



SEM0324 FABRICAÇÃO DE PRECISÃO

Mário Luiz Tronco
Renato Goulart Jazinevicius

Tecnologias de Microfabricação- Microeletrônica



Kalpakjian, S.; Schmid, S.; Manufacturing Engineering and Technology, Addison Wesley Publ. New York, 1148p. 4a. ed. (2000) – Capítulo 26

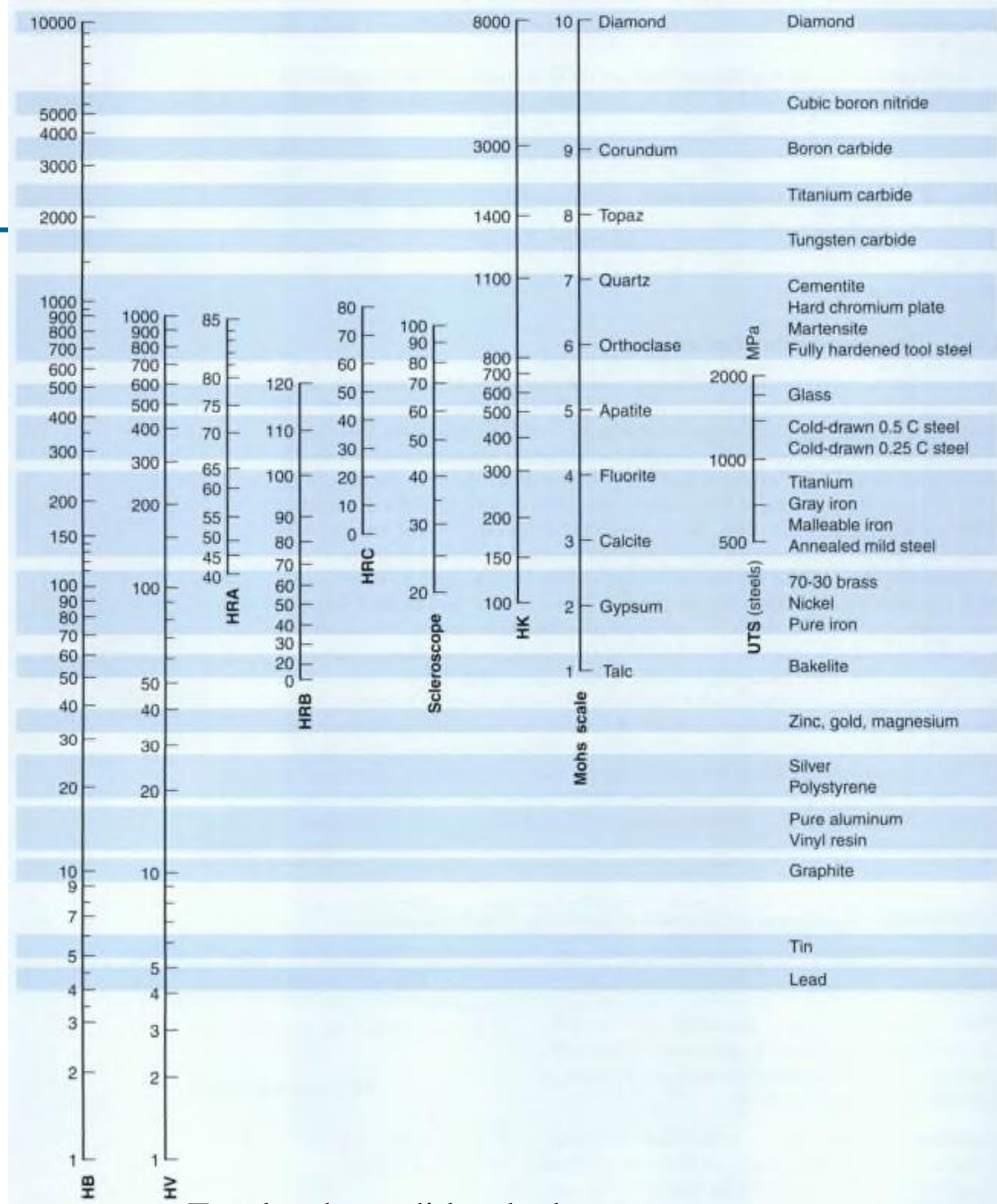
Advanced Machining Processes and Nanofabrication




Os processos de usinagem envolvem remoção de material por meios mecânicos de formação de cavacos, abrasão etc.

