagem, energia, etc.) (viii) quais são os limites dos processos de usinagem convencional para a fabricação da peça? (ix) quais são as condições de segurança do operador? e (x) há questões ambientais a serem levadas em conta no processo?

Veja, caro aluno, que para escolhermos um processo de usinagem não convencional de maneira assertiva as questões acima devem ser respondidas.

Segundo Chiaverini (1986, p. 227), *“a necessidade de usar-se metais e ligas com resistências e durezas cada vez mais elevadas, aliada à conveniência de redução de custos de produção, levou ao desenvolvimento de novos métodos de usinagem”*.

Souza (2016, p. 4) estabelece os seguintes fatores predominantes na escolha de um processo de fabricação:

- “forma e dimensão da peça;
- material a ser empregado e suas propriedades;
- quantidade de peças a serem produzidas;
- tolerâncias e acabamento superficial requeridos;
- custo total do processamento”.



Refleta

Quando falamos de usinagem, seja convencional ou não, estamos tratando, predominantemente, de usinagem de peças metálicas. Sendo assim, seriam os processos de usinagem não convencionais aqueles unicamente indicados para manufaturar peças de outros materiais: polímeros, cerâmicos e materiais avançados?

Vejamos agora uma situação prática de cálculo de parâmetros de usinagem em um processo não convencional.



Exemplificando

Tem-se que uma certa liga, que passou a ser usada por uma empresa que trabalha com usinagem por eletroerosão (EDM), funde por volta de **1200 °C**. Considerando que a corrente (amperagem) indicada para operação é de 30 A, você deve calcular qual é a taxa de remoção de material esperada durante a usinagem de uma peça dessa liga. Com base nessa taxa de remoção, ao usinar uma região com diâmetro de 20 mm e 50 mm de profundidade, qual será o tempo de usinagem estimado?

Resolução:

O cálculo dessa taxa de remoção fica fácil de ser realizado pela

aplicação da expressão $Q_{RM} = \frac{664.i}{T_f^{1,23}}$, ou seja:

$$Q_{RM} = \frac{664.i}{T_f^{1,23}} = \frac{664.30}{1200^{1,23}} = 3,35 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

No caso da usinagem de uma região com 20 mm de diâmetro e 50 mm de profundidade, o volume de material a ser removido é V, tal que:

$$V = \frac{\pi.d^2}{4}.h = \frac{\pi.20^2}{4}.50 = 15708 \text{ mm}^3$$

Logo, a estimativa de tempo de usinagem (t_u) será:

$$t_u = \frac{V}{Q_{RM}} = \frac{15708}{3,35} = 4689 \text{ s} = 78,15 \text{ min}$$

Concluindo, você calculou que, para o material que funde a **1200 °C**, a taxa de remoção de material por eletroerosão está estimada em **3,35 mm³ / s** e, no caso da usinagem de uma região de 20 mm de diâmetro com 50 mm de profundidade, o tempo estimado de usinagem ultrapassa uma hora, devendo ser de cerca de 78,15 minutos.

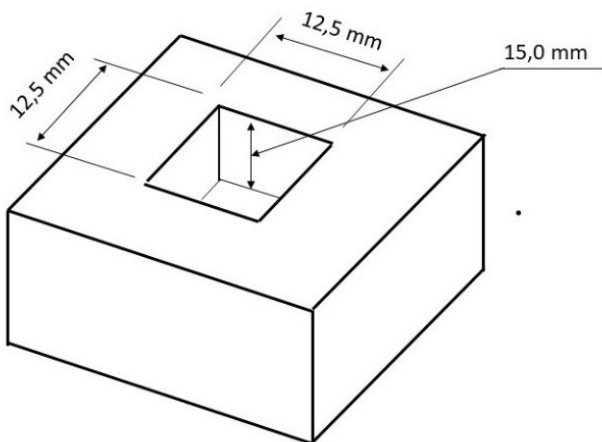
Sem medo de errar

Caro aluno, vamos à solução do nosso problema, que trata de processo não convencional de usinagem e, neste caso em particular, de uma usinagem por eletroerosão.

Lembre-se de que você é o novo contratado do setor de processos de fabricação de uma metalúrgica que fabrica matrizes de estampagem que passarão a ser fabricadas por eletroerosão. Mas, antes disso, você fará o teste piloto.

Alguns dados são importantes relembrar, a saber: a matriz possui uma cavidade central quadrada (de lado 12,5 mm como medida nominal) e uma profundidade de 15 mm, como mostra a Figura 3.1. O eletrodo será de cobre eletrolítico. Mas cabe a você, desenvolvendo sua criatividade e curiosidade, especificar a dimensão final do eletrodo de desbaste para um o comprimento da centelha $GAP = 25\mu\text{m}$; sendo que a rugosidade desejada $r = 15\mu\text{m}$; a tolerância dimensional = 0,1 mm (lembrando que o coeficiente de segurança varia em torno de 10% da tolerância dimensional).

Figura 3.1 | Esquema de cavidade usinada em bloco de matriz de estampagem



Fonte: elaborada pelo autor.

Calculando inicialmente o eletrodo de desbaste, teremos:

$$m_e = m_n - (2.GAP + 2.r + c_s) =$$

$$12,5 - (2.25.10^{-6} + 2.15.10^{-6} + 0,1) = 12,399 \text{ mm}$$

Na sequência, calculamos o eletrodo de acabamento pela relação: $m_e = m_n - (2.GAP + 2.r)$. Portanto:

$$m_e = m_n - (2.GAP + 2.r) =$$

$$12,5 - (2.25.10^{-6} + 2.15.10^{-6}) = 12,499 \text{ mm}$$

Assim, o eletrodo de desbaste deverá ser de cobre eletrolítico, de seção transversal quadrada, com lados iguais a 12,399 mm. O eletrodo de acabamento também será de cobre eletrolítico, de seção transversal quadrada com lados iguais a 12,499 mm (praticamente a dimensão nominal do eletrodo, que é de 12,500 mm).

Finalizando, calculamos o tempo de usinagem dispendido nessa operação, lembrando que a taxa de remoção de material é de $450 \text{ mm}^3 / \text{h}$ operando a 500 A. Assim, a taxa volumétrica será:

$$(taxa_volumétrica) = \frac{450}{60} = 7,50 \text{ mm}^3 / \text{min}$$

O volume da cavidade a ser erodida é de:

$$Vol_{cav} = 12,5.12,5.15 = 2343,75 \text{ mm}^3$$

O que nos leva a um tempo de usinagem (t_u) de:

$$t_u = \frac{2343,75}{7,50} = 312,5 \text{ min}$$

Note, caro aluno, que o tempo de usinagem por eletroerosão é um tempo elevado (mais de 5 horas), embora a cavidade usinada seja pequena, conforme podemos ver no esquema da Figura 3.1. Com os resultados em mãos, você deve elaborar um relatório a ser entregue ao seu superior no setor de processos de fabricação.

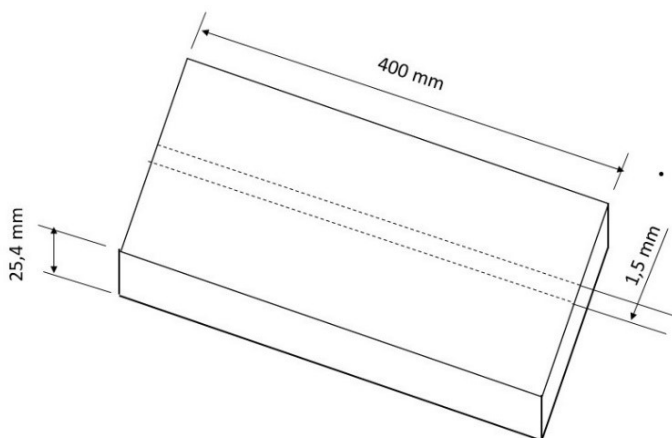
Veja quanto você pode aplicar seus conhecimentos adquiridos para realizar a análise dos procedimentos básicos relacionados aos principais processos não convencionais de usinagem para esta problematização, que tratou da eletroerosão.

Corte de chapa a laser

Descrição da situação-problema

Caro aluno, você foi incumbido de realizar uma operação de corte em chapa de aço SAE 1020, utilizando uma máquina de usinagem a laser assistido por oxigênio. A peça de aço 1020 tem espessura de 1,0" e comprimento de 400 mm e é cortada ao longo dessa dimensão. Se a largura do corte é de 1,5 mm, você deverá estimar o tempo necessário para essa operação. São dados ainda que a potência específica é de $1,55 \cdot 10^6 \text{ W/mm}^2$ (cortar) e a taxa de remoção assistida por oxigênio, de aço SAE 1020, é de $1000 \text{ mm}^3/\text{min}$. A Figura 3.2, a seguir, ilustra como será a peça a ser cortada.

Figura 3.2 | Zona de corte a laser na chapa SAE 1020



Fonte: elaborada pelo autor.

Resolução da situação-problema

O volume de material (cavaco) a ser removido da chapa pode ser assim calculado:

$$Vol = 400 \cdot 1,5 \cdot 25,4 = 15240 \text{ mm}^3$$

Considerando que a taxa de remoção assistida por oxigênio, de um aço SAE 1020, é de $1000 \text{ mm}^3/\text{min}$, temos que:

$$t_u = \frac{Vol}{taxa_remoção} = \frac{15240}{1000} = 15,24 \text{ min}$$

Observe que o tempo de corte é bastante elevado (15,24 min). Portanto, caberia neste caso comparar se o processo de corte a laser é mais vantajoso que outro processo.

Faça valer a pena

1. Os processos de usinagem não convencionais utilizam fontes energéticas diferentes que são características de cada processo. Por exemplo, os processos químicos fazem uso de energia _____, os processos de jato abrasivo usam energia _____, os processos a laser fazem uso de energia _____ e os processos eletroquímicos usam energia _____.

Assinale a alternativa que contém as palavras que completam de forma correta os tipos de energia utilizados nos processos não convencionais de usinagem, segundo o texto-base.

- a) Química – mecânica – eletroquímica – termoelétrica.
- b) Química – termoelétrica – química – eletroquímica.
- c) Química – mecânica – termoelétrica – eletroquímica.
- d) Eletroquímica – mecânica – eletroquímica – química.
- e) Química – termoelétrica – eletroquímica – mecânica.

2. Os processos de usinagem não convencionais apresentam-se atualmente como processos imprescindíveis para a usinagem de materiais especiais e de alta tecnologia. Dada essa importância da manufatura mecânica por métodos não convencionais, considere as seguintes assertivas:

- I. O grau de acabamento dimensional e superficial (rugosidade) alcançado pelos métodos de usinagem não convencionais quase sempre supera os resultados obtidos pelos processos convencionais.
- II. Um dos problemas dos processos de usinagem é, em muitos casos, a formação de rebarbas que precisam ser eliminadas por processos subsequentes. Porém, nos processos de usinagem por eletroerosão, não se observa a ocorrência de rebarbas.
- III. Uma das vantagens dos processos eletroquímicos é que não há desgaste da ferramenta (cátodo).

IV. O corte por jato d'água abrasivo é menos eficiente que o corte por jato d'água pura, pois as partículas abrasivas podem prejudicar a superfície de corte.

Assinale a alternativa correta a respeito da veracidade das assertivas apresentadas no texto-base.

- a) Todas as assertivas do texto-base são verdadeiras.
- b) Nenhuma das assertivas do texto-base é verdadeira.
- c) Somente as assertivas (I) e (III) são verdadeiras.
- d) Somente as assertivas (II) e (IV) são verdadeiras.
- e) Somente a assertiva (IV) não é verdadeira.

3. Comparando os parâmetros de usinagem dos processos convencionais e dos processos não convencionais de usinagem, podemos dizer que:

I. Nos processos convencionais de usinagem um parâmetro muito útil é a velocidade de corte [$m / \min$] e nos processos de usinagem não convencionais não se usa o parâmetro de velocidade de corte, mas sim a taxa de material removido [$mm^3 / \min$].

II. Isto acontece porque nos processos convencionais de usinagem trabalhamos com ferramentas de corte com geometria definida e nos processos não convencionais não existe ferramenta de corte.

De acordo com o texto-base, assinale a alternativa correta.

- a) As duas afirmativas (I) e (II) são verdadeiras, e a (II) justifica a primeira (I).
- b) As duas afirmativas (I) e (II) são verdadeiras, mas a (II) não justifica a primeira (I).
- c) A afirmativa (I) é verdadeira, mas a afirmativa (II) é falsa.
- d) As duas afirmativas (I) e (II) são falsas.
- e) A afirmativa (I) é falsa, mas a afirmativa (II) é verdadeira.

Seção 3.2

Processos químicos e eletroquímicos: eletroerosão, feixe de elétrons e químicos

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção falaremos sobre os seguintes processos de usinagem não convencional e suas aplicações: eletroquímico, eletroerosão, feixe de elétrons e químico. Destes, no problema que será proposto, você terá como missão trabalhar com a usinagem eletroquímica.

Vamos fazer uma analogia entre os processos puramente elétricos com os puramente químicos, a fim de verificar as similaridades que há ou não entre eles? Poderíamos pensar no sistema eletroquímico como uma forma de obter uma peça a partir da sua matriz (negativa da peça), sendo a peça, o cátodo, e a matriz, o ânodo, que se aproximam (sem se tocar, separadas pelo eletrólito) reproduzindo-se a peça na usinagem por meio da corrente elétrica.

Na empresa pela qual você foi contratado, uma peça a ser usinada por processo eletroquímico tem um furo com as seguintes dimensões: diâmetro 25 mm e profundidade 100 mm. Sendo assim, fazendo uso da sua curiosidade e criatividade, foi solicitado que você estimasse a máxima corrente e o tempo de execução dessa operação. Como não foi especificado o material da peça, foi-lhe informado que o equipamento trabalha com uma voltagem entre 5 e 30 V, densidade de corrente de 1,0 a 8,0 μm , permitindo um avanço de até 10 mm/min, e com uma amperagem variando desde 5 até 50.000 A. Você poderia questionar: por que não foi informado qual será o material a ser furado? E se os parâmetros de usinagem fossem alterados, o que poderia acontecer? Esse furo poderia ser realizado por outros processos vistos nesta seção?

Ao final dos seus cálculos, compare os resultados com os de um processo realizado por eletroerosão, conhecendo os seguintes parâmetros: frequência das descargas – 50 Hz a 500 kHz; voltagem – 25 a 280 V; corrente – 0,5 a 300 A; quantidade removida por descarga – $450\text{mm}^3/h$ a t_u ; e o coeficiente de amperagem – Q_{RM} (Tabela 3.2 para eletrodo de cobre eletrolítico). Material

usinado: liga metálica (temperatura de fusão = 1200 °C). Além disso, ao finalizar seus cálculos (estimativas), você deverá elaborar um relatório com todos os dados e resultados e apresentá-los ao seu superior na empresa.

Veja, caro aluno, que para chegar à solução da problematização proposta você deve fazer uso dos conhecimentos adquiridos nesta seção, que envolvem os parâmetros que regem a usinagem eletrolítica. Tenha em mente que, no mundo profissional, esses conhecimentos são necessários para um bom desempenho e podem fazer a diferença em um processo seletivo de emprego. Bons estudos!

Não pode faltar

Caríssimo aluno, estamos avançando no aprendizado em nossa disciplina e chegamos à segunda seção desta terceira unidade, na qual abordaremos os processos não convencionais de usinagem focados em processos elétricos, químicos e na combinação destes. Bons estudos e avante!

Processos eletroquímicos: características gerais, parâmetros importantes, vantagens e desvantagens

Os processos eletroquímicos de usinagem, como o próprio nome diz, combinam a ação de parâmetros elétricos com parâmetros químicos na operação de usinagem. O nome usinagem eletroquímica advém do inglês “ECM – Eletrochemical Machining”.

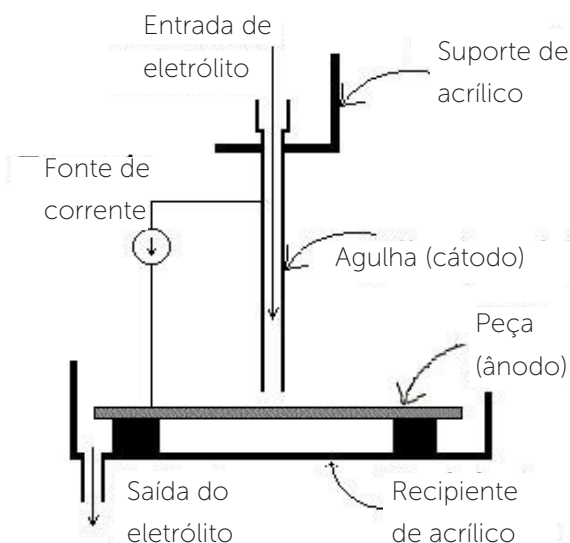
Na usinagem por processos eletroquímicos, a remoção de material ocorre por reações eletrolíticas, e a natureza energética do processo é eletroquímica. Assim, o eletrólito é o agente de corte nesse processo de usinagem, e a remoção de material ocorre por deslocamento de íons. O processo de usinagem é realizado a partir da dissolução anódica da peça a ser usinada.

Dada a natureza do processo, não se observam alterações na estrutura cristalina do material da peça usinada. Como a velocidade de usinagem se caracteriza por ser baixa, não se trata de um processo recomendado para produção elevada de lotes de peças. Trata-se de um processo recomendável para peças de formas geométricas complexas e delicadas.

Os principais tipos de materiais usinados eletroliticamente são aqueles que se caracterizam como condutores elétricos. Materiais isolantes elétricos não são recomendados para serem usinados por processo eletroquímico.

A peça a ser usinada comporta-se como ânodo, e a ferramenta comporta-se como cátodo da célula eletrolítica, proporcionando um excelente acabamento das superfícies usinadas. A Figura 3.3 mostra um esquema geral do processo de usinagem eletroquímica. Vale dizer que, como exemplo, pode-se usar uma solução aquosa de cloreto de sódio como eletrólito.

Figura 3.3 | Desenho esquemático do processo de usinagem eletroquímica



Fonte: Pedroso & Souza ([s.d., s.p.]).

A respeito desse esquema geral do processo de usinagem eletroquímica, Pedroso e Souza ([s.d., s.p.]) dizem que:



Características tais como velocidades de dissolução metálica da ordem de 10 mm/min, densidades de corrente de 100–300 $A.cm^{-2}$, vazões de eletrólito entre 5-50 m/s e espaçamento intereletródico entre 0,1 e 1 mm são marcas registradas do processo de usinagem eletroquímica. A alta vazão do eletrólito é fundamental para o processo

porque ele deve remover os produtos da reação do espaço intereletródico e dissipar o calor gerado na superfície usinada.



Para determinarmos o valor da máxima amperagem ($I_{\max}$) a ser aplicada no processo, usamos a expressão:

$$I_{\max} = A_u \cdot D_{Ci}$$

Onde A_u é a área superficial usinada [mm^2] e D_{Ci} é a densidade de corrente máxima [A / mm^2].

Por sua vez, o tempo de usinagem (t_u) em minutos pode ser obtido pela relação:

$$t_u = \frac{h}{v_a}$$

Onde h é a profundidade da usinagem [mm] e v_a é a velocidade de avanço em [mm/min].

Dentre os processos de usinagem não convencional que estamos estudando e dos quais vimos algumas características gerais na primeira seção desta unidade, temos que a eletroerosão pode ser classificada em duas modalidades: a eletroerosão por penetração e a eletroerosão a fio (que veremos a seguir com maiores detalhes).



Refleta

Sabendo que a usinagem química e a usinagem eletroquímica baseiam-se em princípios diferentes e mobilizam diferentes formas de energia, reflita sobre o seguinte:

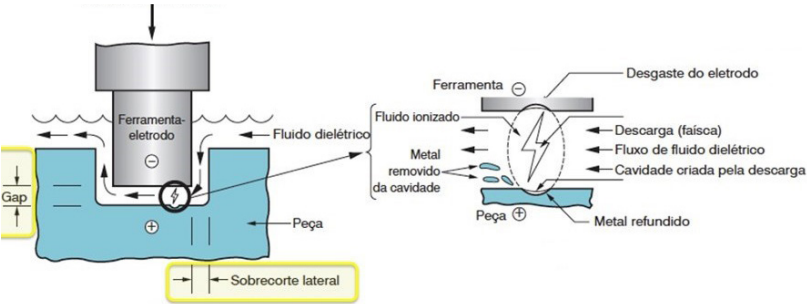
Como funcionam os processos de remoção de material (ou de geração de cavaco) nesses dois processos, visto que em ambos é utilizada uma solução química para remoção de material?

A eletroerosão é um processo de usinagem não convencional que se baseia na ocorrência de descargas elétricas, sendo muito utilizada para manufaturar orifícios, ranhuras e outras cavidades (CHIAVERINI, 1986, p. 228).

Eletroerosão por penetração

Com base na Figura 3.4 vemos como funciona o processo de eletroerosão por penetração. Normalmente usa-se salmoura (solução de NaCl) como eletrólito, que tem a função de permitir a passagem de corrente elétrica, tornando possível a dissolução anódica durante a usinagem. Durante passagem da corrente elétrica pelo eletrólito, ocorre também uma transferência de massa.

Figura 3.4 | Desenho esquemático do processo de eletroerosão por penetração



Fonte:<<http://www.mecanica-ufrrj.educacao.ws/utl/b2evolution/media/blogs/annacarla/Usinageml/Aula6-ProcessosNaoconvencionais.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Vamos ver agora, alguns parâmetros importantes da eletroerosão, apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 | Principais parâmetros de operação da eletroerosão

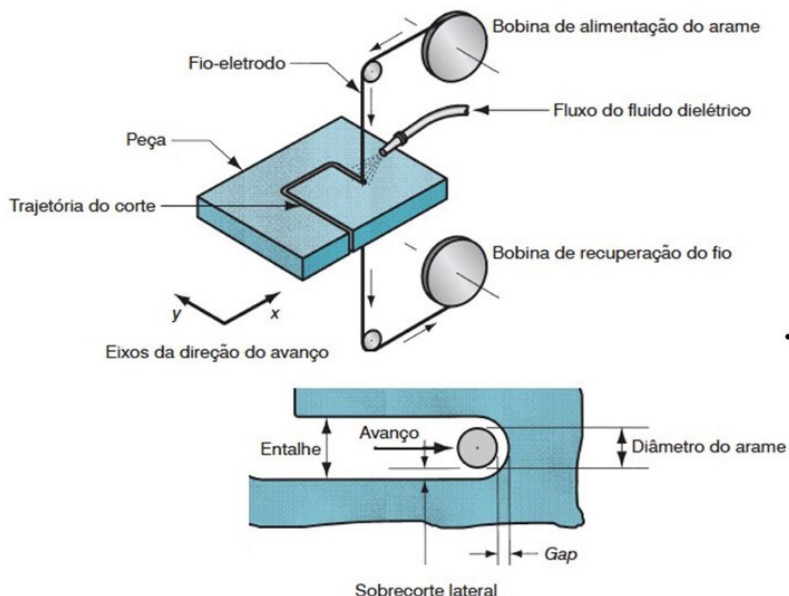
PARÂMETRO	INTENSIDADE
Corrente elétrica	0,5 a 400 A
Tensão	40 a 400 V
Frequência	180 a 260000 ciclos/s
Pressão de bombeamento do fluido	3,5 Kgf / cm²
Material da ferramenta (eletrodo)	Grafite, cobre, latão, aço, alumínio, liga Zn-Sn, etc.
Perfil da ferramenta	Idêntico ao perfil do corte na peça

Fonte: adaptada de Chiaverini (1986, p. 230).

Eletroerosão a fio

A segunda modalidade de eletroerosão é aquela que utiliza como eletrodo um fio metálico enrolado em uma bobina, conforme podemos observar no esquema da Figura 3.5 a seguir.

Figura 3.5 | Desenho esquemático do processo de eletroerosão a fio



Fonte: <<http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/utl/b2evolution/media/blogs/annacarla/Usinageml/Aula6-ProcessosNaoconvencionais.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Observe que em ambos os processos de eletroerosão (a fio e por penetração) há uma folga entre a ferramenta (que é o eletrodo) e a peça usinada. Essa folga é chamada de folga de faísca (GAP), que pode variar desde 0,0127 mm até 0,508 mm (CHIAVERINI, 1986). Nessa folga, preenchida por um fluido dielétrico, o fluido é parcialmente ionizado, e a descarga da faísca passa entre a peça e a ferramenta (ou eletrodo).

A remoção do material ocorre por fusão ou vaporização, resultando em uma minúscula cratera na sua superfície.

Na usinagem por eletroerosão há de se ajustar o valor da intensidade da corrente elétrica (I) em Ampère, segundo a relação:

$$I = A_e.C_A$$

Onde I é a amperagem calculada em [A], A_e é a área a ser erodida (usinada) em [mm^2] e C_A é o coeficiente de amperagem, conforme Tabela 3.2 em [A/mm^2]. Veja que esta é uma expressão similar à expressão utilizada no processo eletroquímico, pois o coeficiente de amperagem C_A é similar à densidade de corrente D_{Ci} .

Na primeira seção desta unidade, vimos algumas expressões aplicadas à eletroerosão. Uma delas trata do cálculo da taxa de remoção de material e é importante ter em mente que, como é um processo que não utiliza energia mecânica, propriedades tais como dureza, resistência e tenacidade não influenciam no parâmetro de remoção de material.

A velocidade com que o material é extraído e a qualidade do acabamento superficial (rugosidade) da peça usinada elevam-se na mesma proporção em que se eleva a densidade de corrente e diminui-se a frequência.

Na eletroerosão, outros dois fatores importantes são: o ponto de fusão e o calor latente de fusão do material da peça a ser erodida. Esses fatores são importantes para determinar a quantidade de material removido por descarga, que em geral situa-se no intervalo de 10^{-6} a 10^{-4}mm^3 .



Assimile

Caro aluno, embora estejamos tratando de processos de usinagem não convencionais, baseados em energia elétrica e química, tenha em mente que os três processos até agora discutidos (eletroquímico, químico e eletroerosão) são processos distintos, aplicáveis a situações distintas e de parâmetros de operação distintos. Portanto, fique atento e não os confunda!

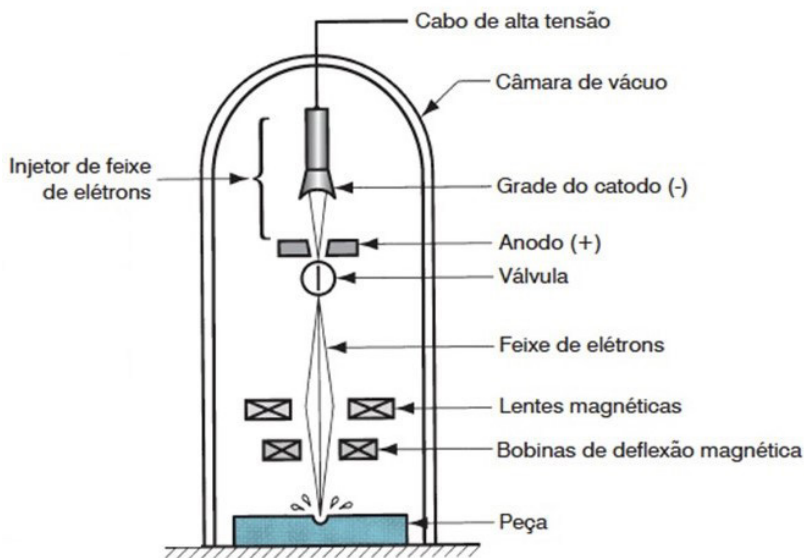
Para concluirmos esta seção, vamos tratar agora de dois importantes processos de usinagem não convencional: a usinagem por feixes de elétrons e a usinagem química.

Usinagem por feixes de elétrons

A usinagem por feixes de elétrons utiliza energia térmica, aplicada a partir da concentração de temperaturas elevadas em regiões específicas da peça, de tal forma que promova a remoção de material

por fusão localizada (ou até por vaporização), que provoca alterações metalúrgicas na superfície da peça usinada. A Figura 3.6 mostra as instalações de um sistema de usinagem por feixe de elétrons.

Figura 3.6 | Desenho esquemático do processo de eletroerosão a fio



Fonte: <<http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/utl/b2evolution/media/blogs/annacarla/Usinagem/Aula6-ProcessosNaoconvencionais.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Neste processo, a energia cinética dos elétrons é convertida em energia térmica de elevada densidade, incidindo sobre a superfície usinada de forma concentrada e com elevadíssima velocidade, removendo material da superfície.

Considerando que este processo chega a provocar alterações na estrutura metalúrgica do material da peça usinada, pode-se prever a realização de um tratamento térmico posterior à aplicação desse processo de usinagem, fato que contribui para um maior custo de produção.

O feixe de elétrons apresenta uma convergência que é ajustada por lentes magnéticas, e é justamente o ajuste dessas lentes que determina se a usinagem será para corte de material ou para outras finalidades, tais como soldagem ou microusinagem, além de tratamentos térmicos superficiais.

A emissão de elétrons é realizada por um canhão emissor que opera,

em situação ideal, em alto vácuo, mas há situações em que as empresas trabalham com baixo vácuo e até mesmo com pressão ambiente. Na sua construção, o cátodo é o responsável pela emissão de elétrons e o ânodo pela aceleração destes elétrons. O cátodo opera em uma câmara chamada Wehnelt e, quando aquecido, atinge temperaturas da ordem de **3000 °C**, proporcionando a liberação de elétrons.

Outra característica do sistema de usinagem por feixe de elétrons é que a diferença de potencial (ddp) entre o cátodo e o ânodo é de cerca de 150 kV.

Usinagem química

No processo de usinagem por meios químicos (usinagem química), o processo decorre de uma reação química entre a solução química e o material da peça usinada. Por ser tratar de um processo muito agressivo, alguns cuidados fundamentais são necessários e indispensáveis para a obtenção de um bom resultado, dentre os quais destacam-se: limpeza do material a ser usinado (livre de qualquer sujeira ou resíduo); uso de máscara de revestimento para proteger áreas da peça contra as reações químicas; ataque químico junto à peça a ser usinada a fim de remover material da região não protegida pela máscara; e retirada da peça e da máscara.

A usinagem química é muito aplicada na manufatura de placas de circuitos impressos e chips de microprocessadores.

A usinagem química teve um impulso significativo a partir de seu emprego pela indústria aeronáutica que, além de produzir peças com rigor no aspecto geométrico e de acabamento superficial e dimensional, fez uso desse método para eliminar quimicamente resíduos indesejados em suas peças, melhorando assim a relação resistência/peso, tão importante nas aplicações da indústria de aviões.

Com o sucesso na utilização da usinagem química na indústria aeronáutica, ampliaram-se os tipos de materiais possíveis de serem manufaturados por essa técnica, tais como ferro, aço de vários tipos (inoxidáveis em particular), ligas de titânio e de alumínio, sendo que com alguns materiais usa-se ácido e com outros, bases.

Uma vantagem competitiva fundamental da usinagem química é que esse processo não exige investimento elevado em ferramental, quando comparado com outros processos, o que permite operar com diversos tipos de materiais, como já vimos, mesmo em escala

de produção pequena. Porém, a maior desvantagem da usinagem química é o fato de não se aplicar para peças espessas. Outro ponto negativo é o “arredondamento” de cantos.



Pesquise mais

Aprenda um pouco mais sobre usinagem química no vídeo referenciado a seguir. Trata-se de uma teleaula com cerca de 15 minutos, mas que esclarece bem a aplicação de usinagem química e eletroquímica na prática.

Processos de fabricação. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=H0sS7oTdUhM>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Finalizamos esta seção com um exemplo, a seguir.



Exemplificando

Uma peça será usinada pelo processo eletroquímico, cujos parâmetros de operação estabelecidos são os seguintes: velocidade de avanço (ou de dissolução) = 10 mm/min; corrente ajustada para 100 A. Tem-se que a superfície usinada é circular de diâmetro 10 cm.

Com os dados fornecidos você deverá determinar qual é a densidade de corrente a ser aplicada e o tempo que será gasto nessa usinagem, sabendo também que a profundidade usinada será de 50 mm.

Solução:

A área usinada é a área da seção circular de diâmetro 10 cm, ou seja, 100 mm. Assim,

$$A_u = \frac{\pi \cdot (100)^2}{4} = 7854 \text{ mm}^2.$$

A densidade de corrente será:

$$I = A_u \cdot D_{Ci} \Rightarrow D_{Ci} = \frac{I}{A_u} = \frac{100}{7854} = 0,0127 \text{ A / mm}^2$$

O tempo de usinagem (t_u) será:

$$t_u = \frac{h}{v_a} = \frac{50}{10} = 5,0 \text{ min}$$

Portanto, a partir dos parâmetros de cálculo solicitados, obteve-se que

a densidade de corrente deve ser de $0,0127 \text{ A/mm}^2$ e o tempo gasto na usinagem será de 5,0 minutos.

Vale destacar aqui duas importantes observações sobre os dados utilizados na resolução da nossa usinagem eletroquímica proposta neste exemplo:

i. A velocidade de remoção do ânodo (peça usinada) ocorre, aproximadamente, na proporção inversa da distância (GAP) entre os eletrodos. Assim, para a velocidade de dissolução (ou de avanço) de **10 mm/min** aqui utilizada, significa que a distância entre os eletrodos é de aproximadamente $\frac{1}{10} \text{ mm} = 0,1 \text{ mm} = 100 \text{ }\mu\text{m} = \text{GAP}$.

Dessa forma, a velocidade de **10 mm/min** é compatível com aquelas utilizadas nesse processo de usinagem.

ii. O valor da corrente (A) nas máquinas de usinagem eletroquímica varia em um amplo intervalo de valores: vão desde valores de 50 A (máquinas de pequeno porte) até 40.000 A (máquinas para usinagens pesadas).

Sem medo de errar

Vamos à solução do nosso problema desta seção. Lembre-se de que, com sua criatividade e curiosidade, você deverá usar uma peça por processo eletroquímico que tem um furo de diâmetro 25 mm e profundidade 100 mm. Você deverá estimar a máxima corrente e o tempo de execução desta operação. Outros dados importantes: o equipamento trabalha com uma voltagem entre 5 e 30 V, densidade de corrente de 1,0 a $8,0 \text{ A/mm}^2$, permitindo um avanço de até **10 mm/min** e com uma amperagem variando desde 5 até 50.000 A. O material a ser usinado é uma liga metálica (temperatura de fusão 1200°C) e o coeficiente de amperagem é de $C_A = 0,07 \text{ A/mm}^2$ (Tabela 3.2 para eletrodo de cobre eletrolítico).

A área a ser usinada é a área da seção transversal do furo de 25 mm de diâmetro, ou seja:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (25)^2}{4} = 490,9 \text{ mm}^2$$

A intensidade máxima de corrente é dada por $I = A_e.C_A$, assim:

$$I = A_e.C_A = 490,9.8 = 3927,4$$

O tempo de usinagem (t_u) é dado pela relação:

$$t_u = \frac{\text{profundidade}}{\text{avanço}} = \frac{100}{10} = 10 \text{ min}$$

Comparando esse resultado do processo eletroquímico com o da eletroerosão, vamos aos cálculos:

Na eletroerosão:

$$I = Ae.C_A = (490,9).(0,07) = 34,4 \text{ A}$$

Obtendo agora a taxa de remoção de material (QRM):

$$Q_{RM} = \frac{664.i}{T_f^{1,23}} = \frac{664.34,4}{1200^{1,23}} = 3,72 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

E o tempo de usinagem (t_u) é calculado por:

$$t_u = \frac{\text{volume}}{Q_{RM}} = \frac{\text{área}.\text{profundidade}}{\text{taxa_volm}} = \frac{(490,9).100}{3,72} = 13196 \text{ s} = 220 \text{ min} = 3,66 \text{ h}$$

Nota-se portanto que, comparando os tempos de usinagem do processo eletroquímico com o do processo por eletroerosão, temos que no segundo processo o tempo é muito mais longo. Porém, note que a amperagem utilizada no processo eletroquímico chegou a 3920 A, enquanto que na eletroerosão a amperagem foi de 34,4 A, daí o tempo significativamente maior.

Portanto, para fins de realização do furo em questão, o processo por usinagem eletroquímica é mais indicado, por ser mais rápido. É claro que outros parâmetros – como custo, por exemplo – devem ser levados em consideração antes de se tomar qualquer tipo de decisão por um processo ou outro.

Note que, ao resolver este problema, você pode fazer uma análise dos procedimentos básicos relacionados aos principais processos não convencionais de usinagem, quando comparou o tempo de usinagem dos dois processos possíveis.

Avançando na prática

Usinando um rasgo em uma chapa de aço por eletroerosão por penetração

Descrição da situação-problema

A fim de usinar em uma peça de aço (considere a temperatura de fusão igual a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) uma ranhura de comprimento 500 mm, 20 mm de largura e 20 mm de profundidade, você deverá usar a eletroerosão por penetração. Você tem disponível um eletrodo de grafite e deverá calcular/determinar: (a) o coeficiente de amperagem indicado; (b) o volume de cavaco a ser removido; (c) a amperagem indicada para esta operação; (d) o tempo gasto na remoção de cavaco, sabendo que a taxa de remoção de material da peça é de $3000\text{ mm}^3 / \text{min}$.

Resolução da situação-problema

Vamos iniciar a resolução deste problema consultando a Tabela 3.2 da Seção 3.1, segundo a qual, para um eletrodo de grafite, a fim de usinar uma peça de aço, o coeficiente de amperagem deverá ser de $0,01\text{ A} / \text{mm}^2$.

Para calcular o volume de cavaco a ser removido dessa ranhura, basta fazer a multiplicação da área a ser erodida pela sua profundidade, ou seja,

$$V_e = 500.20.20 = 2.10^5\text{ mm}^3$$

A amperagem pode ser calculada pela relação:

$$Q_{RM} = 3000\text{ mm}^3 / \text{min} = 50\text{ mm}^3 / \text{s}$$

$$Q_{RM} = \frac{664 \cdot i}{T_f^{1,23}} \Rightarrow i = \frac{Q_{RM} \cdot T_f^{1,23}}{664} = \frac{50.1200^{1,23}}{664} = 461,5\text{ A}$$

Finalmente, temos o seguinte tempo gasto na remoção de cavaco:

$$t_u = \frac{(\text{volume} - \text{cavaco})}{Q_{RM}} = \frac{2.10^5}{50} = 4000\text{ s} = 66,66\text{ min}$$

Observe, caro aluno, que o tempo de usinagem é muito elevado (mais de uma hora).

Faça valer a pena

1. Uma importante entidade esportiva vai distribuir diversas medalhas em alto relevo, em uma competição por ela patrocinada. A medalha tem o perfil de uma personalidade esportiva e será fabricada em aço inoxidável. A fabricação será feita pelo processo de estampagem, e as peças deverão ter uma elevada qualidade de acabamento superficial, sendo assim a comissão organizadora optou por um processo de produção não convencional para as matrizes dessa medalha, pensando na qualidade do acabamento superficial do produto pós-estampagem.

Assinale qual das alternativas a seguir melhor se aplica ao processo de fabricação da matriz indicado para a comissão organizadora.

- a) Molde obtido por feixe de elétrons.
- b) Molde obtido por processo químico.
- c) Molde obtido por processo eletroquímico.
- d) Molde obtido por eletroerosão.
- e) Molde obtido por plasma.

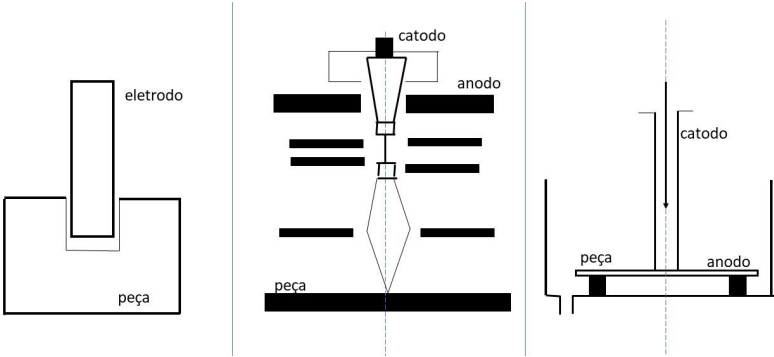
2. Na usinagem por _____, quando o feixe concentrado atinge a superfície a ser trabalhada, o impacto faz com que a energia _____ transforme-se em energia _____, a tal temperatura que pode fundir quase todos os tipos de materiais.

Assinale qual das alternativas a seguir possui as palavras que completam corretamente a frase apresentada no texto-base.

- a) Eletroerosão – cinética – térmica.
- b) Feixe de elétrons – cinética – térmica.
- c) Feixe de elétrons – térmica – cinética.
- d) Laser – potencial – térmica.
- e) Processo eletroquímico – elétrica – química.

3. Os processos de usinagem não convencional que utilizam a eletricidade e a química como fonte de energia apresentam estruturas construtivas, conforme mostra a figura a seguir. Considere ainda que no primeiro processo existe o dielétrico, no segundo processo existe o vácuo e no

Figura 3.7 | Desenhos esquemáticos dos processos não convencionais de usinagem com fonte elétrica e química de energia



Fonte: elaborada pelo autor.

terceiro processo, um eletrólito. Analisando as figuras apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta dos processos da esquerda para a direita:

- a) Eletroerosão – feixe de elétrons – eletroquímico.
- b) Eletroquímico – laser – eletroerosão.
- c) Eletroquímico – eletroerosão – feixe de elétrons.
- d) Eletroerosão – laser – eletroquímico.
- e) Químico – feixe de elétrons – eletroerosão.

Seção 3.3

Processos não convencionais de usinagem diversos: jato d'água, laser, abrasivo, plasma e ultrassom

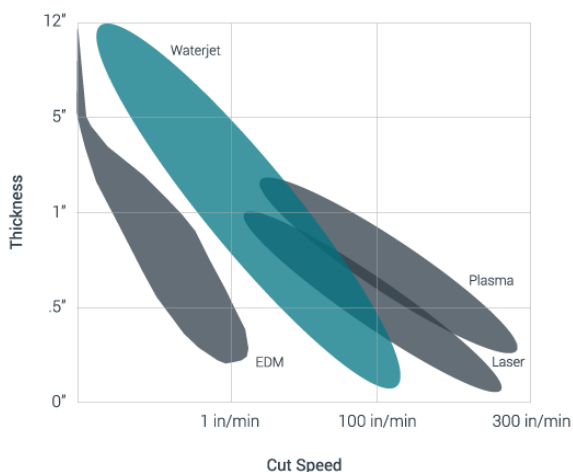
Diálogo aberto

Prezado aluno, esta seção apresenta os processos de corte por jato d'água, laser, plasma, usinagem por ultrassom e materiais abrasivos. Estamos diante de uma nova problematização a ser resolvida, que irá trabalhar com corte por plasma e corte por jato d'água. Você já imaginou que é possível realizar cortes em materiais metálicos usando jato d'água ou plasma, por exemplo?

Suponha que, na empresa em que você trabalha, você foi designado a especificar qual processo seria o mais recomendado entre "corte por plasma" e "corte por jato d'água", a fim de traçar um perfil em U em uma chapa de aço inoxidável, cuja espessura é de 1", com elevadíssimo grau de acabamento superficial (sem rebarbas) e menor custo de produção, levando-se em consideração o insumo de calor, uso de gás ou água, agente poluidor e índice de remoção do material. Com base no diagrama apresentado na Figura 3.7, a seguir, você terá que recomendar um dos processos (plasma ou jato de água), ou outro indicado no diagrama, caso julgue mais conveniente. Use sua curiosidade e criatividade para tal e elabore um relatório comparando os dois processos e, no final, justifique sua escolha (recomendação), pois tal relatório deverá ser entregue ao seu superior na empresa. Considere uma velocidade de corte de 50 mm/min.

Esse corte poderia ser realizado por um processo de corte convencional, obtendo-se a mesma qualidade? Você acha que os demais processos indicados na Figura 3.8 também poderiam ser utilizados nessa operação de corte?

Figura 3.8 | Relação entre processo de fabricação, espessura de usinagem e velocidade de corte



Fonte: <<http://www.flowwaterjet.com.br/Aprender/Corte-Comparativo.aspx#waterjet>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Para solucionar a problematização proposta, o conteúdo que será abordado nesta seção é de fundamental importância. É importante ressaltar que os assuntos tratados nas seções anteriores também subsidiarão na resolução do problema, que tem um diferencial relevante que é o de trabalhar soluções a partir de gráficos e dados conceituais, a fim de emitir um parecer técnico com base nesses conhecimentos. Tal habilidade é indispensável para qualquer profissional da área de usinagem. Bons estudos!

Não pode faltar

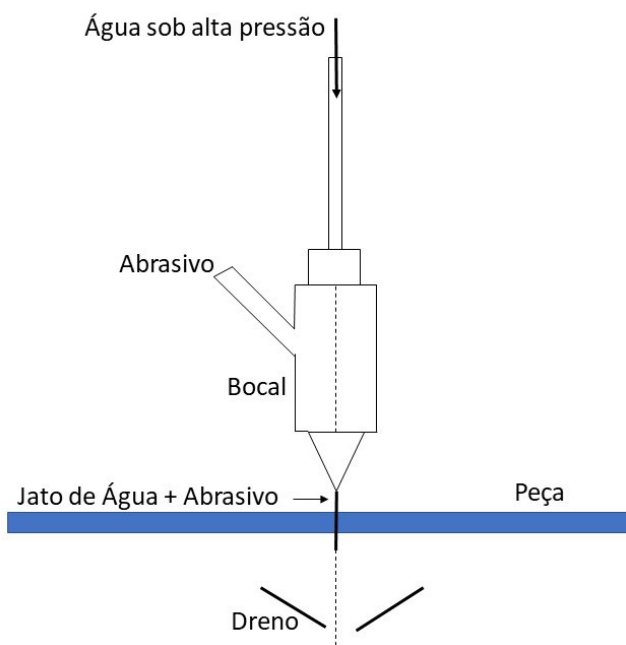
Processos não convencionais de usinagem: jato d'água

Como você deve saber, há um ditado famoso que diz: "água mole em pedra dura, tanto bate até que fura". Apesar de esse ditado nos remeter a um processo de erosão e desgaste, temos que a água, quando pressurizada de forma adequada, pode realizar coisas incríveis. Uma delas é cortar o aço! Isso mesmo, caro aluno, existe um processo de corte de chapas, o jato de água, que, dada a intensidade da pressão que incide sobre a superfície da peça, consegue-se cortá-la.

Segundo Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p.126), o corte é realizado por um jato muito fino (diâmetro de 0,25 a 0,63 mm)

e com alta pressão (400 MPa), e a alta velocidade desse jato de água atinge mais de 900 m/s. Quando o jato d'água é composto de abrasivos, costuma-se utilizar uma taxa de adição de abrasivo de 0,23 kg/min ao jato de água (e o abrasivo pode ser de Al_2O_3). A Figura 3.9 a seguir mostra o esquema representativo do processo de jato d'água com abrasivo.

Figura 3.9 | Desenho esquemático do processo de jato d'água com abrasivo



Fonte: adaptado de Kiminami; Castro; Oliveira (2013, p.127).

O abrasivo adicionado à água faz com que o jato de água possa cortar materiais metálicos (aço, por exemplo) e até vidro e materiais cerâmicos (embora em menor escala). Vale ressaltar que o jato de água sem abrasivo é indicado para corte de materiais não metálicos.

Os parâmetros de corte ajustáveis no processo de usinagem por jato d'água são os seguintes: velocidade de avanço, diâmetro do bocal, distância do bocal à peça e pressão da bomba.

A velocidade de avanço permite controlar o tempo de usinagem (muito importante em termos econômicos); o diâmetro do bocal permite controlar o diâmetro do jato; a distância do bocal à peça gera

um controle da qualidade do corte; e a pressão da bomba permite ajustar a distribuição de potência e a velocidade do jato d'água.

Entre as vantagens do processo por jato d'água em relação aos métodos convencionais de usinagem (corte) temos: possibilidade de variação da direção do jato de corte, mediante a inclinação da tubeira (que denomina o tubo por onde passa a água com alta pressão); o processo exerce pequena carga mecânica sobre a peça usinada; não há influência de parâmetros de temperatura no processo; o desgaste da ferramenta ocorre, segundo Mahesh ([s.d.]), em torno de 40 horas de uso e não há a ocorrência de pós ou gases. Porém uma das poucas desvantagens seria o fato de ser um processo de corte um tanto quanto lento comparado aos demais aqui estudados.