Existem situações, no entanto, em que os métodos mecânicos não são satisfatórios, econômicos ou até possíveis, pelos seguintes motivos:

- **A resistência e a dureza do material da peça são muito altas, geralmente acima de 400 HB (dureza *Brinell*)**



Escalas de medidas de dureza



Existem situações, no entanto, em que os métodos mecânicos não são satisfatórios, econômicos ou até possíveis, pelos seguintes motivos:

- **O material é muito quebradiço para ser usinado sem danificar a peça. Normalmente ligas tratadas termicamente, vidro, cerâmica e peças de metalurgia do pó.**



Os processos de usinagem envolvem remoção de material por meios mecânicos de formação de cavacos, abrasão etc.

Existem situações, no entanto, em que os métodos mecânicos não são satisfatórios, econômicos ou até possíveis, pelos seguintes motivos:

- **A peça de trabalho é muito flexível ou delgada para suportar as forças envolvidas na usinagem, ou as peças são difíceis de fixar nos dispositivos de fixação.**



Os processos de usinagem envolvem remoção de material por meios mecânicos de formação de cavacos, abrasão etc.

Existem situações, no entanto, em que os métodos mecânicos não são satisfatórios, econômicos ou até possíveis, pelos seguintes motivos:

- **A peça possui uma forma complexa, incluindo características como perfis ou furos internos e externos com altas relações comprimento / diâmetro em materiais muito duros.**



(a)



Pá de turbina

Eletrodo EDM


Furos

Braçadeira

(b)

Exemplos de peças fabricadas por processos avançados de usinagem, (a) Amostras de peças produzidas por corte a jato de água, (b) Pá (palheta) de turbina, produzida por usinagem com eletroerosão.





Existem situações, no entanto, em que os métodos mecânicos não são satisfatórios, econômicos ou até possíveis, pelos seguintes motivos:

- **O aumento da temperatura durante o processamento e as tensões residuais desenvolvidas na peça de trabalho não são aceitáveis;**



A partir da década de 1950, essas dificuldades levaram ao desenvolvimento de processos **químicos, elétricos ou com laser** como fontes de energia para remover material de peças de trabalho metálicas ou não metálicas.

Denominados de **usinagem não tradicional** ou **usinagem não convencional**, esses processos removem o material não produzindo cavacos, como na usinagem e retificação tradicionais, mas por meios como dissolução química, ataque químico, fusão, evaporação e ação hidrodinâmica, às vezes com a ajuda de partículas abrasivas finas.

TABLE 27.1**General Characteristics of Advanced Machining Processes**

Process	Characteristics	Process parameters and typical material-removal rate or cutting speed
Chemical machining (CM)	Shallow removal on large flat or curved surfaces; blanking of thin sheets; low tooling and equipment cost; suitable for low-production runs	0.0025–0.1 mm/min
Electrochemical machining (ECM)	Complex shapes with deep cavities; highest rate of material removal among other nontraditional processes; expensive tooling and equipment; high power consumption; medium-to-high production quantity	V: 5–25 D.C.; A: 1.5–8 A/mm ² ; 2.5–12 mm/min, depending on current density
Electrochemical grinding (ECG)	Cutting off and sharpening hard materials, such as tungsten-carbide tools; also used as a honing process; higher removal rate than grinding	A: 1–3 A/mm ² ; typically 25 mm ³ /s per 1000 A
Electrical-discharge machining (EDM)	Shaping and cutting complex parts made of hard materials; some surface damage may result; also used as a grinding and cutting process; expensive tooling and	V: 50–380; A: 0.1–500; typically 300 mm ³ /min



Características gerais de Processos avançados de usinagem

Processo	Características	Parâmetros de processo e taxa de remoção de material ou velocidade de corte típicos
Usinagem Química (CM)	Remoção superficial em grandes superfícies planas ou curvas; baixo custo de ferramentas e equipamentos; adequado para execuções de baixa produção	0,0025–0,1 mm / min
Usinagem Eletroquímica	Formas complexas com cavidades; maior taxa de remoção de material entre outros processos não tradicionais; ferramentas e equipamentos caros; alto consumo de energia; quantidade de produção média a alta	2,5–12 mm / min, dependendo da densidade,