Processos não convencionais de usinagem: laser e plasma

Embora o laser habite nosso imaginário de diversas formas, em parte alimentado por imagens ou lembranças de ficção científica, trata-se de uma ferramenta aplicada, atualmente, nas mais diversas áreas (ótica, eletrônica, médica, estética, entre outras) e que não poderia deixar de estar presente na área de fabricação industrial. O laser, na indústria metalmecânica, tem ampla aplicação em processos de soldagem, tratamento térmico e corte (corte a laser em metais como o aço, alumínio e suas ligas, e até em materiais não metálicos, tem sido usado de forma mais ampla pela indústria).

Temos que o laser nada mais é que um feixe de luz altamente concentrado, que produz uma intensa energia na forma de calor. Podemos fazer uma analogia ao concentrar a luz do sol em um ponto usando uma lupa (lente de aumento), sendo que o feixe incidente vai aquecer a superfície de incidência, elevando sua temperatura.

A potência do feixe de laser é de tal magnitude que chega a fundir e vaporizar o material ao redor desse ponto de incidência, o que permite a operação de corte do material, independentemente do seu grau de resistência mecânica. A título de informação, o dispositivo de corte a laser chega a produzir $3000 \text{ W} / \text{cm}^2$ de potência, vaporizando a maioria dos materiais.

Pelo fato de o laser afetar termicamente a região de incidência, o material usinado (cortado) pode sofrer alterações metalúrgicas significativas, que alteram a estrutura do material.

Uma vez que o equipamento de corte a laser não pode ser operado manualmente, é comum os equipamentos serem controlados por sistemas computadorizados do tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado).

Na operação de corte de chapas, o material é apoiado em uma espécie de “mesa de pregos” que permite distribuir os pontos de apoio. O oxigênio atua como gás de assistência, pois, além de remover o material fundido, libera calor em favor de uma maior velocidade de corte. Temos que os gases de assistência são usados em processos a laser para melhorar a produtividade e a qualidade, além de ajudar a prolongar a vida útil do laser por atuarem como protetores no processo de corte. Porém, em aços inoxidáveis, opta-se pelo gás nitrogênio, que permite obter superfícies livres de qualquer tipo de óxido.



Refleta

As máquinas de corte a laser podem cortar chapas de aço-carbono de até 20 mm de espessura, porém, no caso de chapas de alumínio, o limite de espessura restringe-se a apenas 6 mm. Porque será?

Os cortes a laser são afetados por quatro variáveis principais: (i) a potência do feixe; (ii) a velocidade de corte; (iii) a vazão do gás de assistência; e (iv) o ponto focal de incidência do feixe.

Uma das vantagens do corte a laser é o fato de proporcionar cortes retos, pequena largura de corte, zona mínima afetada pelo calor, mínima distorção e arestas de excelente qualidade.

Entre as desvantagens, destacam-se o alto custo inicial do sistema e a pequena variedade de potências disponíveis, que limitam o corte a determinadas espessuras.

Como alternativa ao laser, pode-se utilizar o corte por plasma ou arco de plasma. Essa técnica pode ser considerada similar à soldagem por arco elétrico com gás de proteção. O processo de corte a plasma é ideal para metais condutores (como o aço inoxidável, por exemplo) em razão da sua velocidade e excelente precisão de corte, como podemos ver na ilustração da Figura 3.9 a seguir:

Figura 3.10 | Processo de corte a plasma na indústria



Fonte: <<http://www.metalica.com.br/images/stories/artigos-tecnicos/processo-corte-plasma/menor/01plasma.jpg>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Plasma é um gás ionizado eletricamente condutor. A ionização dos gases produz elétrons livres e íons positivos junto com os átomos de gás. Quando isso ocorre, o gás torna-se eletricamente condutor, com a característica de transportar corrente, originando assim o plasma (O PROCESSO..., 2009). O plasma pode alcançar temperaturas muito elevadas, superiores a 10.000 °C.

Os gases mais comuns em cortes por arco de plasma são nitrogênio, hélio e dióxido de carbono.

No processo de corte a plasma para aços e ligas metálicas, o metal é derretido (fundido) pelo plasma e o material derretido é removido pelo gás em alta velocidade, lembrando que esse gás é ionizado em elevadas temperaturas, passando por um orifício minúsculo de um bico localizado na extremidade. Vale dizer que o processo por plasma guarda uma semelhança com o processo de soldagem TIG.

Ao abrir o arco de plasma, o início do corte é praticamente instantâneo e produz uma deformação mínima da peça de trabalho. É possível cortar chapas com espessuras de 0,5 a 160 mm, utilizando unidades de plasma de até 1000 A. Algumas das vantagens desse processo são as seguintes: alta qualidade e acabamento do corte, alta velocidade de corte e redução do tempo de usinagem (corte).

As principais limitações na utilização do plasma são: esse processo não corta materiais não condutores de eletricidade; não é um processo muito utilizado para materiais mais espessos (o processo de corte oxigênio + combustível ainda prevalece para esses materiais); e o plasma não é um equipamento portátil, pois exige um compressor auxiliar.



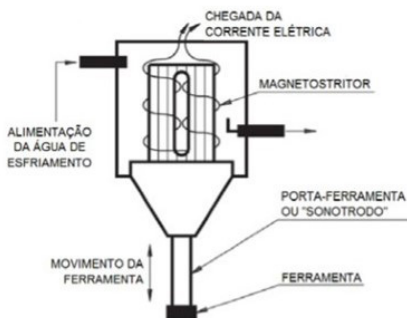
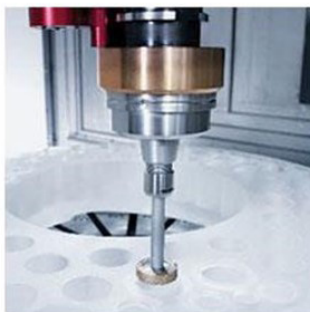
Tanto laser como plasma trabalham em elevadas temperaturas, daí a capacidade de corte de ambos os processos. Porém ambos podem alterar as propriedades metalúrgicas do material na zona de corte, e isso exige um controle minucioso do processo, bem como, em alguns casos, um tratamento térmico subsequente.

Processos não convencionais de usinagem: ultrassom

A necessidade de usinar materiais frágeis, de elevada dureza e elevada resistência mecânica, tais como os materiais cerâmicos, levou ao desenvolvimento de novas técnicas de usinagem que facilitassem o processo de remoção de material; surgiu a usinagem por ultrassom, ilustrado na Figura 3.11 a seguir.

Fazendo uso de energia mecânica para provocar erosão no material a ser usinado, o ultrassom consiste na emissão de frequências ultrassônicas, na faixa de 20 kHz a 100 kHz, de forma que as vibrações que são produzidas por um transdutor são amplificadas mecanicamente e transmitidas a uma ferramenta por meio de um porta-ferramenta chamado “sonotrodo”.

Figura 3.11 | Processo de usinagem por ultrassom



Fonte: Souza (2016, p. 17).

Ao contrário dos processos vistos até agora, uma das vantagens da usinagem por ultrassom é que ela não provoca alterações na estrutura interna do material usinado, mantendo sua integridade. No entanto, trata-se de um método cuja velocidade de usinagem é baixa, comparado aos demais processos.

Além de ser um processo de usinagem indicado para materiais frágeis (tais como os materiais cerâmicos), o ultrassom aplica-se também a materiais metálicos não ferrosos, materiais maus condutores, materiais não metálicos e em situações em que se deseja bom grau de acabamento em peças delicadas e de formas complexas.

Na extremidade da ferramenta aplica-se um produto (um tipo de pasta) abrasivo que, de fato, é o responsável pela usinagem da peça, uma vez que são as partículas abrasivas que removem o material da peça por erosão.



Pesquise mais

Entre os processos não convencionais de usinagem que estamos estudando, o processo por feixe de elétrons e o realizado por ultrassom têm peculiaridades nas quais vale a pena se aprofundar um pouco mais. Para tanto, assista ao vídeo a seguir, que apresenta mais detalhes desses dois processos:

Processos de fabricação: aula 77. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Zv3jylzT9gk&t=3s>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Bons estudos!

Processos não convencionais de usinagem: processos abrasivos

Além da usinagem convencional realizada por elementos abrasivos tais como em polimento, retificação e brunimento, por exemplo, a usinagem pode ocorrer por meio de jato abrasivo. Segundo esse processo, a remoção de material da peça usinada ocorre devido à ação de uma corrente de gás em alta velocidade, juntamente com minúsculas partículas abrasivas.

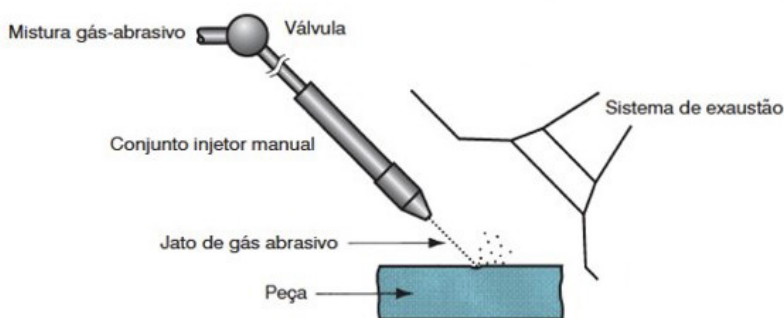
Os gases mais comuns são: ar seco, nitrogênio, hélio e dióxido de carbono. Seguem alguns parâmetros típicos do processo de jato abrasivo:

- Pressão do gás: entre 0,2 a 1,4 MPa.
- Diâmetro do orifício: 0,075 a 1,00 mm.
- Velocidade de avanço: 2,5 a 5,0 m/s.
- Distância entre a saída do bocal e a superfície da peça: 3,00 a 75 mm.

- Pressões de 0,7 a 20 Mpa, nos casos de partículas abrasivas misturadas com polímero viscoelástico.

A usinagem por processo de jato abrasivo aplica-se em materiais diversos, tais como titânio, superligas, materiais endurecidos. Temos que em apenas um único passe é possível realizar desbaste e acabamento. Veja na Figura 3.12 o esquema simplificado da usinagem por jato abrasivo.

Figura 3.12 | Esquema do sistema de jato abrasivo



Fonte: <<http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/util/b2evolution/media/blogs/annacarla/UsinagemI/Aula6-ProcessosNaoconvencionais.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

É interessante fazer uma comparação entre os processos de usinagem a laser, plasma, jato d'água e por descarga elétrica, quanto à capacidade (velocidade) de corte em função da espessura da chapa metálica a ser cortada.

O que se pode afirmar é que, para chapas com espessura de até 1,0 polegada, os processos por laser e plasma proporcionam possibilidades de velocidades elevadas de corte, enquanto que, para chapas mais espessas (até 5,0 polegadas), jato d'água e descarga elétrica são os mais recomendados, embora a descarga elétrica seja o mais lento de todos (ambos, porém, têm a capacidade de cortar chapas de até cerca de 12 polegadas de espessura, ou seja, chapas de cerca de 300 mm). O gráfico apresentado na Figura 3.13 mostra um comparativo de capacidade de acabamento de vários processos de fabricação convencional e não convencional.

Fonte: adaptada de <<https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-4e46e4e079c99277e12580fa2875711a>>. Acesso em: 6 mar. 2018.



A Tabela 3.4 a seguir mostra um interessante comparativo entre alguns processos de corte não convencional, envolvendo diversas variáveis das operações.

Tabela 3.4 | Comparativo da qualidade de acabamento proporcionado por diversos processos de fabricação

	Custo do sistema	Custos operacionais	Volume de produção	Velocidade de produção	Flexibilidade de materiais	Desgaste de ferramenta	Integração do sistema	Espessura do material/mm	Qualidade do corte	Dificuldade de formas	Nível de ruído
Laser	Alto	Médio	Alto	Alta	Alta	Não	Boa	25	Boa	Boa	Baixo
Puncionadora EDM	Alto	Médio	Alto	Alta	Baixa	Sim	Boa	12	Média	Média	Alto
Fresamento	Médio	Alto	Médio	Lenta	Baixa	Sim	Difícil	100	Boa	Média	Médio
Jato d'água	Médio	Médio	Médio	Lenta	Alta	Sim	Boa	---	Boa	Média	Médio
Oxicorte	Alto	Alto	Médio	Lenta	Alta	Sim	Boa	25-150	Boa	Boa	Alto
Plasma	Baixo	Baixo	Médio	Lenta	Baixa	Não	Boa	1300	Ruim	Razoável	Alto
	Médio	Alto	Médio	Alta	Baixa	Não	Boa	50	Ruim	Boa	Alto

Fonte: Lima ([s.d.], p. 3).



Exemplificando

Ao longo desta seção vimos os processos de fabricação (usinagem) por jato d'água, laser, plasma, ultrassom e jato abrasivo, que possuem características singulares como fonte de energia e elemento de usinagem. Com base na Tabela 3.5, faça a correlação correta entre os métodos de usinagem estudados e suas respectivas fontes de energia e elemento de usinagem.

Tabela 3.5 | Processos não convencionais de fabricação, fontes de energia e elementos de usinagem

P1 – Jato d'água	F1 – Mecânico	U1 – Gás
P2 – Laser	F1 - Mecânico	U2 – (Abrasivo + Gás)
P3 – Plasma	F2 – Termoeletrônico	U3 – Abrasivo
P4 – Ultrassom	F2 – Termoeletrônico	U4 – (Água + Abrasivo)
P5 – Jato abrasivo	F1 - Mecânico	U5 – Feixe de luz

Fonte: elaborada pelo autor.

Resposta:

A correlação correta é:

P1 – F1 – U4

P2 – F2 – U5

P3 – F2 – U1

P4 – F1 – U3

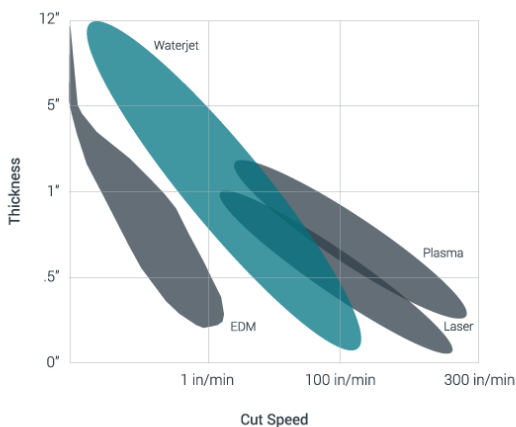
P5 – F1 – U2.

Sem medo de errar

Para você resolver o problema proposto nesta seção, lembre-se de que vimos as principais características dos processos de usinagem por jato d'água e por plasma, aplicados à operação de corte de material (chapas) metálico.

Segundo a problematização proposta, você, com sua curiosidade e criatividade em alta, deverá utilizar o diagrama da Figura 3.7 para especificar qual é a melhor maneira de cortar uma chapa de aço inoxidável de 1" de espessura, objetivando a obtenção de um elevadíssimo grau de acabamento associado a um baixo custo de produção. Para isso, devemos considerar fatores como: insumo de calor, uso de gás ou água, meio ambiente (poluição) e índice de remoção de material. O único parâmetro de usinagem disponível é a velocidade de corte. Vamos à solução!

Figura 3.8 | Relação entre processo de fabricação, espessura de usinagem e velocidade de corte



Fonte: <<http://www.flowwaterjet.com.br/Aprender/Corte-Comparativo.aspx#waterjet>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

A velocidade de corte de 50 mm/min equivale a, aproximadamente, 2"/min (ou 2 in/min).

Importante: observe que o diagrama da Figura 3.7 está em escala logarítmica, segundo o eixo das velocidades de corte ("cut speed") na

unidade de [polegadas/min] (ou [in/min]) e o eixo de espessura de corte (“thickness”) em polegadas. Assim, cruzando as informações de espessura da chapa (1”) com a velocidade de corte (2”/min), posicionamos na zona central da área azul que especifica o corte por jato d’água.

A opção de corte por plasma exigiria uma chapa de espessura similar, porém com uma velocidade de corte bem mais elevada.

Logo, com base nos dados disponibilizados e pelo diagrama da Figura 3.8, o processo mais adequado para cortar a chapa de aço inox de 1” é por jato d’água (waterjet).

Para verificar o atendimento aos demais requisitos da operação, consultando a Tabela 3.1, que nos mostra alguns parâmetros comparativos entre diversos processos de fabricação, podemos observar o seguinte:

- i. Quanto ao insumo de calor: o plasma utiliza fonte de energia eletrotérmica e o jato d’água, energia mecânica.
- ii. Quanto ao uso de gás ou água: o plasma faz uso de gás e o jato d’água faz uso de água.
- iii. Quanto ao agente poluidor: ambos se equivalem, não sendo processos poluidores.
- iv. Quanto ao índice de remoção de material: o plasma proporciona corte imediato, mas o mesmo não ocorre (ou se compara) com o jato d’água.

Tabela 3.1 | Comparativo entre os processos de usinagem convencionais com os processos de usinagem não convencionais

Quadro comparativo dos métodos de usinagem (tradicionais e avançados)										
Variáveis	Processos convencionais de usinagem	Processos avançados de usinagem								
	Jato d'água	Lasor	Oxícorte	Arco plasma	Eletrocorado	Química	Eletroquímica	Ultra-som	Fevre de elétrons	
naturza energética	mecânica	mecânica	eletrotérmica	térmica	eletrotérmica	química	eletroquímica	mecânica	eletro-mecânica	
agente de corte	água sob pressão	radiação luminosa	alta temperatura	gases e alta temperatura	descarga elétrica	agente corrosivo	eletrólito	manipelo	elétrons	
remoção do material	cisalhamento	erosão	fusão e vaporização	fusão	fusão e vaporização	fusão e vaporização	corrosão química	deslocamento de ions	erosão	fusão e vaporização
alterações na estrutura cristalina	não ocorre	não ocorre	localizada	não ocorre	não ocorre	não ocorre	não ocorre	não ocorre	não ocorre	localizada
velocidade de usinagem	variável, dependendo do processo	alta	alta	média	alta	baixa	baixa	baixa	baixa	alta
custo inicial de instalação	variável, de acordo com a precisão e o porte da máquina	alto	alto	baixo	médio	médio	baixo	médio	alto	alto
grau de acabamento	variável, de acordo com o processo	bom	bom	regular	médio	bom	bom	bom	bom	médio
materiais metálicos não ferrosos	aplicável	aplicável	aplicação limitada	não indicado	aplicável	aplicável	aplicável	aplicável	aplicável	aplicável
materiais mau condutores e não metálicos	aplicável	aplicável	aplicável	não indicado	não indicado	não aplicável	não indicado	não aplicável	aplicável	não indicado
formas complexas	apresentam muitas limitações	aplicável	recomendado	não indicado	aplicável	recomendado	recomendado	recomendado	aplicável	aplicável
peças delicadas	dependendo do processo, apresentam muitas limitações	aplicável	aplicável	não aplicável	aplicável	recomendado	recomendado	recomendado	aplicável	aplicável
microusinagem	não indicado	indicado	indicado	não aplicável	não recomendado	aplicável	indicado	indicado	indicado	indicado
materiais duros e frágeis	em materiais muito duros, é possível somente por abrasão	indicado	indicado, com restrições	não indicado	aplicável	recomendado	aplicável	aplicável	indicado	aplicável

Fonte: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/79proc.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

Assim, com base na Tabela 3.1, é possível concluir, a partir da completa avaliação e comparação entre os dois processos de usinagem, que o uso de jato d’água será o mais indicado para o corte em questão em termos de produção e de menor custo.

Tabela 3.4 | Comparação entre os diversos sistemas de corte

	Custo do sistema	Custos operacionais	Volume de produção	Velocidade de produção	Flexibilidade de materiais	Desgaste de ferramenta	Integração do sistema	Espessura do material/mm	Qualidade do corte	Dificuldade de formas	Nível de ruído
Laser	Alto	Médio	Alto	Alta	Alta	Não	Boa	25	Boa	Boa	Baixo
Puncionadora	Alto	Médio	Alto	Alta	Baixa	Sim	Boa	12	Média	Média	Alto
EDM	Médio	Médio	Médio	Lenta	Baixa	Sim	Difícil	100	Boa	Média	Médio
Fresamento	Médio	Médio	Médio	Lenta	Alta	Sim	Boa	---	Boa	Média	Médio
Jato d’água	Alto	Alto	Médio	Lenta	Alta	Sim	Boa	25-150	Boa	Boa	Alto
Oxicorte	Baixo	Baixo	Médio	Lenta	Baixa	Não	Boa	1300	Ruim	Razoável	Alto
Plasma	Médio	Alto	Médio	Alta	Baixa	Não	Boa	50	Ruim	Boa	Alto

Fonte: Lima (l.s.d.), p. 3).

Ao utilizarmos a Tabela 3.4, que apresenta outros comparativos entre os dois processos, observamos que:

- Corte por jato d’água vence em: flexibilidade de materiais; qualidade de corte.
- Corte por plasma vence em: custo do sistema; velocidade de produção; desgaste de ferramenta.
- Os dois processos são compatíveis quanto a: custos operacionais; volume de produção; integração do sistema; dificuldade de forma; nível de ruído.

Logo, comparando as análises da Tabela 3.1 com as análises da Tabela 3.4 e os resultados do diagrama da Figura 3.8, é possível concluir que o jato d’água é o processo de corte mais adequado para a chapa de aço inox de 1” de espessura.

Uma vez chegado a essa conclusão, cabe a você elaborar um relatório consubstanciado, com as devidas análises e justificativas para entregar ao seu superior.

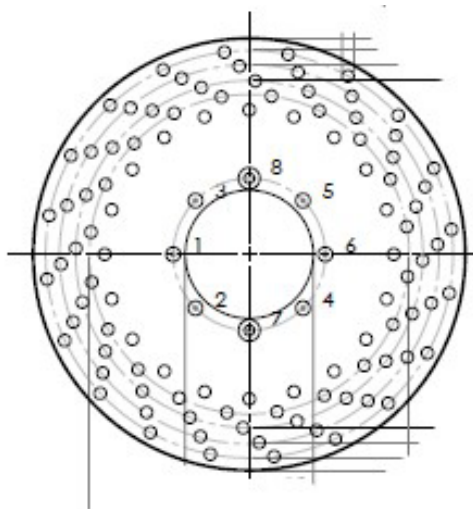
Note que, para chegar a essas conclusões, você precisou fazer uso da sua capacidade de análise, da sua curiosidade e criatividade. E observe, caro aluno, que nem sempre você precisará fazer cálculos robustos para chegar a um parecer sobre um determinado problema. Em muitos casos a análise criteriosa dos dados dos quais você dispõe, aliada aos seus conhecimentos, permite-lhe dar um parecer sobre o problema.

Usinagem de um disco de freio

Descrição da situação-problema

O setor de usinagem de uma empresa recebeu da área do setor de projetos o croqui de uma peça (disco de freio) que deverá ser fabricada em larga escala utilizando aço inoxidável. O perfil geométrico da peça a ser usinada está apresentado na Figura 3.14 a seguir, que mostra os detalhes de furação, utilizados para ventilação. O setor de projeto sugeriu usinar a peça por laser. Cabe a você verificar essa possibilidade, visto que você trabalha no setor de usinagem, e dar um laudo técnico a respeito.

Figura 3.14 | Croqui (rascunho) do disco de freio a ser usinado



Fonte: adaptada de <<http://discoinoxidavel.blogspot.com.br/2017/05/analise-detalhada.html>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Resolução da situação-problema

Observe você que a peça não chega a ter uma forma geométrica complexa, mas há uma série de pequenos furos no corpo do disco de freio que exigem precisão e qualidade. O material do freio é aço inoxidável e, portanto, um material condutor que é ideal para utilização do corte a laser.

Segundo a Tabela 3.4, temos que o laser proporciona uma boa

qualidade de corte e é indicado para elevada produtividade, mas é um processo de fabricação de custo elevado.

A Figura 3.14 mostra que o laser proporciona um acabamento superficial (rugosidade) tal que varia aproximadamente dentro do intervalo $0,2 < \text{rugosidade} < 1,0 \mu\text{m}$.

Você deve levar em consideração na sua análise que o feixe de laser chega a fundir e vaporizar o material ao redor desse ponto de incidência, e o material usinado (cortado) pode sofrer alterações metalúrgicas significativas, alterando a estrutura microscópica do material. Portanto, você deverá indicar no seu laudo a possibilidade de um tratamento térmico pós-usinagem.

Porém, há de se considerar também que, como será uma peça produzida em larga escala, poderão ser utilizados sistemas computadorizados do tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado), a fim de garantir uma produção elevada e com segurança ao operador.

Com essa análise, você deverá encaminhar seu parecer técnico ao setor de projetos, para os devidos encaminhamentos internos na empresa.

Faça valer a pena

1. Seguem as afirmativas sobre processos não convencionais de usinagem:

- I. Na usinagem por jato d'água não se observa efeito da temperatura no corte da peça. Por sua vez, o laser exerce uma enorme influência na região de corte por causa das elevadas temperaturas envolvidas.
- II. Daí o fato de o jato d'água não necessitar de um fluido de proteção ao material, enquanto que no laser a proteção se faz com o uso de gases (oxigênio ou nitrogênio).

Assinale a alternativa que apresenta o julgamento correto das afirmativas.

- a) As afirmativas (I) e (II) são falsas.
- b) A afirmativa (I) é verdadeira, mas a afirmativa (II) é falsa.
- c) A afirmativa (I) é falsa, mas a afirmativa (II) é verdadeira.
- d) As duas afirmativas são verdadeiras e se complementam.
- e) As duas afirmativas são verdadeiras, mas não se complementam.

2. Fazendo uma análise comparativa entre corte a laser e corte por plasma, podemos afirmar que:

- I. Laser e plasma são duas modalidades de usinagem que fazem uso de intenso calor para realizar o corte do material.
- II. O laser é ideal para materiais condutores (metais) e o plasma, para materiais não condutores.
- III. Tanto o laser como o plasma fundem e evaporam o material a ser usinado (cortado).
- IV. A velocidade de corte por plasma é maior que a velocidade de corte a laser, daí uma das vantagens do plasma sobre o laser.

Assinale a alternativa que corresponde à associação correta entre a afirmativa e sua veracidade (V) ou não (F).

- a) (I – V), (II – V), (III – V), (IV – F).
- b) (I – F), (II – F), (III – V), (IV – V).
- c) (I – V), (II – F), (III – V), (IV – V).
- d) (I – V), (II – F), (III – F), (IV – V).
- e) (I – F), (II – V), (III – F), (IV – F).

3. Os abrasivos em usinagem de metais – sejam na forma de pó ou de pasta – são muito utilizados em alguns processos não convencionais de fabricação, pois tratam-se de um produto que tem elevada capacidade de erodir o material usinado, facilitando a operação de corte e contribuindo também para proporcionar um bom acabamento superficial.

Assinale a alternativa que relaciona os processos não convencionais de usinagem que fazem uso de material abrasivo.

- a) Retificação – jato abrasivo – ultrassom.
- b) Jato de água – ultrassom – jato abrasivo.
- c) Ultrassom – brunimento – jato de água.
- d) Plasma – ultrassom – jato de água.
- e) Retificação – brunimento – polimento.

Referências

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. V. 2. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. p. 227-8.

COMPARAÇÃO dos métodos de usinagem. Disponível em: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/79proc.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

CORTE com agua. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=YvNE9CYa_yY>. Acesso em: 6 mar. 2018.

JATO DE água vs. outras tecnologias. Disponível em: <<http://www.flowwaterjet.com.br/Aprender/Corte-Comparativo.aspx#waterjet>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

LIMA, M. S. F. **Fabricação assistida por laser**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/PALESTRA02.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

MAHESH, N. S. **Metal remove processes**. Disponível em: <<http://164.100.133.129:81/eCONTENT/Uploads/Session-10,17,18%20%20Metal%20Removal%20Processes.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

O PROCESSO de corte de metais por plasma. 2009. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=788>. Acesso em: 6 mar. 2018.

O QUE É usinagem abrasiva? Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/o-que-e-usinagem-abrasiva>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

PEDROSO, E. F.; SOUZA, I. G. **Desenvolvimento de um torno eletroquímico automatizado**. Disponível em: <<http://www.s bq.org.br/ranteriores/23/resumos/1322/index.html>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

PROCESSOS de fabricação: aula 77. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Zv3jylzT9gk&t=3s>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

PROCESSOS de fabricação: aula 78. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=H0sS7oTdUhM>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem**. Apostila. UFRGS, Porto Alegre, 2016. p.17. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

UM CASO de eletroerosão. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/16192394/Processo-Fabric-69proc>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

USINAGEM I: parte I – aula 6: processos não convencionais e microusinagem. Disponível em: <<http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/util/b2evolution/media/blogs/annacarla/UsinagemI/Aula6-ProcessosNaoconvencionais.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

Centros de usinagem e CNC

Convite ao estudo

Caro aluno, chegamos a uma etapa das mais tecnológicas dos nossos estudos de usinagem. Vamos abordar a usinagem realizada por máquinas-ferramenta comandadas por computadores, ou mais precisamente, as máquinas Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Sendo assim, ao longo desta unidade você irá conhecer e compreender os fundamentos da usinagem por CNC, englobando os princípios de funcionamento de uma máquina CNC e os detalhes de um Centro de Usinagem. Você conhecerá o que é e como funciona um dispositivo conhecido como porta-ferramentas do tipo revólver e os principais sistemas de comando de um CNC. Na sequência, você verá como se trabalha com os sistemas de eixos e coordenadas em um programa para máquina CNC, assim como bases de programação na linguagem de código G. Finalizando esta unidade, estudaremos os conceitos básicos de Desenho Auxiliado por Computador (CAD) e Manufatura Auxiliada por Computador (CAM) aplicados à usinagem. Veremos a importância da computação gráfica e modelagem 2D e 3D em projetos de peças a serem usinadas, além de sistemas de CAD/CAM isolados e integrados e um pequeno passeio na simulação de Programas em Máquinas CNC.

Nesta unidade, estaremos focados em uma empresa fabricante de peças usinadas que está substituindo em seu parque manufatureiro os processos de fabricação com uso de máquinas ferramentas universais por máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), visando melhorar a

qualidade dos seus produtos e elevar a produção. Assim, haverá a necessidade de capacitação de seus funcionários. As peças fabricadas no centro de usinagem CNC derivam de protótipos previamente dimensionados pelo setor de prototipagem. Assim, a empresa precisará contar com um profissional de tecnologia que tenha domínio de programação em máquinas de usinagem CNC, além de conhecer e saber trabalhar com sistemas CAD/CAM em sistemas isolados e integrados.

Você será incentivado a solucionar diversos problemas de usinagem por CNC, tais como estabelecer as coordenadas para que uma ferramenta realize os movimentos corretos para usinar uma peça, pré-dimensionar um sistema de acionamento de uma máquina CNC e você também será instigado a elaborar um Plano de Processo que mostre todas informações necessárias para transformar em produto o desenho da peça.

Trabalhar na área de usinagem por CNC exige uma série de conhecimentos que nos permitam responder questões tais como: qual a sequência a ser programada para o processo de usinagem ocorrer de forma adequada? Qual sequência de ferramentas deve ser utilizada para obter os melhores resultados na usinagem? Quais os parâmetros de usinagem mais apropriados para uma determinada operação de usinagem e quais os cálculos envolvidos em uma usinagem CNC?

Sendo assim, os conteúdos que trataremos nesta unidade de ensino o capacitarão a compreender muitos fenômenos dos processos de usinagem CNC e de sistemas CAD/CAM.

Então, vamos aos nossos estudos!

Seção 4.1

Manufatura Mecânica: Usinagem

Diálogo aberto

Caríssimo aluno, nesta seção conheceremos a fundo as máquinas CNC, seu histórico e evolução ao longo do tempo. Nos concentraremos nos chamados Centros de Usinagem, que englobam diversas operações de usinagem em uma única central. Veremos como tais máquinas operam a usinagem em elevadas velocidades, bem como funcionam os sistemas de acionamento, técnicas operacionais e de manutenção das máquinas CNC.

A título ilustrativo e comparativo, podemos equiparar em quantidade e diversidade de funções, um Centro de Usinagem CNC a um smartphone que não tem apenas a função de telefone celular, mas, sim, de diversos aplicativos, como a máquina fotográfica, internet, etc., que são incorporados em um único equipamento.

Nesta unidade, iremos aplicar os conceitos preliminares de dimensionamento de sistemas de acionamento de uma máquina CNC. Você será instigado a desenvolver uma série de cálculos sequenciais (conhecidos como memoriais de cálculo), tendo em mente que “dimensionar” é algo que fará parte da rotina em sua área profissional. E, para “dimensionar”, você sempre precisará fazer uso da sua criatividade, curiosidade e conhecimento.

Nesta unidade, você, aluno, foi contratado por uma empresa que trabalha com máquinas-ferramenta do tipo CNC, alocado junto ao setor de projetos. Como primeira atividade a ser desenvolvida por você, seu gerente o incumbiu de realizar um memorial de cálculo, visando especificar o torque a ser fornecido pelo motor do conjunto (motor + carga) para uma máquina CNC, pois pretende-se adotar tal motor para o equipamento, além de ter dados sobre suas características no caso de futuras substituições.

Você poderia questionar: qual a importância de um memorial de cálculo em um projeto? As variáveis envolvidas em um memorial de cálculo são obtidas via catálogo de fabricante ou via dados experimentais? Como devemos ajustar os cálculos, nos casos de resultados incompatíveis?

Para tanto, o setor de projetos lhe entregou os seguintes dados, obtidos de catálogos de fabricantes e de cálculos previamente realizados:

- Passo do fuso: $p = 5,0\text{mm} / \text{volta}$.
- Coeficiente de atrito nas guias: $\alpha_g = 0,23$.
- Massa da mesa: $m_m = 40\text{kg}$.
- Massa da peça usinada: $m_p = 3,2\text{kg}$.
- Aceleração da gravidade: $g = 9,81\text{m} / \text{s}^2$.
- Força de corte: $F_c = 2000\text{N}$.
- Ângulo entre a direção da força de corte e o plano horizontal da mesa: $\theta = 35^\circ$.
- Massa do fuso: $m_f = 7,0\text{kg}$.
- Diâmetro do fuso: $d_f = 3,5"$.
- Aceleração angular: $\alpha = \frac{\pi}{3}\text{rad} / \text{s}^2$.
- Inércia do rotor do motor: $J_r = 1,10\text{kg.cm}^2$.

Concluídos os cálculos de todas as variáveis que o levaram à especificação do torque do motor, incluindo, é claro, o cálculo do próprio torque, você deverá apresentá-los à sua gerência na forma de um relatório, que irá conter o memorial de cálculo completo.

Observe, meu caro aluno, que para chegar à conclusão final desse problema, você terá utilizado diversos conceitos que serão abordados nesta seção, em particular os cálculos que envolvem o torque do motor de acionamento de máquinas CNC. Trata-se de um cálculo um tanto quanto complexo, mas que seu conhecimento e compreensão é de fundamental importância para sua formação acadêmica e futura atividade profissional.

Bons estudos!

Não pode faltar

Prezado aluno, seja bem-vindo à quarta unidade desta disciplina. Nesta primeira seção, mergulharemos no mundo dos processos de fabricação automatizados com a assistência de computadores. Falaremos um pouco das máquinas individuais e das máquinas que integram mais de um processo de fabricação (os chamados Centros de Usinagem), sendo que ambas, porém, são controladas (ou comandadas) por computadores e seus softwares;

as quais chamaremos de máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado). Vamos aos estudos!

CNC: Comando Numérico Computadorizado: Histórico e evolução das máquinas de comando numérico, características gerais e exemplos de aplicações destas tecnologias.

Como você deve se lembrar do início da nossa disciplina, na Seção 1 da primeira unidade, vimos que a usinagem existe, praticamente, desde a Idade da Pedra (milhares de anos antes de Cristo) e evoluiu ao longo dos tempos para atender às demandas e necessidades do homem em fabricar produtos cada vez mais complexos e utilizando materiais cada vez mais desenvolvidos tecnologicamente.

A partir dos processos de usinagem de características artesanais utilizados nos seus primórdios, chegamos aos dias atuais, nos quais os processos de fabricação fazem uso de sofisticada tecnologia, garantindo assim, melhor qualidade na fabricação dos produtos, melhor desempenho das máquinas, maior flexibilidade dos equipamentos e do seu ferramental, melhor relação custo/benefício, menor intervenção do homem na operação da máquina durante a usinagem (maior segurança do trabalhador) e menor impacto ambiental.

A principal responsável pela evolução crescente e rápida da usinagem moderna é a informática. A partir da década de 1980 e, com maior vigor, na década de 1990 a integração computador – máquina tornou-se uma realidade que permitiu o surgimento de uma nova forma de produção baseada em equipamentos com interfaces computadorizadas, originando as máquinas CNC, ou seja, Máquinas de Comando Numérico Computadorizado.

As operações de usinagem, antes realizadas por profissionais especializados, chamados de metalúrgicos (ou ainda, de torneiros mecânicos, que ainda são existentes), passaram a ser realizadas pela máquina com a mínima interferência do homem. Os computadores adaptados às máquinas-ferramenta, por meio de comandos gerados por programas de computadores específicos, passaram a operar os equipamentos, controlando praticamente todas as etapas da operação de usinagem: posicionamento da ferramenta, seleção da rotação e da velocidade de usinagem (além dos demais parâmetros de usinagem), troca de ferramenta, controle do fluxo de fluido de corte, desbaste e acabamento, etc.

Segundo Marcicano [s.d.], o primeiro protótipo de máquina

CN, ou seja, de controle numérico, foi construído em 1952 no Massachusetts Institute of Technology (MIT), que consistia em uma fresadora vertical copiadora, retrabalhada via “retrofitting” (ou seja, em um equipamento considerado ultrapassado) com servomotores, utilizada para efetuar o fresamento frontal de alumínio.

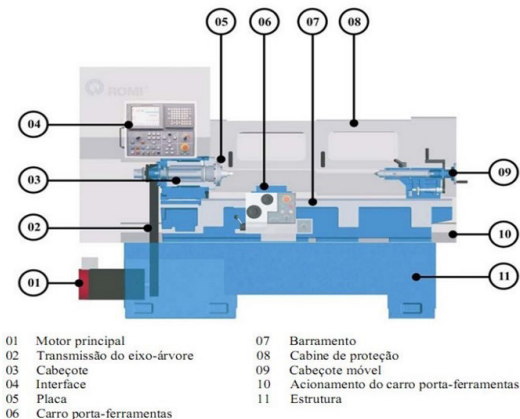
No sistema de controle numérico (CN), que é o sistema pioneiro de controle, os movimentos da máquina ocorrem pela interpretação de instruções codificadas em números e letras. No sistema CNC, o controle deixa de ser realizado por hardware e passa ser realizado por software.

Ainda segundo Marcicano [s.d.], foram desenvolvidos dois tipos de sistemas: o controle numérico direto e o controle numérico computadorizado. A diferença reside no fato que, no primeiro tipo, um único computador central controla várias máquinas e, no segundo tipo, cada máquina é equipada com o seu próprio processador.

Existe a opção de se programar em sistemas integrados remotamente (CAD-D que significa “esboço e desenho assistidos por computador”) e em sistemas de fabricação do tipo Manufatura Assistida por Computador (CAM) ou Processo de Planejamento Assistido por Computador (CAPP).

A tecnologia CNC é amplamente empregada em todos os processos de fabricação convencional e não convencional. Assim, na modalidade CNC, temos os seguintes equipamentos: tornos, fresadoras, furadeiras, retificadoras, equipamentos de corte por jato d’água, equipamentos de eletroerosão, dentre outros. A Figura 4.1 mostra um exemplo de um torno universal com interface CNC.

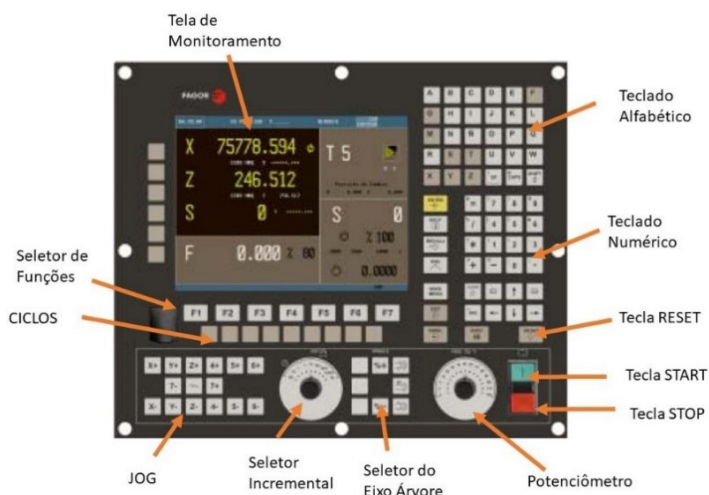
Figura 4.1 | Torno universal com controle por computador (CNC)



Fonte: Ferrari e Ferreira ([s.d.], p. 4). :

A Figura 4.2 mostra em detalhes um exemplo de painel de uma máquina CNC.

Figura 4.2 | Detalhes de um painel de CNC



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/yB9TRq>>. Acesso em: 6 dez. 2017.

É importante notar que há diversos modelos de painéis para equipamentos CNC, sendo o painel apresentado na Figura 4.2 apenas um deles, porém, as funções básicas não variam muito de um modelo para outro.

Centros de usinagem: características gerais e tendências tecnológicas, documentação do processo de usinagem CNC.

As máquinas ferramentas isoladas, tais como o torno, a fresadora, entre outras que estudamos na nossa disciplina, podem estar conectadas a um computador que, juntamente com o software apropriado, torna o equipamento um CNC.

Porém quando uma máquina é construída para realizar diversas operações de usinagem, seja torneamento, furação, fresamento, rosqueamento, etc., temos o chamado Centro de Usinagem, que é um tipo de máquina muito utilizado nas indústrias de fabricação, devido à sua versatilidade.

Uma característica peculiar deste tipo de equipamento é a

existência de um porta-ferramenta, que veremos em maiores detalhes a seguir, chamado porta-ferramenta do tipo revólver.

Assim como o profissional de usinagem (um torneiro mecânico, por exemplo) era muito procurado e valorizado há uns anos, atualmente o programador de Centro de Usinagem é um profissional muito valorizado no mercado de trabalho pois ele é, em linhas gerais, o responsável por realizar toda a programação de operações em Centros de Usinagem, verificando as ordens de produção e a funcionalidade das máquinas.

Assim, resumindo, um Centro de Usinagem integra, em uma única máquina, uma série de operações de usinagem que antes eram realizadas em equipamentos separados. Com isso, ganhou-se agilidade na produção, redução de custo para uma produção seriada e em grandes lotes, além de significativa melhoria na qualidade das peças usinadas.

A tendência tecnológica nessa área aponta para um conceito inovador que vem se acentuando nos últimos tempos. Você conhece a Indústria 4.0? Pois é, esse é o nome dado a um novo sistema integrado de produção, que engloba inclusive os processos de usinagem, segundo o qual há uma espécie de “diálogo” de Máquina para Máquina (M2M), caracterizando a interconexão entre células de produção, na qual “os sistemas passam a trocar informações entre si, de forma autônoma, tomando decisões de produção, custo, contingência e segurança, por meio de um modelo de inteligência artificial, complementado pela IoT *Internet of Things*” (LINS, [s.d.]), que significa “Internet das Coisas”. A indústria 4.0, por enquanto, foge da realidade do setor industrial do Brasil porque, além de ser um “conceito” novo (que surgiu na Alemanha), ainda não produziu algo definitivamente prático na área de usinagem.



Pesquise mais

Falando em Centros de Usinagem, vale a pena assistir ao vídeo <<https://goo.gl/76fSmx>>, acesso em: 6 dez. 2017, que mostra uma usinagem de torneamento e fresamento em uma máquina moderna, que utiliza tecnologia de ponta.

Na usinagem CNC, como em qualquer outro processo de fabricação, a documentação da operação de usinagem (ou documentação de trabalho) é fundamental para fins de registro.

Segundo Correr (2006, p. 12-13 apud CAUSSIM, 2001), quando as informações de *setup* de uma peça não são documentadas, é possível que futuramente um desperdício de tempo seja gerado, se for necessário repetir uma atividade antes executada, que demandou tempo para preparação do ferramental, dispositivos, parâmetros de usinagem, etc. Vale aqui destacar que a palavra *setup* em usinagem envolve todos os procedimentos necessários para preparar a máquina para a operação de usinagem.

Ainda segundo Correr (2006), para que essa situação seja evitada, deve-se elaborar um documento ou folha de processo, a partir de informações básicas, que contenha instruções de montagens dos dispositivos de fixação e de orientação da peça, listas de ferramentas, entre outras variáveis. Além disso, também é possível usar máquinas fotográficas e/ou vídeos, a fim de apresentar a montagem do dispositivo, da peça e do magazine de ferramentas.

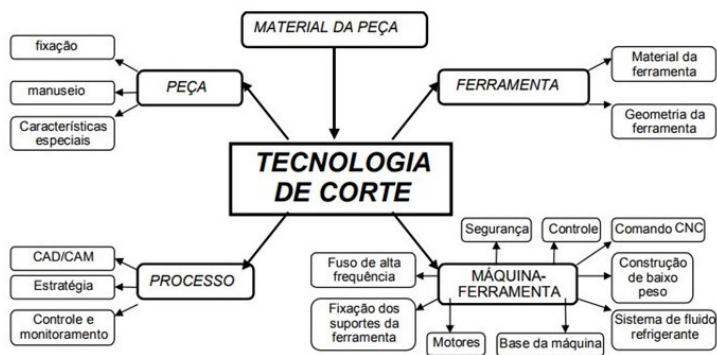
Processos especiais de usinagem em alta velocidade, seriada e complexo ferramental (porta ferramenta tipo revólver).

Veja, meu caro aluno, que até o momento tratamos de uma série de parâmetros de usinagem, envolvendo vários processos de fabricação. Desses parâmetros de usinagem, destacaremos a velocidade de corte. A velocidade de corte (ou ainda, velocidade de usinagem), está relacionada à remoção de cavaco no processo de desbaste, o grau de rugosidade de uma peça na operação de acabamento e a própria produtividade.

Associada à velocidade de corte, existe toda uma “tecnologia de corte” que engloba uma série de variáveis que precisam ser controladas em um processo de usinagem.

A Figura 4.3 a seguir mostra essas importantes correlações.

Figura 4.3 | Aspectos que interagem na aplicação da usinagem de alta velocidade

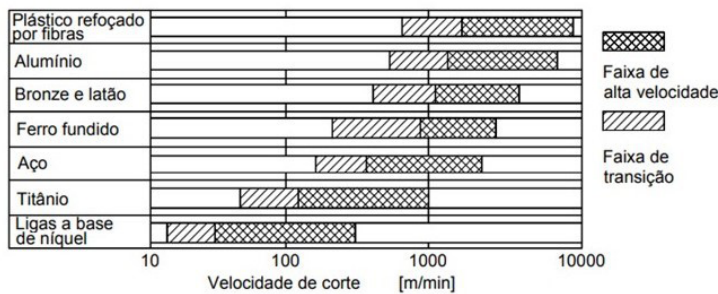


Fonte: Polli (2005, p. 40).

A utilização da usinagem a altas velocidades (ou HSC – High Speed Cutting) nas operações rotineiras de fabricação irá depender de fatores tais como: material da peça, tipo de operação de corte e do tipo de ferramenta utilizada.

De acordo com Polli (2005), as velocidades de corte empregadas na HSC são de 5 a 10 vezes maiores que os da prática convencional, sendo que a Figura 4.4 nos dá uma noção da magnitude dessas velocidades em função do material usinado.

Figura 4.4 | Faixas de altas velocidades de corte em função do material usinado



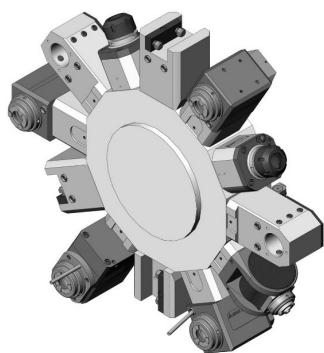
Fonte: Polli (2005, p. 39).

Ainda segundo Polli (2005), a tecnologia de usinagem a altas velocidades vem sendo desenvolvida principalmente para operações de fresamento e retificação, nas quais se concentram

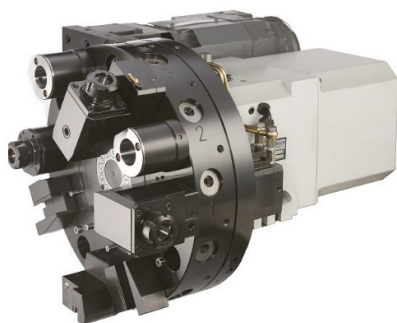
os seus maiores campos de utilização. O fresamento atende duas áreas da manufatura: desbaste e acabamento de materiais não-ferrosos, visando as altas taxas de remoção de material; e o semi-acabamento e acabamento de materiais ferrosos, a fim de garantir a qualidade do acabamento superficial da peça usinada.