Características gerais de Processos avançados de usinagem

Processo	Características	Parâmetros de processo e taxa de remoção de material ou velocidade de corte típicos
Retífica Eletroquímica (ECG)	Cortar e afiar materiais duros, como ferramentas de carbeto de tungstênio; também usado como um processo de aprimoramento; maior taxa de remoção do que a retificação	tipicamente 25 mm ³ /s
Usinagem por Descarga elétrica (EDM)	Moldar e cortar peças complexas feitas de materiais duros; podem ocorrer danos na superfície; também usado como um processo de retífica e corte; ferramentas e equipamentos caros	V: 50V a 380V 0,1A a 500A; tipicamente 300mm ³ /min



Características gerais de Processos avançados de usinagem

Processo	Características	Parâmetros de processo e taxa de remoção de material ou velocidade de corte típicos
Usinagem por descarga elétrica com fio (<i>Wire electrical-discharge Machining</i>)	Corte de contorno de superfícies planas ou curvas; equipamento caro.	Varia de acordo com o material e a espessura
Usinagem a Laser (<i>Laser-beam machining - LBM</i>)	Corte e furação em materiais finos; zona afetada pelo calor; não requer vácuo; equipamento caro; consome muita energia	0.50–7.5 m/min



Características gerais de Processos avançados de usinagem

Processo	Características	Parâmetros de processo e taxa de remoção de material ou velocidade de corte típicos
Laser Microjet (Laser com jato de água)	O laser guiado por jato de água usa um feixe de 25 a 100 μm de diâmetro para usinar ou cortar;; grande profundidade; pouco dano térmico.	Varia de acordo com o material; até 2mm/s em aço inoxidável.
Usinagem por feixe de elétrons (<i>Electron-beam machining - EBM</i>)	Corte e furação em materiais finos; furos e ranhuras muito pequenas; zona afetada pelo calor; requer vácuo; equipamento caro.	1-2 mm ³ /min



Características gerais de Processos avançados de usinagem

Processo	Características	Parâmetros de processo e taxa de remoção de material ou velocidade de corte típicos
Usinagem a jato de água (<i>Water-jet machining WJM</i>)	Cortar todos os tipos de materiais não metálicos; adequado para corte de contorno de materiais flexíveis; nenhum dano térmico; barulhento	Varia consideravelmente com o material
Usinagem por jato de água abrasivo (<i>Abrasive water-jet machining - AWJM</i>)	Corte de camada única ou multicamada de metais e materiais não metálicos	Até 7,5m / min



Características gerais de Processos avançados de usinagem

Processo	Características	Parâmetros de processo e taxa de remoção de material ou velocidade de corte típicos
Usinagem por jato abrasivo (<i>Abrasive-jet machining - AJM</i>)	Corte, ranhura, rebarbação, gravação e limpeza de materiais metálicos e não metálicos; tende a terminar com extremidades afiadas; pode ser perigoso	Varia consideravelmente com o material



Usinagem Química

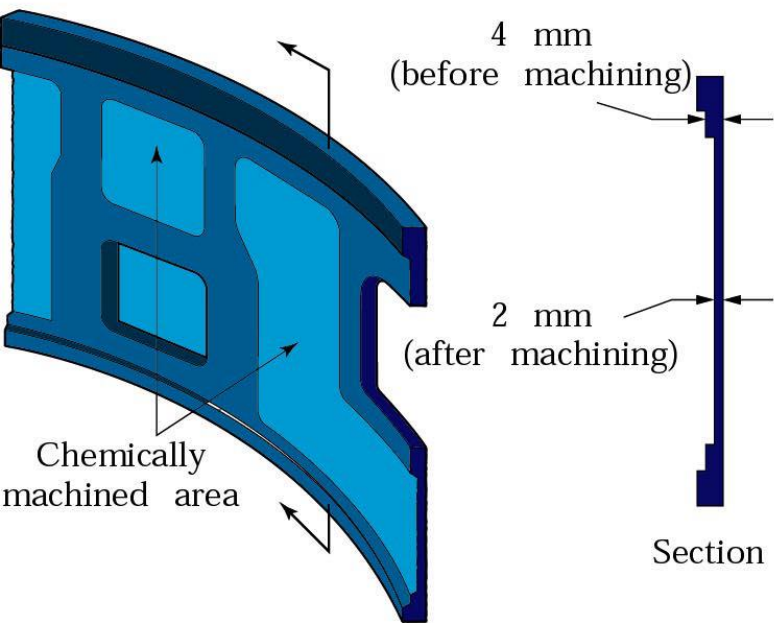
Produção de cavidades rasas em chapas, peças forjadas e extrusões, geralmente para redução geral de peso;