A usinagem em alta velocidade e seriada depende também de um complexo ferramental que é inserido em um porta-ferramenta do tipo revólver, que você pode conferir na Figura 4.5 a seguir, que ilustra dois modelos dentre os vários existentes.

Figura 4.5 | Modelos de porta-ferramenta do tipo revólver: (a) do tipo estático para usinagem com torre de ferramentas; (b) porta-ferramenta motorizado para torno CNC



(a)



(b)

Fonte: (a) <<https://goo.gl/z6rtZP>>. (b) <<https://goo.gl/ttJMX3>>. Acesso em: 8 dez. 2017.



Reflita

Os porta-ferramentas do tipo revólver revolucionaram os processos de fabricação, dada sua versatilidade e flexibilidade, permitindo a troca de ferramentas de forma rápida e segura, além da realização de uma variedade de operações de usinagem que, sem a utilização desse tipo de porta-ferramentas, têm um tempo de usinagem de uma peça muito mais elevado. Procure fazer uma reflexão sobre a evolução dos processos de manufatura: desde a manufatura artesanal até os modelos atuais, como você vislumbraria a evolução tecnológica desses modelos para os próximos 10 anos e seu impacto nos processos de usinagem?

Em um sistema de porta-ferramenta do tipo revólver, as trocas de ferramentas são comandadas por meio do programa de controle numérico (CN), que faz girar o suporte de ferramentas até a colocação da ferramenta na posição de trabalho. Há ainda um outro sistema, chamado de magazine de ferramentas, no qual a troca de ferramentas se dá com o auxílio de um sistema de garras que se comporta como o trocador de ferramentas. Nesse modelo, a usinagem é interrompida pelo CN e o trocador de ferramentas retira a nova ferramenta do magazine, substituindo-a por aquela que estava na árvore principal.

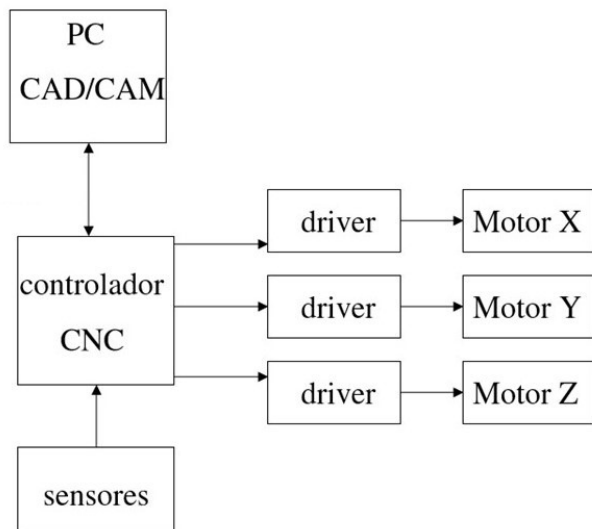
Sistema de Acionamento das Máquinas CNC; Técnicas operacionais de máquinas CNC e sua manutenção.

Uma máquina CNC possui um sistema de acionamento e movimentação que envolve controlador, drivers e motores.

O controlador CNC pode ser manual ou automático. O manual é responsável por selecionar o eixo, definir a velocidade, a movimentação manual do eixo, além de definir o “zero” da peça, receber o programa e realizar o liga/desliga do eixo árvore. O controlador CNC automático seleciona e executa o programa, ou seja, interpreta a linguagem com comando G e finalmente aciona motores de forma sincronizada.

O sistema de movimento engloba elementos mecânicos, eletrônicos, motores e sensores. A Figura 4.6 é um diagrama de blocos que nos mostra como os elementos se relacionam com o controlador CNC.

Figura 4.6 | Diagrama de bloco de um controlador CNC



Fonte: Adamowski (2005, p. 3).

Agora, vamos aprender como podemos calcular o torque no motor do sistema de acionamento.

Seja $T_{e\alpha}$ o torque estático devido ao atrito nas guias:

$$T_{e\mu} = \frac{p}{2.\pi} . \mu_g [(m_m + m_p).g + F_{cN}]$$

Em que p é o passo do fuso da guia [mm]; μ_g é o coeficiente da atrito da guia [adimensional]; m_m é a massa da mesa [kg]; m_p é a massa da peça [kg]; g é a aceleração da gravidade [m/s^2] e F_{cN} é a componente da força de corte normal à mesa.

Podemos calcular o torque (T_{Fc}) devido à força de corte (F_c) pela equação:

$$T_{Fc} = \frac{p}{2.\pi} . F_c$$

Como há a ocorrência de cargas dinâmicas durante o processo de usinagem, temos que calcular também a inércia da carga refletida no eixo do motor, ou seja:

$$J_p = (m_m + m_p) . \left(\frac{p}{2.\pi}\right)^2$$

Sendo que J_p é a inércia do conjunto (mesa + peça). Além disso, temos a inércia da carga (J_c), que é calculada por:

$$J_c = J_f + J_p, \text{ na qual: } J_f = m_f \left(\frac{d_f}{2} \right)^2$$

Em que J_f é a inércia do fuso [kg.m^2] e d_f é o diâmetro do fuso [m]. Logo, o torque a ser fornecido pelo motor (T) pode ser assim calculado por:

$$T = \alpha.(J_r + J_c) + T_{\theta\mu} + T_{fc}$$

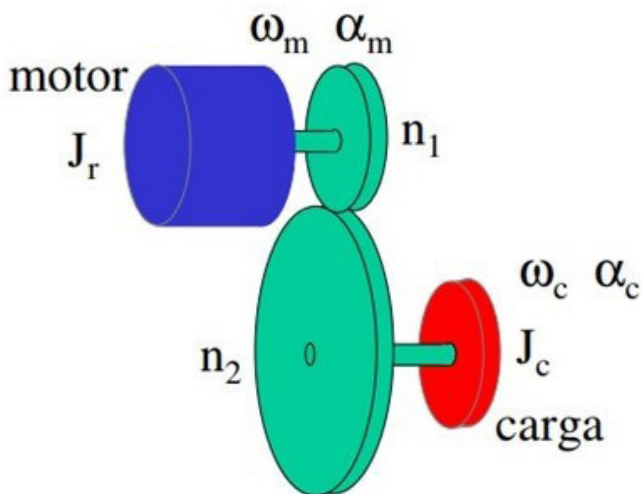
Em que α é a aceleração angular (s^{-2}) do eixo e; J_r é a inércia do rotor [kg.m^2]. Temos que os valores de J_r são tabelados, fornecidos pelos fabricantes em seus catálogos.

Portanto, temos que o torque total (T_T) pode ser assim calculado pela equação:

$$T_T = J_r.\alpha_m + \frac{J_c.\alpha_c}{n}$$

Temos que a equação do torque total (T_T) foi obtida baseando-se no esquema da Figura 4.7.

Figura 4.7 | Sistema motor-carga em um CNC



$$\text{Redução } n = n_2/n_1$$

Temos que a relação ótima n ocorre quando o torque é mínimo, sendo que n é dada por:

$$n = \sqrt{\frac{J_c}{J_r}}$$

Portanto:

$$T(n) = J_r \cdot n \cdot \alpha_c + \frac{J_c \cdot \alpha_c}{n}$$



Exemplificando

A partir da expressão para cálculo do torque estático devido ao atrito nas guias de um sistema de acionamento CNC, demonstre que o coeficiente de atrito μ_g da guia é um parâmetro adimensional. Considere que a expressão para o torque estático é $T_{e\mu} = \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \mu_g [(m_m + m_p) \cdot g + F_{cN}]$.

Solução:

Escrevendo a expressão $T_{e\mu} = \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \mu_g [(m_m + m_p) \cdot g + F_{cN}]$ em função

de suas respectivas unidades no SI (Sistema Internacional) de medidas, temos que:

$$N \cdot m = \frac{m}{[adm]} \cdot \mu_g [(kg + kg) \cdot \frac{m}{s^2} + N]$$

Simplificando as unidades, temos que:

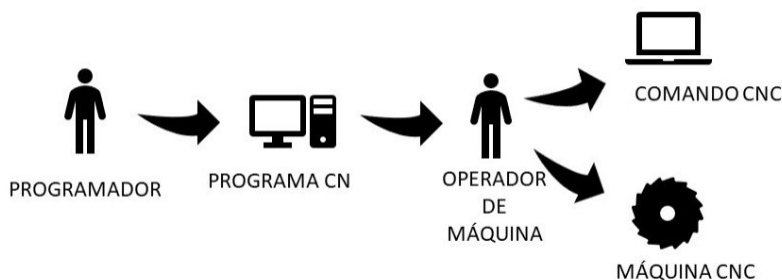
$$N \cdot m = \frac{m}{[adm]} \cdot \mu_g [(kg) \cdot \frac{m}{s^2} + N] \Rightarrow [adm] \cdot N \cdot m = m \cdot \mu_g \cdot [N + N]$$

$$[adm] \cdot N \cdot m = m \cdot \mu_g \cdot [N + N] \Rightarrow \mu_g = \frac{[adm] \cdot N \cdot m}{n \cdot N} = [adm]$$

Ou seja, μ_g , que representa o coeficiente de atrito, é um parâmetro adimensional conforme foi demonstrado.

As técnicas operacionais de uma máquina-ferramenta CNC são tais que necessitam que o operador de máquina seja capacitado, realizando um curso específico para operacionalizar cada tipo de equipamento CNC. A capacitação envolve os seguintes elementos, mostrados na Figura 4.8 a seguir:

Figura 4.8 | Cadeia operacional de um sistema CNC



Fonte: elaborada pelo autor.

O programa de manutenção dos equipamentos CNC, assim como acontece com os equipamentos convencionais, exige um cronograma de manutenção periódico que envolve as manutenções preventivas, corretivas e, eventualmente, preditivas.

O reparo corretivo é aquele empregado com o intuito de restaurar os estados iniciais e ideais de desempenho do sistema, excluindo as fontes de falhas que ali se instalaram.

Quando se trata da revisão preditiva entre a manutenção corretiva e preventiva de máquinas CNC, a principal meta é precaver paradas e imprecisões de peças e outros componentes da máquina CNC.

O reparo (ou troca total) dos dispositivos com peças originais deve ser sempre considerado quando se faz tanto uma manutenção corretiva como uma manutenção preventiva em máquinas CNC.



Assimile

Lembre-se sempre que CNC significa Comando Numérico Computadorizado e que é ele quem faz o controle, via interface computador-máquina, de todo o funcionamento de uma máquina-ferramenta, seja isolada ou um Centro de Usinagem integrado. Destaca-se, nesse tipo de equipamento, o uso de uma linguagem específica de programação e a existência de um porta-ferramenta do tipo revólver, que realizam toda a movimentação das ferramentas envolvidas na operação de usinagem.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você trabalha em uma empresa que está implantando novas máquinas CNC em sua planta e você foi contratado para acompanhar essas mudanças, interferindo quando necessário. A empresa está substituindo em seu parque manufatureiro os processos de fabricação, com uso de máquinas-ferramentas universais para máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC), visando melhorar a qualidade dos seus produtos e elevar a produção.

Nessa seção, você irá desenvolver um memorial de cálculo para determinar o torque de um motor a ser utilizado em uma máquina CNC, a partir dos dados disponibilizados pelo setor de projetos da empresa.

A determinação do valor do torque do motor é fundamental para saber se ele é o mais indicado para a máquina CNC funcionar adequadamente, por isso, não só sua criatividade e curiosidade devem ser envolvidas na solução desse problema, mas todo seu conhecimento de cálculo já aprendido até esta etapa do seu curso. Vamos à solução do problema proposto!

Os dados que o setor de projetos lhe passou foram os seguintes:

Passo do fuso: $p = 5,0\text{mm} / \text{volta}$; Coeficiente de atrito nas guias: $\mu_g = 0,23$; Massa da mesa: $m_m = 40\text{kg}$; Massa da peça usinada: $m_p = 3,2\text{kg}$; Aceleração da gravidade: $g = 9,81\text{m} / \text{s}^2$; Força de corte: $F_c = 2000\text{N}$; Ângulo entre a direção da força de corte e o plano horizontal da mesa: $\theta = 35^\circ$; Massa do fuso: $m_f = 7,0\text{kg}$; Diâmetro do fuso: $d_f = 3,5"$; Aceleração angular: $\alpha = \frac{\pi}{3} \text{rad} / \text{s}^2$ e Inércia do rotor do motor: $J_r = 1,10\text{kg.cm}^2$

Lembre-se que o torque fornecido pelo motor é calculado pela relação:

$$T = \alpha(J_r + J_c) + T_{e\mu} + T_{fc}$$

Seguindo o roteiro pré-estabelecido de cálculo, você irá calcular o torque estático devido ao atrito das guias.

$$T_{e\mu} = \frac{p}{2\pi} \mu_g [(m_m + m_p)g + F_{cN}]$$

$F_{cN} = F_c \cdot \text{sen}\theta = 2000 \cdot \text{sen}35^\circ = 1147,1\text{N}$ Lembrando que $p = 5\text{mm} / \text{volta} = 0,005\text{m} / \text{volta}$, teremos então:

$$T_{e\mu} = \frac{0,005}{2\pi} \cdot 0,23 \cdot [(40 + 3,2) \cdot 9,81 + 1147,1] = 0,288 N.m$$

O valor aqui calculado refere-se, portanto, à contribuição do torque estático devido ao atrito das guias ao torque do motor que estamos calculando. Agora, você irá calcular o torque devido à força de corte:

$$T_{fc} = \frac{p}{2\pi} \cdot F_c = \frac{0,005}{2\pi} \cdot 2000 = 1,6 N.m$$

Comparativamente ao torque calculado anteriormente (devido ao atrito nas guias), o torque devido à força de corte é significativamente mais influente no resultado final do torque necessário para o motor.

Na sequência, você deve calcular a inércia do conjunto peça e mesa:

$$Jp = (m_m + m_p) \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 = (40 + 3,2) \cdot \left(\frac{0,005}{2\pi} \right)^2 = 2,74 \cdot 10^{-5} kg.m^2$$

Segue o cálculo da inércia da carga, lembrando que $d_f = 3,5" = 0,089m$:

$$Jc = Jp + J_f = Jp + m_f \cdot \left(\frac{d_f}{2} \right)^2 = 2,74 \cdot 10^{-5} + 7 \cdot \left(\frac{0,089}{2} \right)^2 = 0,0139 kg.m^2$$

Finalmente, voltando à expressão inicial de torque, temos que:

$$T = \alpha(Jr + Jc) + T_{e\mu} + T_{fc} = \frac{\pi}{3} \cdot (1,1 \cdot 10^{-4} + 0,0139) + 0,288 + 1,6 = 1,90 N.m$$

Como você deve ter observado ao longo dos cálculos, o torque do motor é uma soma de diversos torques parciais, sendo que a parcela que mais contribuiu para esse valor é o torque referente à força de corte (T_{fc}), que corresponde a cerca de 84% do torque total.

Note ainda que, depois da força de corte, a segunda variável que mais contribui para o cálculo do torque do motor é justamente o coeficiente de atrito. Porém isso não significa que podemos descartar o torque das demais parcelas, existindo a necessidade de se analisar caso a caso.

A partir desses cálculos, tem-se que você dimensionou o torque do motor do acionamento do seu CNC e este deverá ser apresentado ao seu gerente em um relatório consubstanciado, contendo todo o memorial de cálculo aqui desenvolvido.

Observe que para solucionar o problema proposto, foi mobilizado todo o equacionamento apresentado ao longo dessa seção.

Assim, como a empresa está introduzindo novos equipamentos CNC à sua linha de produção, é bem possível que este motor do catálogo tenha, entre outras características, um torque adequado para os novos equipamentos a serem adquiridos (ou adaptados).

Avançando na prática

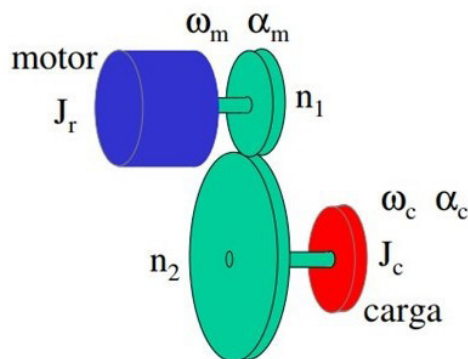
Determinação do torque de um motor utilizado no acionamento de um CNC.

Descrição da situação-problema

Considere que sua máquina CNC tenha um sistema de acionamento motor-carga segundo o modelo da Figura 4.7 reproduzida a seguir.

De acordo com os dados do catálogo do fabricante do motor, a inércia do rotor é de $1,10 \text{ kg.cm}^2$. Considerando, ainda, os seguintes dados obtidos em cálculos preliminares: relação de transmissão $n=1/3$ e $\alpha_c = \frac{\pi}{3} \text{ rad/s}^2$, temos que você deverá calcular o torque mínimo fornecido pelo motor no acionamento da máquina CNC.

Figura 4.7 | Sistema motor-carga em um CNC



$$\text{Redução } n = n_2/n_1$$

Resolução da situação-problema

Iniciando a solução, temos que o torque pode ser obtido a partir da relação: $T(n) = Jr.n.\alpha_c + \frac{Jc.\alpha_c}{n}$

Sabe-se também que: $n = \sqrt{\frac{Jr}{Jc}} \Rightarrow n^2 = \frac{Jr}{Jc} \Rightarrow Jc = \frac{Jr}{n^2}$

Porém: $Jr = 1,10 \text{ kg.cm}^2 = 1,10 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$ (no S.I.).

Assim: $Jc = \frac{Jr}{n^2} = \frac{1,10 \cdot 10^{-4}}{\left(\frac{1}{3}\right)^2} = 9,1 \cdot 10^{-4} = 9,9 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$

Portanto: $T(n) = Jr.n.\alpha_c + \frac{Jc.\alpha_c}{n} = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{9,9 \cdot 10^{-4} \cdot \pi}{3 \cdot \frac{1}{3}} = 3,134 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}$

Observe, caro aluno, que o resultado desse novo problema nos fornece o torque mínimo para acionar o sistema apresentado.

Calculamos o torque em função da relação n , ou seja,

$n = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{J_r}{J_c}}$ e o torque é obtido por $T(n) = Jr.n.\alpha_c + \frac{Jc.\alpha_c}{n}$.

Quando a relação n é ótima temos o torque mínimo, ou seja:

$$\frac{dT(n)}{dn} = J_r.\alpha_c - \frac{J_c.\alpha_c}{n^2} = 0 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{J_c}{J_r}}.$$

Daí o resultado de $T(n)$ ser mínimo.

Faça valer a pena

1. As máquinas-ferramentas do tipo CNC possuem diversas características operacionais e construtivas que as tornam especiais. Em relação a essas características, seguem as assertivas:

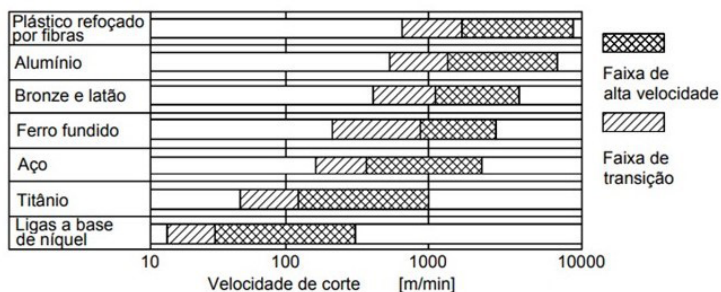
- I. A existência de um programa de computador que controla todas as operações realizadas pela máquina.
- II. O modelo de controle CNC só se aplica aos centros de usinagem.
- III. A troca de ferramenta é realizada por um dispositivo chamado porta-ferramentas do tipo revólver ou por um sistema chamado magazine de ferramentas.
- IV. O sistema CNC não se aplica às máquinas de usinagem por processos não-convencionais.

Assinale qual das alternativas a seguir corresponde à sequência correta de V e F das assertivas apresentadas no texto-base.

- a) V – V – V – V.
- b) V – F – V – F.
- c) F – V – F – V.
- d) V – V – V – V.
- e) V – V – V – F.

2. Considere a Figura a seguir, que nos mostra as faixas de altas velocidades de corte em função do material usinado.

Figura | Faixas de altas velocidades de corte em função do material usinado



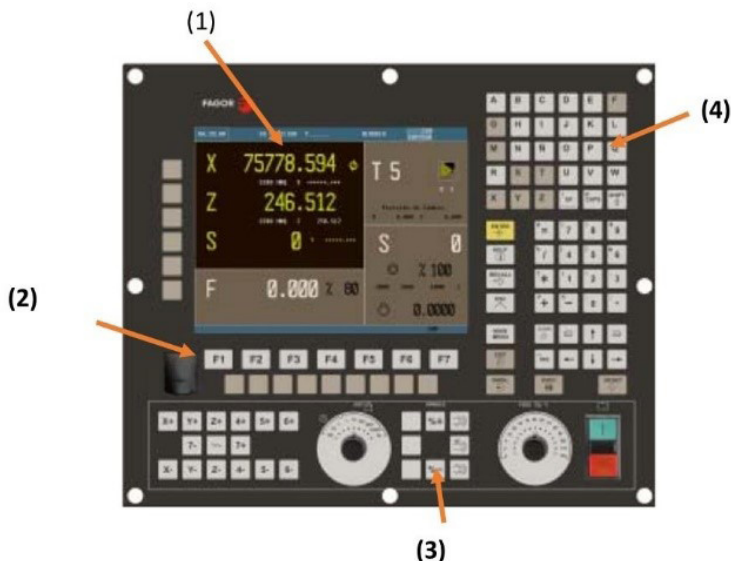
Fonte: Polli (2005, p. 39).

Se usinarmos por torneamento dois eixos de diâmetro 40 mm, sendo um deles de aço e o outro de uma liga à base de níquel, fazendo uso de altas velocidades de corte, qual a relação (aproximada) de rotação máxima esperada entre as duas operações de usinagem ($n_{aço} / n_{Ni}$)?

- a) 3.
- b) 6.
- c) 9.
- d) 15.
- e) 2/3.

3. As máquinas CNC são equipamentos controlados por computador, cujos painéis apresentam modelos variados, sendo que as funções básicas estão presentes em todos os modelos. Observe a Figura a seguir, que ilustra um desses modelos de painéis.

Figura | Painel de uma máquina CNC



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/t5omW8>>. Acesso em: 6 dez. 2017.

Assinale a alternativa a seguir que corresponde corretamente aos números (1), (2), (3) e (4) indicados pelas setas na Figura.

- a) Tela de monitoramento – Seletor de eixo-árvore – Seletor de funções – Teclado alfanumérico.
- b) Tela de controle – Potenciômetro – Seletor de funções – Teclado alfabético.
- c) Tela de monitoramento – Seletor de funções – Seletor de eixo-árvore – Teclado alfabético.
- d) Tela de controle – Seletor de ciclos – Seletor incremental – Teclado alfanumérico.
- e) Tela de monitoramento – Seletor de eixo-árvore – Seletor de rotação – Teclado alfabético.

Seção 4.2

Sistemas de eixos e de coordenadas; programação em máquinas CNC

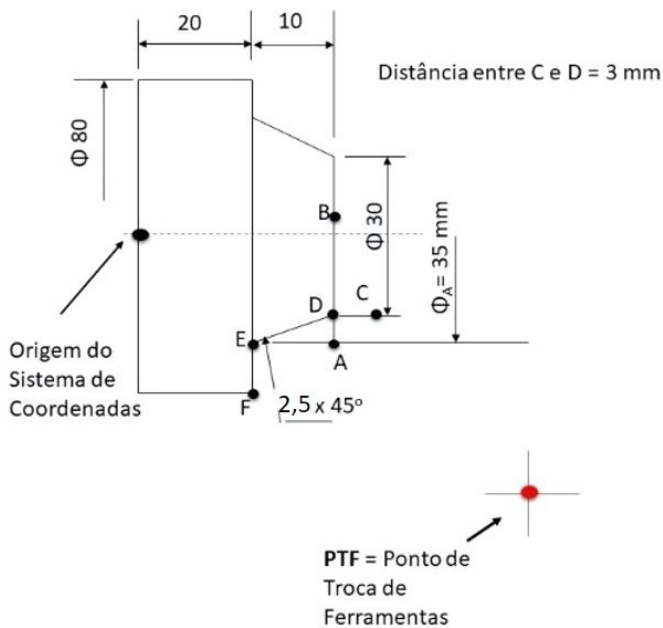
Diálogo aberto

Caro aluno, você está entrando no mundo da programação para máquinas CNC. Nesta penúltima seção do nosso curso, você aprenderá a estabelecer as coordenadas de um sistema de eixos para usinagem em CNC, além de aprender alguns passos de programação.

Somente a título de comparação, temos que, dentro do nosso cotidiano, a tecnologia tem proporcionado avanços incríveis não só em máquinas e ferramentas (em que as operações eram manuais e passaram a ser programadas) como nos eletrodomésticos, sendo que atualmente alguns realizam tarefas pré-programadas (uma máquina de fazer pão, por exemplo, ou uma geladeira com painel digital na porta). São mundos diferentes, mas em ambos a presença da computação se faz presente.

Temos que, na empresa em que você foi contratado para trabalhar na área de usinagem CNC, a máquina adquirida utiliza um porta-ferramenta do tipo “revólver” e, no processo de capacitação dos funcionários, visando entender o movimento das ferramentas durante o processo de usinagem, você foi designado para realizar uma programação CNC básica, baseando-se na usinagem da peça da Figura 4.9 a seguir, explorando ao máximo sua criatividade e curiosidade. Referente ao ponto B, ilustrado na Figura 4.9, o valor de $x = 1.00$ é adotado para evitar possível rebarba na região central da peça, assim desloca-se o ponto B a **0.50mm** acima da linha do eixo principal (como cotamos o raio, o valor fica **1.00mm**).

Figura 4.9 | Peça a ser usinada por CNC



Fonte: <<http://www.adilsonrusteiko.com/tornocnc1.html/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

Ao final da resolução da problematização proposta, você deverá indicar na Tabela 4.1 as posições ocupadas pela ferramenta.

Tabela 4.1 | Valores de deslocamento da ferramenta de usinagem

Partida	Chegada	x (diâmetro)	z (comprimento)
PTF	A		
A	B		
B	C		
C	D		
D	E		
E	F		
F	PTF		

Fonte: adaptada de Rusteiko [s.d.].

Para resolvermos a problematização proposta, devemos refletir sobre o porquê de estabelecermos um sistema de coordenadas de referência para a operação de usinagem. Qual a necessidade de uma “visão espacial” para visualizar esse sistema de coordenadas antes e durante o processo de usinagem? Quais as implicações em não se estabelecer um sistema de coordenadas? Ao final da resolução, por se tratar de uma atividade de capacitação dos funcionários, estes deverão receber a resolução de forma completa e comentada, apresentada na forma de um memorial de cálculo.

Note, finalmente, que todo o conteúdo abordado nesta seção será de extrema valia para a resolução dessa problematização, além de como trabalhar corretamente com um sistema de referência de coordenadas.

Finalizando, temos que esta atividade é de grande importância dentro do contexto da nossa disciplina e do contexto profissional, pois trabalharemos todos os conteúdos aqui abordados, levando você, aluno, a compreender o mecanismo de orientação da operação de usinagem a ser realizada pela ferramenta da máquina, com base nas coordenadas estabelecidas a partir do desenho da peça.

Bons estudos!

Não pode faltar

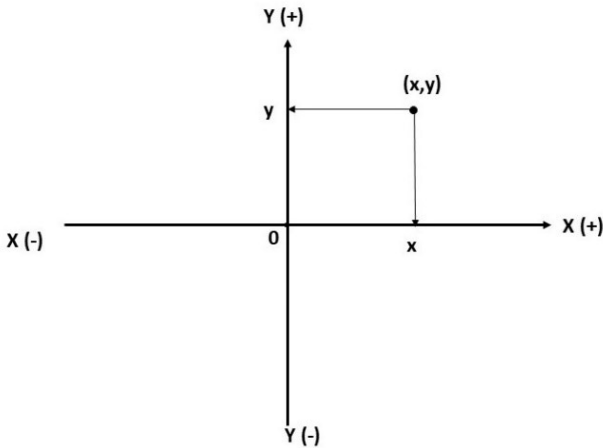
Prezado aluno, estamos na segunda seção desta unidade, na qual estudaremos como funciona o sistema de eixos e coordenadas para posicionamento e movimentação da ferramenta de corte, para fins de orientação no processo de usinagem CNC. Embora tal sistema de eixos e coordenadas se aplique a todos os processos de usinagem, usaremos o torneamento e o fresamento como operações básicas para nossos estudos.

Aqui você aprenderá também noções básicas e introdutórias de programação para máquinas CNC. Eleve sua curiosidade e criatividade ao máximo e vamos aos estudos!

Sistemas de eixos e de coordenadas em torneamento e em fresamento CNC

Aprendemos que as coordenadas em um plano cartesiano servem para nos orientar na localização de um ponto segundo os eixos (X, Y, Z), conforme mostrado na Figura 4.10:

Figura 4.10 | Sistema cartesiano de plano de coordenadas

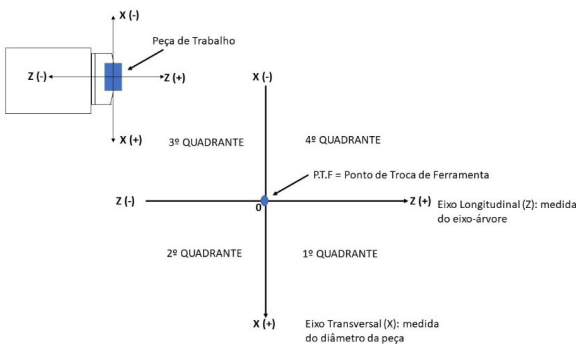


Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 4.10 o eixo Z não aparece, pois ele é o eixo perpendicular ao plano (X, Y) e vamos considerá-lo apontado para cima deste plano; daí termos registrado o ponto de coordenadas (x, y) no respectivo plano (X, Y) apenas.

No sistema de coordenadas planas para CNC, a orientação dos eixos é inversa ao do sistema cartesiano, sendo portanto, que ao invés de (X, Y), temos as coordenadas (Z, X) como podemos ver na Figura 4.11 a seguir.

Figura 4.11 | Sistemas de coordenadas planas para CNC

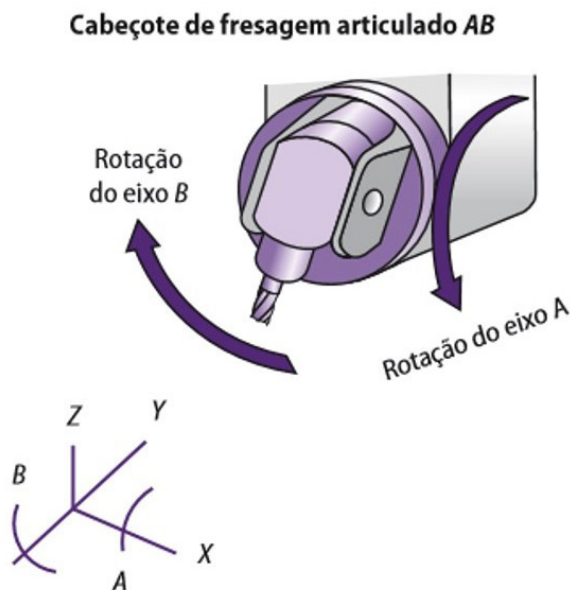


Fonte: adaptada de Rusteiko (s.d.).

No torneamento de peças cilíndricas, para fins de programação, os valores de X são inseridos como sendo o diâmetro da seção a ser usinada.

Segundo Fitzpatrick (2013, p.17) "há nove eixos padrões universalmente utilizados na usinagem CNC. Três são os familiares eixos lineares primários, com movimentos (em linha reta) X, Y e Z. Os três eixos de rotação primários (A, B e C) são usados para identificar um arco ou movimentos circulares, tais como um fuso de um torno giratório programável ou uma articulação de cabeçote de uma fresadora com movimento de punho" (vide Figura 4.12 a seguir, onde temos dois eixos indicados).

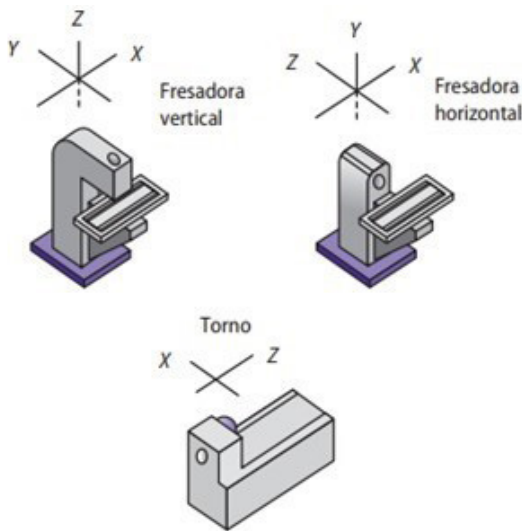
Figura 4.12 | Eixos de rotação primários de uma fresadora



Fonte: Fitzpatrick (2013, p. 17).

Ainda conforme Fitzpatrick (2013, p.17), "temos três eixos secundários em linha reta, chamados de eixos lineares auxiliares (U, V e W). Eles são adicionados ao sistema para uma produção multiaxial, algumas vezes chamada de multitarefa". A Figura 4.13 a seguir nos mostra como são aplicados os sistemas de coordenadas de eixos no torno e na fresadora.

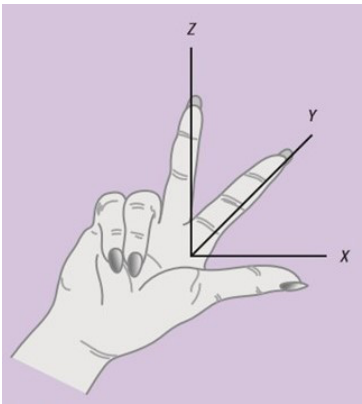
Figura 4.13 | Eixos principais para fresadora e torno em usinagem CNC



Fonte: adaptada de Fitzpatrick (2013, p.18).

Há uma dica prática para saber em uma máquina CNC, seja ela qual for, quais são os eixos primários (X, Y, Z). Trata-se da Regra da Mão Direita. A fim de utilizarmos essa regra, recomenda-se olhar primeiro para o eixo Z (veja Figura 4.13, que ilustra o caso do torno e da fresadora) da máquina e, uma vez identificado, deve-se aplicar a regra conforme ilustra a Figura 4.14 a seguir:

Figura 4.14 | Regra da Mão Direita para eixos X, Y e Z em máquinas CNC



Fonte: Fitzpatrick (2013, p. 19).

“Apontando o dedo polegar de sua mão direita ao longo da direção positiva do eixo X, o seu dedo indicador aponta para a direção positiva do eixo Y. Por fim, o dedo médio aponta para o eixo Z positivo” (Fitzpatrick, 2013, p. 19).

Aplicação de sistemas de coordenadas

Para operar no sistema CNC, você pode fazer uso de dois tipos de coordenadas: as coordenadas absolutas e as coordenadas incrementais. A escolha por uma ou outra dependerá se você está se orientando com referência à origem (0,0,0) do sistema de coordenadas (absolutas) ou se você está se orientando (adotando como referência) partindo de um ponto anterior (não, necessariamente do (0,0,0)), que é a chamada coordenada incremental (Fitzpatrick, 2013).

Podemos diferenciar os dois tipos de coordenadas procurando fazer uma definição para cada uma. Assim, “Coordenada Absoluta é aquela em que cada entrada representa a distância do ponto a partir da origem (0,0,0). Por outro lado, nas Coordenadas Incrementais cada entrada representa a distância do ponto identificado a partir do ponto anterior” (FITZPATRICK, 2013, p. 13).



Assimile

Uma coisa que deve ficar bem clara quando se fala em sistemas de coordenadas para usinagem em CNC é a diferença entre coordenadas absolutas e coordenadas incrementais. Na primeira, as coordenadas de todos os pontos referem-se à origem do sistema de coordenadas; no segundo, as coordenadas de cada ponto tomam como origem as coordenadas do ponto anterior que assume o valor (0,0,0).

Fixação de peças em usinagem CNC

Segundo Cassaniga (s.d.), “os dispositivos para fixação de peças em máquinas CNC vão desde simples placas pneumáticas para tornos até sofisticados sistemas hidráulicos ou eletroeletrônicos comandados por computadores e carregados/descarregados por robôs”. A sofisticação depende da necessidade do processo de usinagem e da verba disponível para a fabricação da peça.

Ainda segundo Cassaniga (s.d.), os dispositivos de fixação de peças

para máquinas CNC devem obedecer aos seguintes requisitos técnicos:

- Garantir rigidez na usinagem das peças
- Permitir fácil acesso da peça (no sentido de carga e descarga e proximidade do operador)
- Permitir repetitividade na localização da peça
- Permitir rápida preparação da máquina
- Ser intercambiável e de vida longa (além de ser um dispositivo simples)
- Ter baixo custo de confecção.

Um dos principais elementos de fixação de peças em equipamentos CNC são os blocos magnéticos. Tais blocos são apropriados para fixação de peças médias e pequenas, utilizadas em máquinas CNC verticais e horizontais, a fim de realizar o acabamento de corte e a retífica de peças.

Segundo alguns fabricantes desses dispositivos de fixação de peças a serem trabalhadas, operações como, furação, rosqueamento, fresamento, chanframento (ranhuras) e canalização podem ser realizadas em uma só vez, economizando no processo de fabricação. A Figura 4.15 ilustra um típico bloco magnético de fixação de peças em CNC.

Figura 4.15 | Bloco de fixação de peça em máquinas CNC



Fonte: <<https://www.worldtools.com.br/produto/bloco-magnetico-para-fixacao-de-pecas-em-maquinas-cnc-forca-1500-kgf-syt-150a/3357>>. Acesso em: 1 fev. 2018.

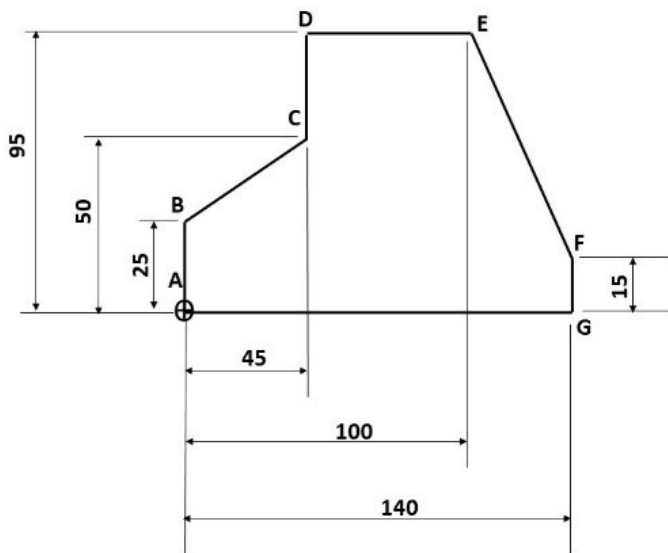
Agora que você assimilou corretamente os conceitos referentes aos tipos de coordenadas utilizadas em CNC, vamos em frente fazendo um exemplo de aplicação.



Exemplificando

Temos que a empresa para a qual você foi contratado está implantando um sistema de manufatura baseada em equipamentos CNC. Você foi incumbido de capacitar os demais trabalhadores no entendimento da programação CNC. Na posição de projetista júnior de processos de fabricação que você ocupa é fundamental saber ler e interpretar um desenho e extrair dele as suas coordenadas (cartesianas absolutas ou incrementais). Neste processo de capacitação, você foi designado pelo seu chefe para relacionar as coordenadas incrementais de um perfil de uma peça, apresentado na Figura 4.16, que será usinada por uma máquina CNC, e transmiti-las aos demais funcionários. Você deverá analisar o perfil da peça apresentada, preenchendo a tabela fornecida.

Figura 4.16 | Perfil da peça a ser usinada por CNC (fresadora)



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 4.2 a seguir deve ser preenchida com as coordenadas cartesianas incrementais.

Tabela 4.2 | Coordenadas incrementais para usinagem da peça da Figura 4.17

	Coordenadas Incrementais	
Pontos	x	y
B		
C		
D		
E		
F		
G		
A		

Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos à solução deste exemplo:

A fim de preenchermos a tabela de coordenadas (X, Z), vamos adotar a partir do ponto A um sistema de eixos tal que **X(+)** → e **Y(+)** ↓. Para melhor se orientar, caso necessário, observe na Figura 4.12 a fresadora vertical.

Assim, novamente, partindo do ponto A como origem, as coordenadas do ponto B são: B (0,00; -25,00).

Como estamos usando coordenadas incrementais, na sequência adotamos o ponto B como origem. Daí o ponto C terá as seguintes coordenadas (tomando B como origem): C (45,00; -25,00).

Agora, tomando C como origem, o ponto D terá as seguintes coordenadas: D (00,00; -45,00).

Tomando o ponto D como origem, o ponto E terá as seguintes coordenadas incrementais: E (55,00; 00,00).

O ponto E passa a ser nossa origem para determinarmos as coordenadas de F. Assim, temos: F (-40,00; 80,00).

Tomando o ponto F como origem para determinarmos as coordenadas do ponto G, teremos: G (00,00; 15,00).

Finalmente, ao retornarmos ao ponto A, adotamos como origem o ponto G. Daí as coordenadas incrementais de A serão: A (-140,00; 00,00).

A Tabela 4.3 nos mostra a Tabela 4.2 preenchida:

Tabela 4.3 | Coordenadas incrementais para usinagem da peça da Figura 4.16 preenchida

Pontos	Coordenadas Incrementais	
	x	y
B	00,00	-25,00
C	45,00	-25,00
D	00,00	-45,00
E	55,00	00,00
F	-40,00	80,00
G	00,00	15,00
A	-140,00	00,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Concluimos, assim, o contorno completo da peça fresada, aplicando o conceito de coordenadas incrementais.

Agora que você viu um exemplo de aplicação de coordenadas utilizadas em CNC, é hora de pesquisar um pouco mais.



Pesquise mais

Para se aprofundar em mais detalhes sobre sistemas de eixos e coordenadas para aplicação em máquinas CNC, recomenda-se a leitura do capítulo 1 do livro de Fitzpatrick (2013, p. 1 a 27). Boa pesquisa e bons estudos complementares!

Códigos em G00 e G01 em torneamento e fresamento

Os programas para máquinas CNC utilizam a programação por código G (ou linguagem ISO), que é constituída de linhas ou blocos de comandos que fazem o controle da máquina que, por sua vez, controlam todos os elementos envolvidos na usinagem.

São dois os códigos básicos: G00 refere-se a avanço rápido e G01 refere-se a avanço linear.

Para escrevermos uma linha completa de comando, temos que conhecer também outros códigos fundamentais que são os seguintes, segundo Rodrigues [s.d.]:

i) Códigos de informação de geometria:

X – movimento horizontal longitudinal;

Y – movimento horizontal transversal;

Z – movimento vertical;

R0 – raio de circunferência: pode ser (+) ou (-) e a colocação do sinal é obrigatória;

I – centro de circunferência no eixo X;

J – centro de circunferência no eixo Y;

K – centro de circunferência no eixo Z.

ii) Funções auxiliares:

N – numeração das linhas de programa;

O – número do programa (com até 4 dígitos);

S – rotação do fuso;

E – ponto zero da peça;

H – comprimento da ferramenta;

D – diâmetro da ferramenta;

F – velocidade de avanço [mm/min];

Q – passo em ciclos fixos.

iii) Códigos M básicos:

M00 – parada do programa (fica aguardando pressionar START para continuar);

M01 – parada condicional do programa;

M02 – fim do programa;

M03 – aciona fuso no sentido horário;

M04 – aciona fuso no sentido anti-horário;

M05 – desliga o fuso;

M06T – troca a ferramenta em uso pela especificada;

M08 – aciona fluido refrigerante de usinagem;

M09 – desliga fluido refrigerante de usinagem.

Assim, podemos definir os códigos G básicos da seguinte maneira:

a) Código básico G00 – avanço rápido: é o código utilizado para posicionar a ferramenta com os eixos se movimentando na maior velocidade possível da máquina. Quando se aplica este código de comando, primeiro é o eixo Z a se movimentar, posteriormente movimentam-se os eixos X e Y juntos a 45 °, até um dos eixos alcançar seu objetivo; o restante segue seu caminho sozinho. A forma de escrever a linha do comando G0 é: "G0 X_ Y_ Z_". Observe que há um espaço entre cada código.

b) Código básico G01 – avanço linear: este código é utilizado para movimentar a ferramenta com a velocidade de avanço regida pelo parâmetro F, sendo que todos os eixos movem-se conjuntamente. A forma de escrever a linha do comando G01 é: "G01 X_ Y_ Z_ F_". Observe que aqui há também um espaço entre cada código.

Códigos em G02 e G03 em torneamento e fresamento

Na linguagem de programação que utiliza códigos G temos também dois comandos muito importantes e fundamentais: a interpolação circular horária com definição de raio (G02) e a interpolação circular anti-horária (G03). O primeiro comando é aplicado para movimentar a ferramenta em um arco de circunferência no sentido horário; o segundo é similar ao primeiro, porém, só ocorre no sentido anti-horário.

A programação que faz uso dos códigos G para máquinas CNC envolve muitos detalhes que não abordaremos por completo nesta seção, pois exige um curso específico para tal. No entanto, para concluirmos essa etapa, vamos estudar dois conceitos importantes que facilitam a vida do programador. São eles: valor default e parâmetro modal.

a) Valor *default* é um valor que o comando assume quando nenhum outro valor lhe é atribuído na programação. Portanto, se nenhum valor é atribuído a um determinado parâmetro, a máquina utiliza o valor *default* (é um tipo de valor padrão).

b) O parâmetro modal é aquele que, quando definido, fica ativo até que outro o substitua. G0, G1, G2, G3, F, X, Y, Z, I, J, K são exemplos de parâmetros modais. Em uma sequência de linhas, se um determinado valor não muda, não há necessidade de digitá-lo novamente, tornando a programação mais rápida e ocupando menor espaço na memória do CNC da máquina.



Refleta

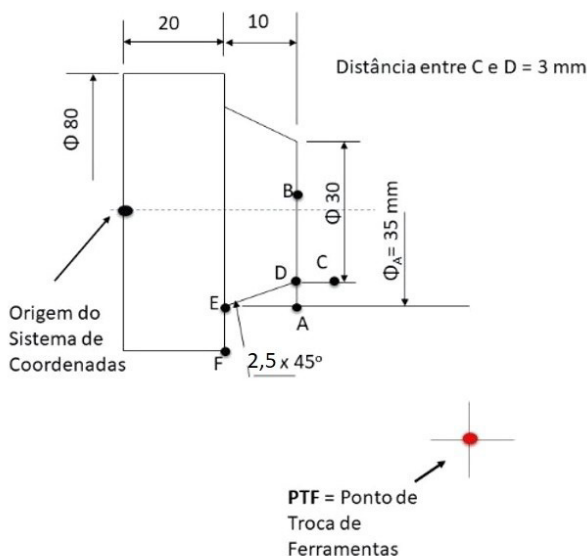
No que diz respeito a aspectos tecnológicos, não há dúvidas de que as máquinas CNC revolucionaram todos os processos de usinagem em rapidez, qualidade, nível de complexidade, custos e muito mais. Mas no aspecto humano, você acha que a tecnologia CNC tornou obsoletas várias ocupações e profissões que tendem a desaparecer? Há alguma alternativa para reverter essa tendência?

Sem medo de errar

Prezado aluno, estamos estudando os principais conceitos de programação para máquinas CNC, a fim de utilizar os sistemas de coordenadas absoluta e incremental para orientar a ferramenta na usinagem da peça.

Relembrando o contexto desta seção, você foi contratado para trabalhar na área de usinagem CNC, e explorando ao máximo sua criatividade e curiosidade, você deve fazer a capacitação dos funcionários, visando entender o movimento das ferramentas durante o processo de usinagem, usando como exemplo a peça ilustrada na Figura 4.9 e indicando na tabela anexa as posições ocupadas pela ferramenta.

Figura 4.9 | Peça a ser usinada por CNC



Fonte: <<http://www.adilsonrusteiko.com/tornocnc1.html>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

A origem do sistema de coordenadas está indicada na extremidade esquerda da peça. Logo, todas as coordenadas dos pontos devem ser referenciadas em relação a essa origem indicada, ou seja, trabalharemos com coordenadas absolutas.

Inicialmente, a ferramenta está estacionada no ponto de troca de ferramenta (PTF). A ferramenta deve se mover segundo a sequência dos pontos: A – B – C – D – E – F – PTF.

Outro detalhe importante é que o ponto de referência do PTF é uma informação que você já possui ou é uma posição que você adota, porém, sempre preocupado em colocá-lo em uma posição que não gere nenhuma colisão interna da ferramenta com a máquina. Neste caso, vamos adotar o ponto de partida do PTF como sendo $(x, z) = (200,00; 150,00)$, que é um ponto fictício. Note que poderíamos adotar um outro ponto qualquer.

Sendo assim, do PTF ao ponto A, temos que: $(x, z)_A = (35,00; 30,00)$, em que 35 é o diâmetro da peça e 30 a distância longitudinal da origem ao ponto A, ou seja, $(20 + 10) = 30$.

Do ponto A ao ponto B, temos que: $(x,z)_B = (1,00;30,00)$. Aqui há uma dica prática: o valor de $x = 1,00$ é adotado para evitar possível rebarba na região central da peça, assim desloca-se o ponto B a **0.50mm** acima da linha do eixo principal (como cotamos o raio, o valor fica **1,00mm**).

Do ponto B ao ponto C, temos que: $(x,z)_C = (30,00;33,00)$. Note no desenho que há a informação de que $\overline{CD} = 3.00mm$.

Do ponto C ao ponto D, temos que: $(x,z)_D = (30,00;30,00)$.

Do ponto D ao ponto E, temos que: $(x,z)_E = (35,00;20,00)$.

Do ponto E para o ponto F, temos que: $(x,z)_F = (80,00;20,00)$.

Do ponto F para o ponto PTF, temos que: $(x,z)_{PTF} = (200,00;150,00)$.

Logo, a tabela de valores para (x,z) fica preenchida como mostra a Tabela 4.4:

Tabela 4.4 | Valores de deslocamento da ferramenta de usinagem

Partida	Chegada	x (diâmetro)	z (comprimento)
PTF	A	35,00	30,00
A	B	1,00	30,00
B	C	30,00	33,00
C	D	30,00	30,00
D	E	35,00	20,00
E	F	80,00	20,00
F	PTF	200,00	150,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Com isso, concluímos a tarefa de capacitação dos funcionários para usinagem CNC, trabalhando com coordenadas para torneamento. Fica aqui um questionamento para ser resolvido em uma outra oportunidade de estudo: e se a origem fosse adotada como sendo a outra extremidade da peça, como ficariam os valores da nossa tabela?

Concluída sua tarefa, você pode notar que todos os conhecimentos

adquiridos nesta seção foram aplicados e cabe agora a você apresentar esses resultados ao seu chefe imediato, a partir de um memorial de cálculo.

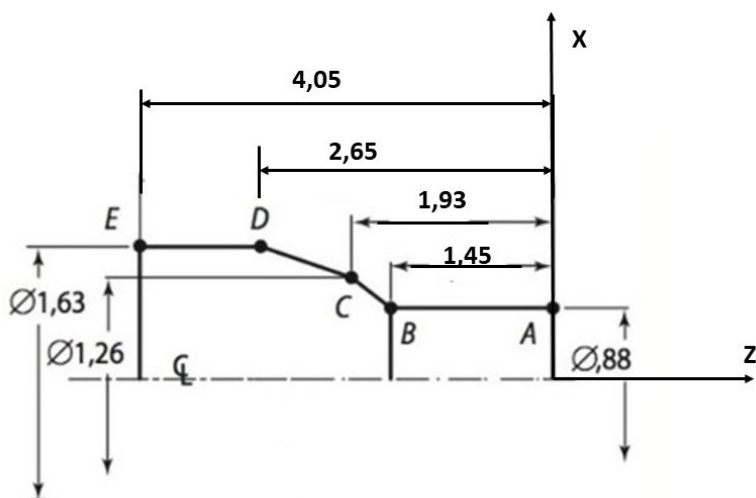
Avançando na prática

Coordenadas absolutas para usinagem de um eixo em torno CNC

Descrição da situação-problema

Considere o perfil do eixo a ser usinado por torneamento, conforme mostra a Figura 4.17 a seguir. Como você está capacitando seus subordinados a elaborarem planilhas de coordenadas absolutas para fins de usinagem CNC, você deverá especificar as coordenadas absolutas dos pontos indicados na figura, seguindo as orientações dos eixos (Z, X)).

Figura 4.17 | Semiperfil de eixo a ser usinado por torneamento CNC



Fonte: adaptada de Fitzpatrick (2013, p. 25).

Resolução da situação-problema

Temos na Figura 4.17 um desenho esquemático do meio perfil do eixo a ser usinado, que apresenta também a posição do sistema de coordenadas (Z, X).

Lembrando ainda que, para usinarmos um eixo, a coordenada X é referenciada como sendo o valor do diâmetro do eixo a ser usinado, podemos escrever as coordenadas (z, x) dos pontos A, B, C, D e E, segundo a Tabela 4.5 a seguir:

Tabela 4.5 | Valores das coordenadas (z,x) para o semiperfil do eixo da Figura 4.18

Ponto	Z	X
A	0,000	0,880
B	-1,450	0,880
C	-1,930	1,260
D	-2,650	1,630
E	-4,050	1,630

Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, finalizamos o nosso novo problema, com a tabela de valores das coordenadas (z, x) preenchida completamente para fins de usinagem do eixo apresentado na Figura 4.18.

Faça valer a pena

1. Na usinagem CNC um dos itens mais importantes a ser considerado é o sistema de referência de coordenadas, pois é com base nele que a ferramenta executa as operações delegadas a ela pelos comandos. A partir dessa afirmação, seguem as assertivas:
- I. Coordenadas absolutas utilizam valores com base na origem do sistema de eixos.
 - II. Coordenadas incrementais são aquelas baseadas em uma entrada imediatamente anterior.
 - III. Valor *default* é um valor que o comando assume quando nenhum outro valor lhe é atribuído na programação.
 - IV. O parâmetro modal é aquele que quando definido fica inativo até que outro o substitua.

A partir das assertivas apresentadas no texto-base, podemos classificá-las quanto a verdadeiras (V) ou falsas (F) segundo a seguinte sequência:

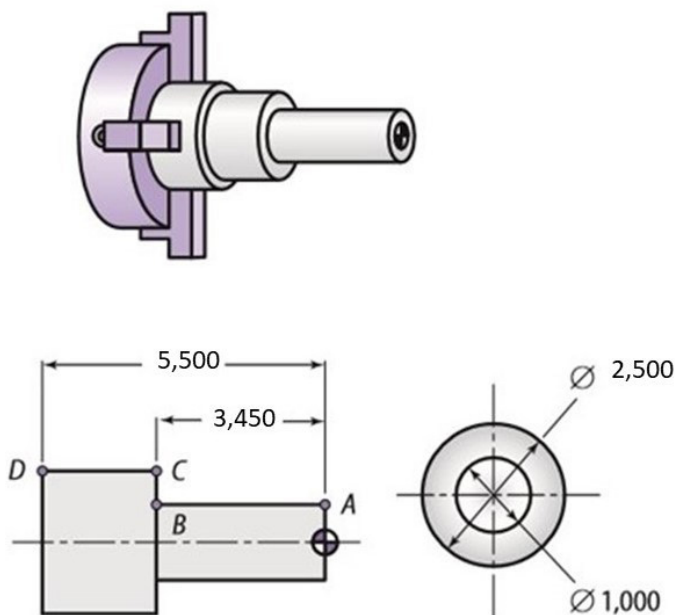
- a) V – V – F – F.
- b) F – V – V – V.
- c) V – V – V – F.

d) V – F – V – F.

e) F – F – V – V.

2. Na programação de um torno CNC, a peça é vista no plano XZ – de cima. Lembrando também que no torneamento cilíndrico, a coordenada de X equivale ao diâmetro usinado. Sabe-se que, para a usinagem da peça, o ponto A tem coordenadas X = 1,000 e Z = 0,000, como mostra a figura abaixo.

Figura | Peça cilíndrica usinada e suas coordenadas



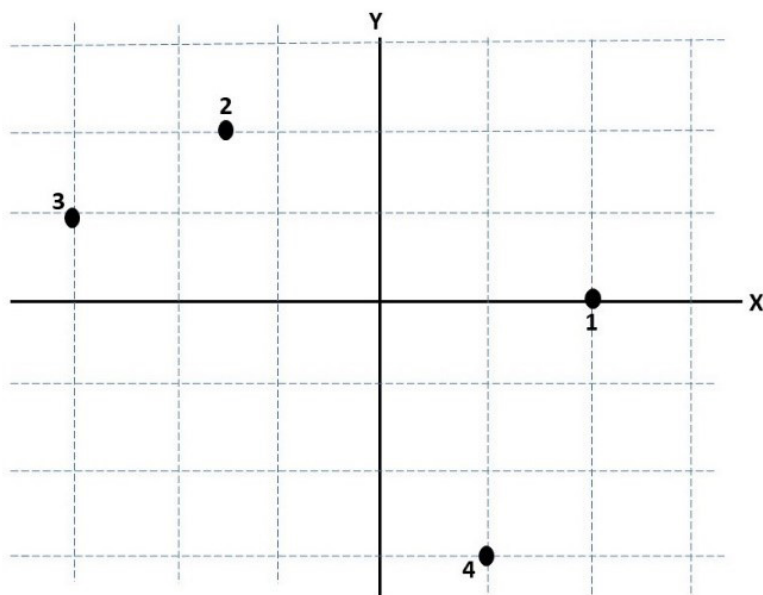
Fonte: adaptada de Fitzpatrick (2013, p. 16).

Com base na figura apresentada, que apresenta a usinagem cilíndrica a ser realizada, qual das alternativas a seguir representa as coordenadas absolutas para os pontos B, C e D?

- a) B (1,000, 0,000); C (2,500, - 3,450); D (2,500, - 5,500).
- b) B (1,000, 3,450); C (2,500, 3,450); D (5,500, 2,500).
- c) B (3,450, 1,000); C (3,450, 2,500); D (2,500, -5,500).
- d) B (1,000, - 3,450); C (2,500, - 3,450); D (2,500, - 5,500).
- e) B (1,000, - 3,450); C (2,500, - 3,450); D (5,500, - 2,500).

3. Na programação para CNC a orientação para os movimentos da ferramenta pode ser com base em coordenadas absolutas ou em coordenadas incrementais. No segundo modelo, o valor do eixo, positivo ou negativo, descreve a direção em que o movimento da ferramenta deve ser feito a partir da posição atual para a próxima. A posição central inicial – ponto zero - não é, necessariamente, o centro do sistema de coordenadas, mas sim a posição inicial da ferramenta, como o ponto 1 no sistema de coordenadas da figura a seguir, onde temos $x = 2,000$ e $y = 0,000$ como origem (posição inicial da ferramenta).

Figura | Sistema de coordenadas incrementais



Fonte: adaptada de Fitzpatrick (2013, p. 19).

Considerando o ponto 1 como a posição inicial da ferramenta, qual das alternativas a seguir nos mostra as coordenadas incrementais corretas dos pontos 2, 3 e 4?

- a) (- 3.500, 2.000); (- 1.500, - 1.000); (4.000, - 4.000).
- b) (- 1.500, 1.500); (- 3.000, 1.000); (1.000, - 3.000).
- c) (3.500, - 2.000); (1.500, 1.000); (- 4.000, 4.000).
- d) (- 3.500, 2.000); (- 1.500, - 1.000); (1.000, - 4.000).
- e) (- 1.500, 2.000); (- 1.500, - 1.000); (4.000, - 4.000).

Seção 4.3

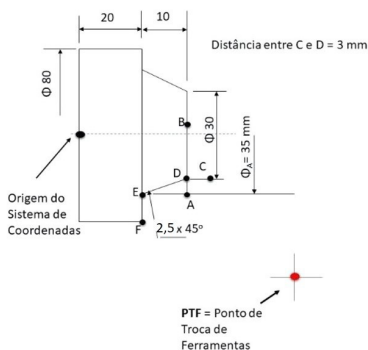
Conceitos básicos de CAD/CAM aplicados à usinagem.

Diálogo aberto

Prezado aluno, estamos na última parte do material da nossa disciplina, na qual estudaremos conceitos de CAD/CAM e os aplicaremos na solução da problematização proposta. Veremos aqui a importância da computação gráfica no auxílio aos processos de manufatura mecânica. Tal tecnologia expandiu-se não somente na indústria mecânica, mas também em diversos segmentos, tais como na área de design de ambientes, paisagismo e na arquitetura em geral.

A empresa em que você, aluno, foi contratado, está atualizando seu parque manufatureiro, visando otimizar o tempo de fabricação de protótipos para novos produtos (peças), assim, temos que você foi incumbido de desenvolver, usando sua criatividade e curiosidade, um setor de prototipagem rápida aplicando conceitos de CAD/CAM visualizando uma peça a ser usinada em 3D. Como primeira tarefa, você vai realizar uma análise dos processos de prototipagem rápida disponíveis para a peça apresentada na Figura 4.9. Você deverá elaborar, inicialmente de forma simplificada, um Plano de Processo que mostre, no seu relatório técnico, todas informações necessárias para transformar o desenho da peça em produto final.

Figura 4.9 | Peça a ser usinada por CNC



Fonte: <<http://www.adilsonrusteiko.com/tornocnc1.html/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

Ao concluir a resolução desse problema, ela deverá ser entregue na forma de um relatório para a sua gerência que o incumbiu de desenvolver o setor de prototipagem.

Lembre-se, finalmente, de que ao concluir esta problematização, você deve refletir sobre as seguintes questões: o sistema CAD/CAM é o modelo mais vantajoso para a implantação de um setor de prototipagem? Qual software disponível no mercado é o mais adequado para um setor de prototipagem?

Note que todos os conceitos abordados nesta seção, aliados aos que você já aprendeu nas seções anteriores, são de fundamental importância para a solução desta problematização. Tenha em mente que o conhecimento das etapas que envolvem a manufatura de uma peça, que deve ser traduzida para softwares focados em CAD/CAM, é indispensável para o profissional que atua na área de usinagem nos dias atuais.

Bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno, chegamos à última seção do nosso material do curso de Manufatura Mecânica: Usinagem. Nesta seção, estudaremos o uso de tecnologias de fabricação CAD/CAM associadas aos processos de usinagem. Veremos também alguns modelos de softwares mais utilizados nas indústrias. Você terá a oportunidade de conhecer técnicas de modelagem por computador em duas e em três dimensões a fim de verificar como elas auxiliam (e facilitam) a usinagem de peças em máquinas CNC. Finalmente, com sua curiosidade e criatividade, você vai simular operações de usinagem em CNC observando a integração de sistemas CAD/CAM.

Vamos aos estudos!

Conceitos Básicos de CAD/CAM: Benefícios das tecnologias CAD/CAM e hardwares e softwares para CAD/CAM.

As siglas CAD e CAM têm origem nos termos em inglês: CAD – Computer Aided Design e CAM – *Computer Aided Manufacturing*, ou seja, na nossa língua portuguesa são traduzidos como, respectivamente, Desenho Assistido (ou Auxiliado) por Computador e Manufatura Assistida (ou Auxiliada) por Computador.

Podemos ver que tanto o CAD como o CAM são ferramentas

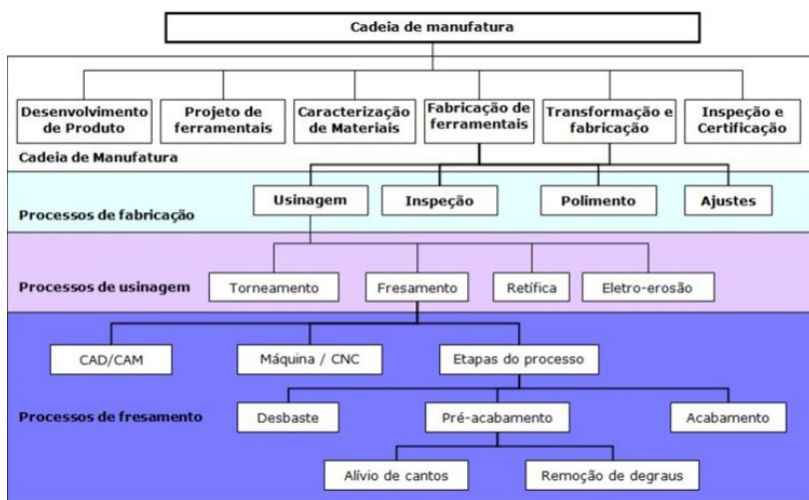
extremamente importantes para os processos de usinagem, pois, enquanto os desenhos das peças são elaborados através do CAD com mais facilidade por softwares específicos, o CAM auxilia na manufatura dessa mesma peça, integrando-se às máquinas CNC.

Os sistemas CAM são amplamente aplicados às operações de usinagem, que envolvem torneamento, fresamento, furação, retificação, e à usinagem por processos não convencionais (tal como a eletroerosão).

Por permitir e ser a mais indicada para peças com formatos mais complexos, o sistema CAM é muito utilizado em operações de fresamento.

A Figura 4.18 a seguir mostra, dentro da complexa relação da cadeia de manufatura, o papel dos processos de usinagem e das ferramentas CAD/CAM.

Figura 4.18 | O papel da usinagem na cadeia manufatureira envolvendo CAD/CAM



Fonte: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2777593/mod_resource/content/1/Te%C3%B3rica%20%20-%20CAM.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2017.

As principais funções do CAM, segundo Rodrigues (s/d), são:

- Calcular as trajetórias de movimentação da ferramenta;
- Simular a usinagem e;
- Gerar os programas CNC.

Porém, segundo Fitzpatrick (2013), é preciso também obter um padrão de peça, ou seja, desenhar seu próprio modelo em wireframe ou sólido.

Para CAM, temos o programa Mastercam (MC-X), o Solidworks, dentre outros, para modelar por CAD a peça conforme destacou Fitzpatrick (2013). Esses são apenas dois exemplos de softwares muito utilizados em empresas, lembrando que seu uso adequado depende de um bom treinamento e estudo individual.

Há ainda os programas para CAD, tais como os conhecidos CATIA, AutoDesk Inventor ou Kubotech. Com qualquer um desses programas, você poderá criar e desenvolver a geometria de uma peça a ser usinada em uma máquina CNC.

Segundo Souza e Coelho (2003), os softwares para CAD obedecem a seguinte classificação:

a) Sistemas CAD de pequeno porte (Low-end): sistemas simples, que usam representações em duas dimensões (2D).

b) Sistemas CAD de médio porte (Middle-end): capazes de representar objetos tridimensionais (3D) com possibilidade de comunicação com outros sistemas.

c) Sistemas CAD de grande porte (High-end): possuem todas as funções dos sistemas anteriores além de algumas outras e que, ainda permitem integração completa com todos os sistemas CAM, CAD, CAE (Engenharia Auxiliada por Computador) etc.

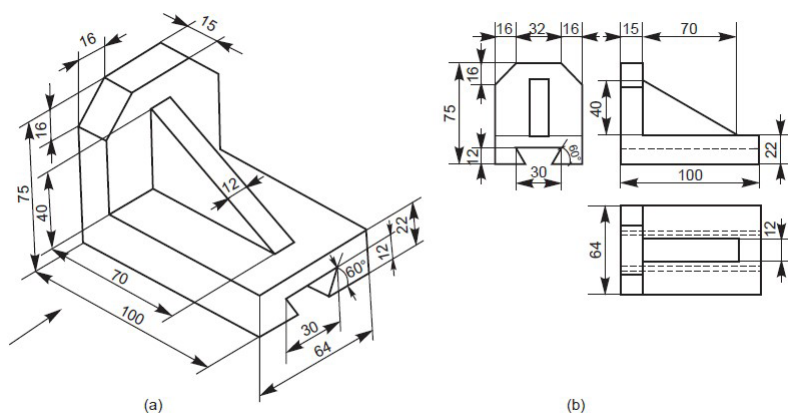
Importância da computação gráfica e modelagem 2D e 3D

Antes do uso abrangente da informática, com o objetivo de auxiliar nos processos de fabricação, o desenho realizado à mão em prancheta de desenho técnico mecânico era o elemento fundamental para a usinagem de qualquer peça, pois era no papel de desenho, a partir da utilização de uma escala adequada, que todas as dimensões (cotas) e indicações de acabamento eram fornecidas ao operador da máquina.

O desenho detalhado da peça continua sendo fundamental para sua fabricação adequada, porém, esse desenho é realizado em computadores através da utilização de programas de computação gráfica, que permitem maior rapidez no processo de desenho da peça e, além disso, apresentam maior facilidade de ajustes e alterações, caso sejam necessárias.

A modelagem da peça, seja em 2D ou em 3D, dá a noção perfeita de como será o produto final em termos de geometria e de acabamento final. Atualmente, com o advento das impressoras 3D, não só o desenho, mas o protótipo impresso da peça a ser usinada pode ser obtido com antecedência, permitindo simular sua fabricação, seu comportamento (desempenho) e realizar todos os ajustes que se façam necessários antes da fabricação, diminuindo (ou até eliminando) etapas, antes indispensáveis ao projeto da peça, diminuindo custos e melhorando a qualidade da peça final em produção. A Figura 4.19 a seguir ilustra um desenho de uma peça vista em 3D (em perspectiva) e em 2D, a partir de suas três projeções ortogonais.

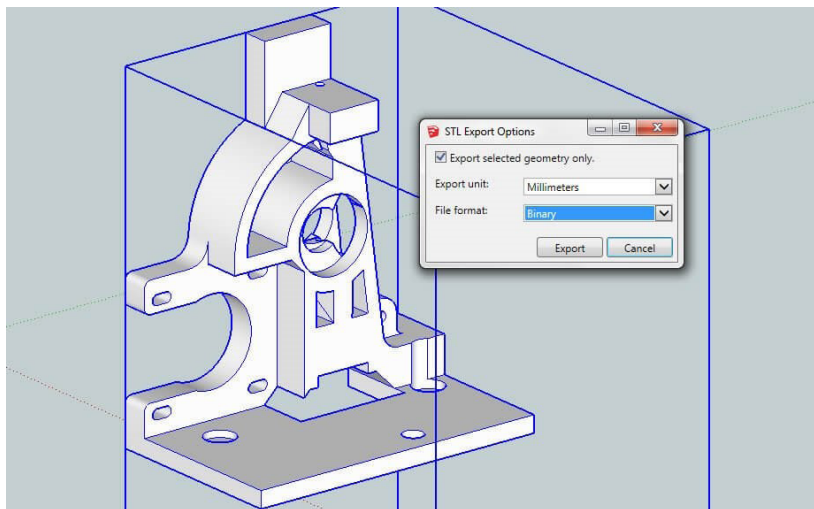
Figura 4.19 | Desenho técnico mecânico de uma peça: (a) em 3D (perspectiva) e; (b) em 2D (projeções ortogonais)



Fonte: <<https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/pictures/files/14784/original.PNG?1348849195>> Acesso em: 21 dez. 2017.

Na Figura 4.20 a seguir, temos um exemplo de uma peça finalizada em 3D, que se encontra pronta para ser construída (na forma de um protótipo impresso) em uma impressora 3D.

Figura 4.20 | Exemplo de uma peça desenhada em 3D para impressão de protótipo em impressora 3D



Fonte: <<http://www.impressao3dfacil.com.br/wp-content/uploads/2015/10/exportstl.jpg>>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Refleta

A impressão de peças em impressoras 3D trouxe um elemento extraordinário no projeto de peças e em sua fabricação. Embora a impressão dependa muito do material no qual é fabricada a peça, você consegue visualizar um futuro não muito distante no qual peças metálicas (atualmente usinadas em máquinas CNC) serão obtidas diretamente em impressoras 3D, com um custo adequado para o mercado? Será isso possível ou será ficção científica?

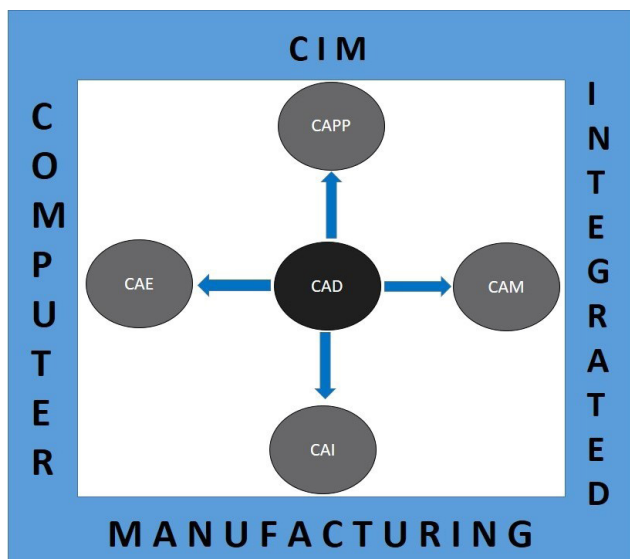
Ressalta-se aqui que as vantagens em se utilizar da tecnologia das máquinas CNC são consideráveis, pois, como já vimos, o uso dessas máquinas permite maior velocidade de usinagem, maior flexibilidade ferramental e melhor qualidade em termos dimensionais e de acabamento; o fato é que tais vantagens só se aplicam a partir de uma peça de protótipo (ou de modelo) usinada, visando a serialização de produção peças.

Sistemas de CAD/CAM isolados e integrados.

O uso isolado de um sistema CAD ou de um sistema CAM é possível

e, em muitos casos, é uma realidade no âmbito industrial. Porém, esses dois sistemas são mais produtivos quando operam em conjunto, de forma integrada, não só entre eles mesmos, mas com outras ferramentas tais como CAI (Inspeção Auxiliada por Computador), CAPP (Planejamento de Processos Auxiliado por Computador) e CAE (Análise de Engenharia Auxiliada por Computador), como mostra a Figura 4.21 a seguir.

Figura 4.21 | Integração entre os sistemas CAD/CAM e outros sistemas



Fonte: adaptada de Souza e Coelho (2003, p. 2).

A integração entre todos os sistemas indicados na Figura 4.21 resultam no CIM (Manufatura Integrada por Computador). Note que o centro de toda essa integração é o sistema CAD.



Assimile

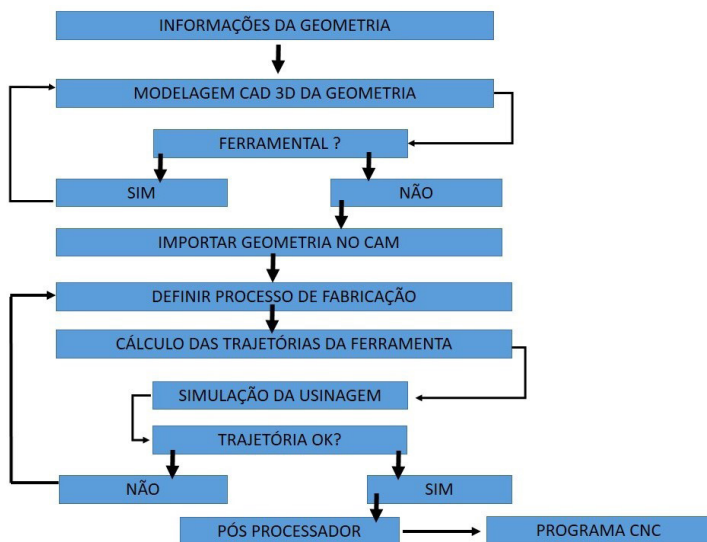
Caro aluno, temos que CAD e CAM não são programas computacionais, são plataformas de desenho e de fabricação de peças. Na prática, existem programas específicos que se aplicam a plataformas CAD e programas específicos que se aplicam a plataformas CAM. Finalizando, as duas plataformas podem (e preferencialmente devem) trabalhar de forma integrada entre si e entre outros sistemas.

Uma constatação interessante é abordada por Figueiredo e Romeiro Filho (2010). Segundo eles, atualmente, os sistemas CAD atuam menos como ferramentas de projeto e mais como elementos de integração das diferentes áreas de uma ou de várias empresas. Isso está relacionado à conhecida “engenharia simultânea”, mas isso é um assunto para ativar ainda mais sua curiosidade.

Simulação de Programas em Máquinas CNC

A obtenção de uma peça a ser usinada em máquina CNC passa por etapas fundamentais que envolvem os seguintes passos, conforme ilustra o diagrama de blocos apresentado na Figura 4.22 a seguir.

Figura 4.22 | Metodologia de trabalho geral empregando tecnologia CAM



Fonte: adaptada de <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2777593/mod_resource/content/1/Te%C3%B3rica%202%20-%20CAM.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2017.

Os principais objetivos de uma simulação de usinagem são as seguintes, segundo Rodrigues (s/d):

- Verificar a ocorrência de desvios indesejáveis na geometria da peça.
- Verificar a adequação das trajetórias calculadas pelo CAM.
- Simular a colisão do porta-ferramenta com a peça.
- Simular colisões com a fixação da peça na máquina.

- Simular o processo de usinagem, segundo os eixos da máquina.

Ainda de acordo com Rodrigues (s/d), para a realização de um processo de usinagem eficiente via CAM, são necessários os seguintes passos:

- I. Escolher as ferramentas adequadas para cada processo.
- II. Caracterizar as propriedades do material da peça.
- III. Definir os processos (desbaste, acabamento, etc.).
- IV. Identificar os parâmetros de corte em função da peça, da ferramenta, da qualidade dimensional e da rugosidade esperada.
- V. Definir estratégias de usinagem.
- VI. Definir pontos de entradas e saídas da ferramenta.
- VII. Otimizar as movimentações da ferramenta.
- VIII. Realizar simulação e geração dos códigos do programa CNC.
- IX. Conhecer as características da máquina (potência, rotação, etc.).



Pesquise mais

Para realizar a simulação da usinagem de alguma peça, faça o download do software CNC Simulator Pro em <www.cncsimulator.com> (acesso em: 21 dez. 2017) e obtenha uma licença provisória *free* para conhecer um pouco dos recursos deste programa. Vale a pena conferir! Assista também ao vídeo <<https://www.youtube.com/user/CncSimulatorCom/>> (acesso em: 28 dez. 2017), que mostra os recursos desse *software*.

O cálculo da trajetória da ferramenta é uma das funções mais importantes de um programa CAM, pois a qualidade do produto final depende da trajetória calculada previamente.

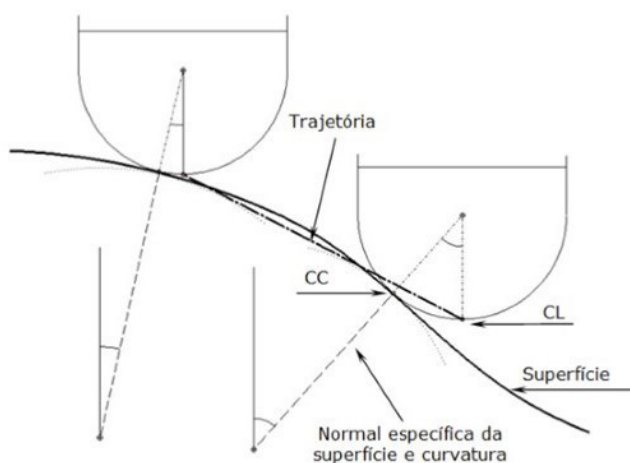
Dentre os fatores que são afetados pela trajetória da ferramenta, estão o acabamento da peça, os desvios dimensionais e o tempo de usinagem.

O cálculo da trajetória envolve algoritmos complexos que fazem interpolação linear e circular para determinar o trajeto em superfícies da peça. Segundo Rodrigues (s/d), o comprimento dos segmentos interpolados depende das tolerâncias de cálculo do CAM e do grau de curvatura da superfície.

Quanto mais apertada (rígida) é a tolerância, mais próxima estará a ferramenta da geometria do CAD, um maior volume de dados será enviado para o CNC, as retas interpoladas terão segmentos menores e, por sua vez, a velocidade de avanço a ser utilizada será limitada.

No cálculo da trajetória da ferramenta, o sistema CAM identifica dois pontos: o ponto CC chamado de cutter contact (ponto efetivo de corte que representa o contato da ferramenta com o ponto de corte) e o ponto CL chamado de cutter location (que representa a trajetória idealizada ou de rotina do CNC). Para melhor compreensão desses pontos, observe a Figura 4.23. Os CCs são determinados em uma primeira etapa e depois são calculados os CLs consecutivos, responsáveis por gerar a trajetória da ferramenta. Observe a Figura 4.23 para visualizar a posição desses pontos.

Figura 4.23 | Pontos CC e CL na determinação da trajetória da ferramenta usando o sistema CAM



Fonte: adaptada de Rodrigues, A.R. (s/d).

Para finalizarmos esta seção, vamos ver um exemplo prático dos conteúdos que estudamos.

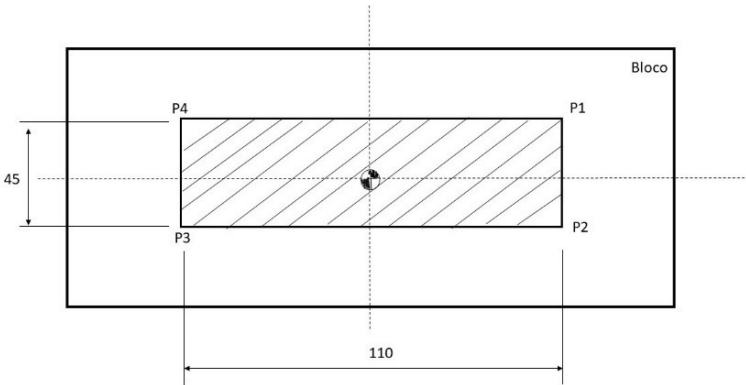


Exemplificando

Na simulação de um fresamento, usando uma fresa de topo para usinar a região indicada (hachurada) na Figura 4.24 a seguir, indique para o sistema CNC as coordenadas absolutas (x,y) para o movimento

(trajetória limite) da ferramenta, segundo os pontos **P1**, **P2**, **P3** e **P4** indicados no desenho. Considere o ponto zero da peça como a região central do bloco.

Figura 4.24 | Desenho técnico mecânico do bloco metálico



Fonte: elaborada pelo autor.

Solução:

Os pontos limite de deslocamento da ferramenta são representados pelos pontos **P1**, **P2**, **P3** e **P4**, tal que, considerando um sistema de coordenadas (X,Y) para orientação do movimento da ferramenta, teremos os seguintes valores, segundo a Tabela 4.6 a seguir:

Tabela 4.6 | Coordenadas absolutas dos pontos **P1**, **P2**, **P3** e **P4** para fins de deslocamento da fresa

Ponto	X	Y
P1	55.00	22.50
P2	55.00	-22.50
P3	-55.00	-22.50
P4	-55.00	22.50

Fonte: elaborada pelo autor.

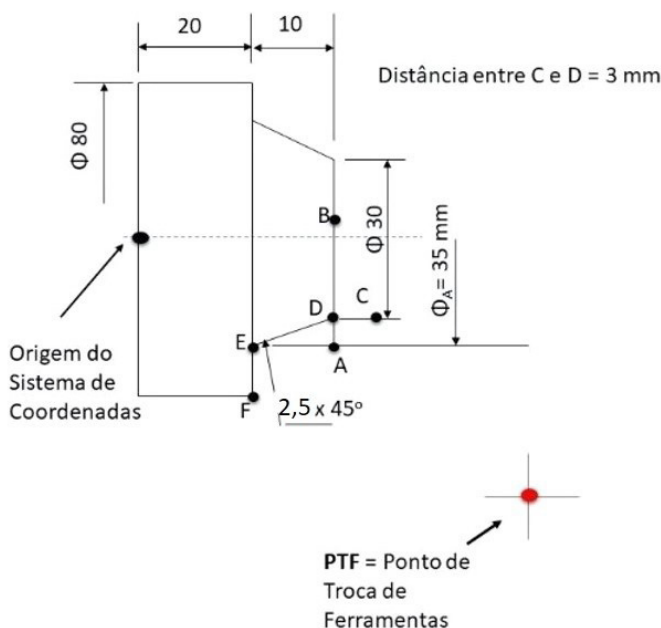
Assim, a trajetória da ferramenta obedecerá a sequência **P1 → P2 → P3 → P4 → P1**, gerando a cavidade limitada por esses quatro pontos, obedecendo os limites das coordenadas absolutas (x,y) de cada um dos pontos.

Sem medo de errar

Caro aluno, estamos na etapa final da nossa disciplina e estudamos conceitos de CAD/CAM aplicados à usinagem CNC. Você aplicará toda sua curiosidade e criatividade na solução deste problema, destrinchando cada etapa da solução, vislumbrando chegar ao resultado esperado pela sua gerência.

Relembrando o contexto dessa seção, lembre-se de que você, aluno, foi incumbido de desenvolver um setor de prototipagem rápida aplicando conceitos de CAD/CAM, a partir da visualização de uma peça a ser usinada em 3D. Você deverá elaborar, inicialmente de forma simplificada, um Plano de Processo que mostre todas informações necessárias para transformar o desenho da peça em produto final.

Figura 4.9 | Peça a ser usinada por CNC



Fonte: <<http://www.adilsonrusteiko.com/tornocnc1.html/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

Para transformar o desenho da peça em um produto final, utilizando uma simulação, você poderá utilizar um software CAD (Solidworks, por exemplo), porém, temos que esse não é objetivo desta seção. Assim, na resolução dessa problematização, você deverá descrever todas as etapas mínimas e necessárias para produzirmos a peça do desenho.

Vamos ao Plano de Processo do produto:

- i. um dado importante inicial refere-se às informações da geometria da peça: vemos que ela é cilíndrica, tem três dimensões diferentes de diâmetro do eixo (30, 35 e 80 mm) e; entre o eixo menor (30 mm) e o maior (80 mm) há uma inclinação indicada de 2,50x45o.
- ii. Na sequência, é realizado um modelo 3D, em CAD, da geometria da peça.
- iii. A seguir, deve-se verificar a necessidade ou não de um molde ou matriz para produção da peça. No nosso caso, o eixo não precisa de um molde, pois deverá ser obtido por torneamento.
- iv. Agora, é preciso importar o modelo geométrico da peça (item ii) para o CAM.
- v. Deve-se, então, definir o processo de fabricação: já havíamos antecipado que seria torneamento, mas junto com essa informação, devem ser definidos também: as operações de desbaste e acabamento, as ferramentas a serem utilizadas, os parâmetros de corte a serem aplicados, as estratégias de usinagem e as limitações da região a ser usinada na peça base.
- vi. A partir disso, deve-se definir o PTF (ponto de troca de ferramenta) e realizar os cálculos das trajetórias das ferramentas que serão utilizadas nos processos.
- vii. O passo seguinte é simular a usinagem para verificação de possíveis colisões, a fim de ajustar as trajetórias das ferramentas que foram calculadas para evitar colisões indesejadas.
- viii. No último passo do plano de processo, temos a fase de pós-processador e, finalmente, elabora-se o programa CNC para a obtenção da peça final.

Dessa forma, caro aluno, você relacionou de forma simplificada, todas as etapas para transformar o desenho da peça em um

produto final. Observe que todos os conhecimentos apresentados nesta seção (e também nas anteriores) foram importantes para a resolução deste problema.

Finalmente, após a conclusão da resolução do problema proposto, você deve elaborar um relatório sobre o Plano de Processo realizado, a fim de entregá-lo a sua chefia imediata.

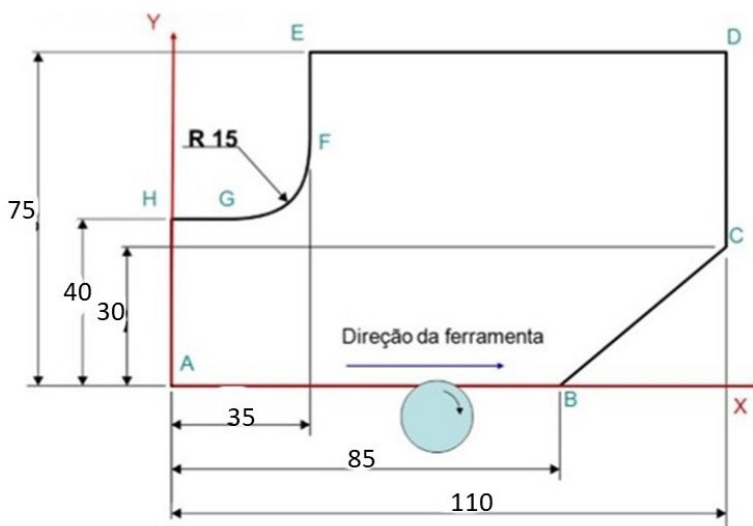
Avançando na prática

Simulação do processo de fresamento em uma máquina CNC

Descrição da situação-problema

Caro aluno, você vai usar uma peça em uma máquina CNC a partir do processo de fresamento e para isso, previamente, você deverá fazer uma simulação da usinagem, estabelecendo a trajetória da ferramenta e anotando em uma tabela suas coordenadas e o movimento específico que será realizado pelas ferramentas. A peça a ser usinada é apresentada na Figura 4.25 a seguir. Adote o ponto A como ponto de início do processo de usinagem.

Figura 4.25 | Desenho esquemático da peça a ser usinada (fresada) em uma máquina CNC



Resolução da situação-problema

Adotando o ponto A como ponto de início do processo de usinagem, temos que a trajetória da ferramenta deverá obedecer à sequência de pontos: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow A$.

Para que isso ocorra, a simulação deve prever para o CNC as seguintes coordenadas absolutas e as respectivas operações (ou movimentos), mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 | Descritivo das coordenadas e dos movimentos da ferramenta segundo a trajetória estabelecida

Ponto	X	Y	R	Observação
A	0.0	0.0		Ponto de partida (origem) – início do ciclo (da trajetória)
B	85.0	0		Início do chanfro
C	110.0	30.0		Final do chanfro
D	110.0	75.0		Canto superior direito
E	35.0	75.0		Final do segmento DE
F	35.0	55.0		Início do raio de 15 mm
G	20.0	40.0	15.0	Final do raio de 15 mm
H	0.0	40.0		
A	0.0	0.0		Ponto de chegada – final do ciclo (trajetória)

Fonte: elaborada pelo autor.

No lançamento dos valores apresentados na Tabela 4.7, dois pontos merecem atenção, a fim de evitar erros:

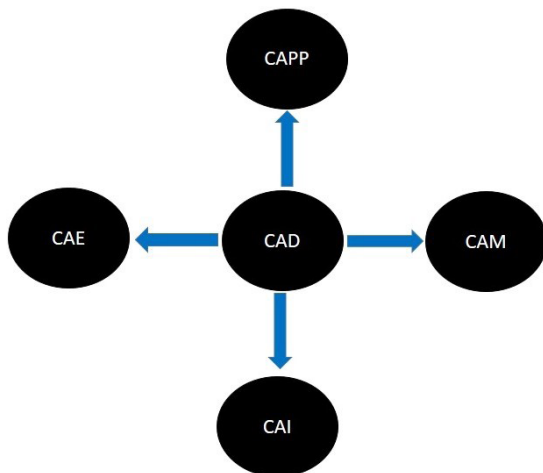
- Ponto F: as coordenadas do ponto F são tais que $x_F = 35mm$ e $y_F = 40 + R15 = 40 + 15 = 55mm$.
- Ponto G: final da curvatura de R15, daí $x_G = 35 - R15 = 35 - 15 = 20mm$ e $y_G = 40mm$.

Portanto, temos que você conseguiu descrever com êxito a trajetória da ferramenta (fresa) ao longo do percurso no perfil da peça, indicando as coordenadas dos pontos limites e os movimentos (operações) da fresa.

Faça valer a pena

1. Tem-se que a manufatura moderna faz uso de uma série de ferramentas associadas aos computadores que geraram uma série de modelos de plataformas que conhecemos como CAD, CAM, CAE, CAI e CAPP que, por sua vez estão integrados de forma interdependente, como ilustra o esquema da figura abaixo.

Figura | Interligação entre os sistemas de produção



Fonte: adaptada de Souza e Coelho (2003, p. 2).

Todos os sistemas integrados da figura fazem parte de um modelo de manufatura mais amplo, que engloba todos os sistemas. Assinale a alternativa que contempla a sigla e o significado desse modelo de manufatura.

- a) ISO – Sistema de Operações Integradas.
- b) PCP – Planejamento e Controle da Produção.
- c) BSC – *Balanced Score Card*.
- d) CIM – Manufatura Integrada por Computadores.
- e) PCM – Manufatura Controlada e Planejada.

2. Em relação à usinagem CNC, que trabalha com sistema CAD/CAM, seguem as afirmativas:

- I. As vantagens advindas da tecnologia das máquinas CNC são

consideráveis, pois permitem maior velocidade de usinagem, maior flexibilidade ferramental e melhor qualidade em termos dimensionais e de acabamento,

Porém,

- II. As vantagens observadas só se aplicam a partir de uma peça de protótipo (ou de modelo) usinada, visando a seriação da produção de peças.

Com base nas afirmativas (I) e (II) assinale a alternativa correta.

- a) As afirmativas (I) e (II) são verdadeiras, mas não se complementam.
- b) A afirmativa (I) é verdadeira, mas a afirmativa (II) é falsa.
- c) A afirmativa (I) é falsa, mas a afirmativa (II) é verdadeira.
- d) As afirmativas (I) e (II) são verdadeiras e a (II) complementa a (I).
- e) As afirmativas (I) e (II) são falsas.

3. As simulações de um processo de usinagem por CNC envolvem uma série de etapas que visam determinados objetivos, dentre os quais podemos citar:

- I - Verificar a ocorrência de desvios indesejáveis na geometria da peça.
- II - Verificar a adequação das trajetórias calculadas pelo CAM.
- III - Simular a colisão do porta-ferramenta com a peça.
- IV - Simular colisões com a fixação da peça na máquina.

Com base na sequência de valores lógicos V e F das afirmações anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

- a) I – V, II – V, III – V, IV – V.
- b) I – V, II – F, III – F, IV – V.
- c) I – F, II – V, III – V, IV – F.
- d) I – V, II – V, III – F, IV – F.
- e) I – F, II – F, III – F, IV – F.

Referências

- ADAMOWSKI, J. C. **Sistema de movimentação de uma máquina CNC**. EPUSP, 2005. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/PMR2450/aula4.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2017.
- CASSANIGA, F. A. **Dispositivos de fixação de peças para máquinas CNC**. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/43-dispositivos-de-fixacao-de-pecas-para-maquinas-cnc/pa-5/>>. Acesso em: 1 fev. 2018.
- CORRER, I. **Projeto e construção de um sistema de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser para uso em máquinas-ferramenta CNC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). UNIMEP, Santa Bárbara do Oeste – SP, 2006.
- CNC Simulator**. Disponível em <www.cncsimulator.com>. Acesso em: 21 dez. 2017.
- FIGUEIREDO, A. C.; ROMEIRO FILHO, E. **As práticas de sistemas CAD e sua contribuição**: um survey na indústria metal-mecânica mineira. Revista Produção, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/prod/2011nahead/AOP_200801002.pdf> Acesso em: 22 dez. 2017.
- FERRARI, C.D.; FERREIRA, M.A.C. **Implantação de um sistema de comando numérico computadorizado (CNC) por retrofitting em um torno mecânico universal**. FATEC: Catanduva-SP, (s/d), Disponível em: <http://ctd.ifsp.edu.br/~cristiano.ferrari/images/Arquivos/Artigo_Fatec.PDF>. Acesso em: 5 dez. 2017.
- FITZPATRICK, M. **Introdução à usinagem com CNC**. AMGH Editora, 2013.
- GRABCAD COMMUNITY**. Disponível em <<https://d2t1xqejoj9utc.cloudfront.net/pictures/files/14784/original.PNG?1348849195>>. Acesso em: 21 dez. 2017.
- IMPRESSÃO3DFACIL**. Disponível em <<http://www.impressao3dfacil.com.br/wp-content/uploads/2015/10/exportstl.jpg>>. Acesso em: 21 dez. 2018.
- MARCICANO, J. P. P. **Introdução ao controle numérico**. Poli-USP. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/cnc.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2017.
- POLLI, M. L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFSC: Florianópolis-SC, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102470/210330.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 8 dez. 2017.
- RODRIGUES, A. R. **Manufatura assistida por computador: sistemas CAM**. EESC-SEM-USP. Notas de aula. Disponível em: Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2777593/mod_resource/content/1/Te%C3%B3rica%20%20-%20CAM.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2017.
- SOUZA, A. F.; COELHO, R. T. **Tecnologia CAD/CAM** - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, Brasil, 21 a 24 de out de 2003.

Anotações

[illegible]

Anotações

[illegible]



ISBN 978-85-522-0737-5



9 788552 207375 >