Processo usado em uma ampla variedade de metais, com profundidades de remoção de até 12 mm;

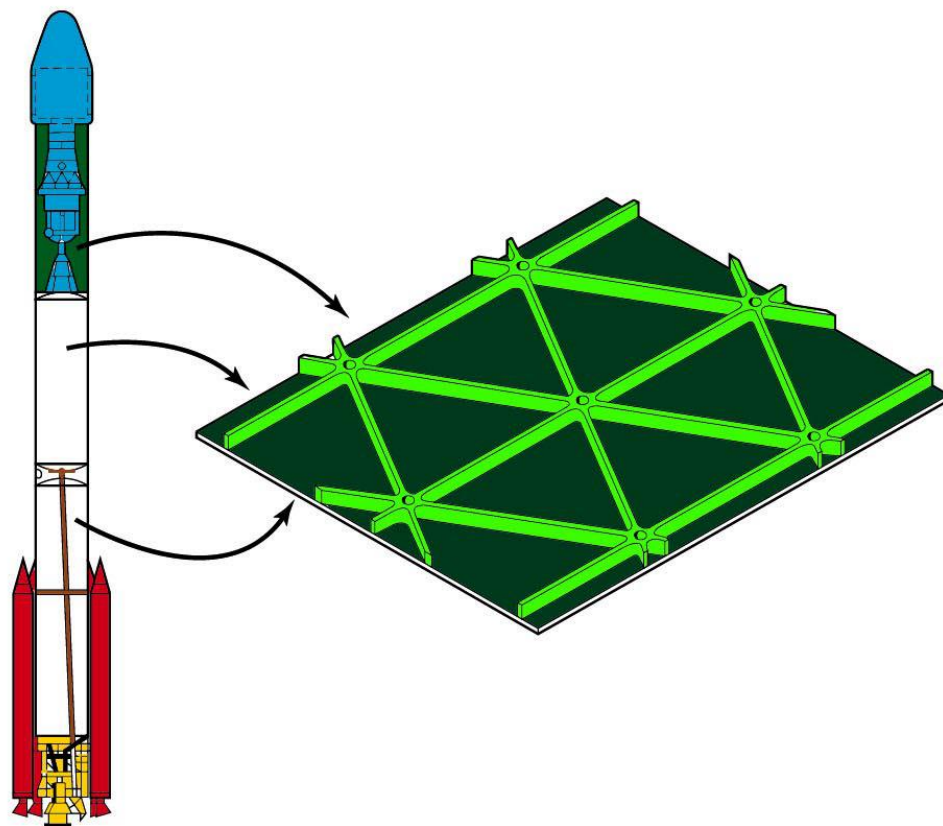
Ataque seletivo pelo reagente químico em diferentes áreas das superfícies da peça por mascaramento ou por imersão parcial da peça no reagente.



(a)



(b)



(a) Seção de painel de revestimento de mísseis contornada por usinagem química para melhorar a relação rigidez/peso da peça; b) Redução do peso dos veículos lançadores espaciais por usinagem química de placas de liga de alumínio. Esses painéis são usinados quimicamente após as placas passarem por processo de conformação. O padrão de nervuras pode ser facilmente modificado a um custo mínimo. *Source: Advanced Materials and Processes, December 1990 ASM International*



O procedimento para usinagem química consiste nas seguintes etapas:

1. Se a peça a ser usinada apresentar tensões residuais de processamento anterior, as tensões primeiro deverão ser aliviadas para evitar deformações após a usinagem química;
2. As superfícies são desengorduradas e limpas cuidadosamente, para garantir boa aderência do material de máscara e taxa uniforme de remoção de material;



3. O material de máscara é aplicado, normalmente usando fitas ou tintas, embora elastômeros (borracha e neopreme) e plásticos (cloreto de polivinil, polietileno e poliestireno) também sejam usados. O material de máscara não deve reagir com o reagente químico.

4. As áreas no material de máscara que serão expostas ao ataque químico são removidas;



5. As superfícies expostas são usinadas quimicamente, usando hidróxido de sódio (para alumínio), soluções de ácidos clorídrico e nítrico (para aços) e cloreto de ferro (para aços inoxidáveis).

O controle da temperatura e da agitação do líquido durante a usinagem química permitem remover uma profundidade uniforme do material da peça.



6. Após a usinagem, as peças são lavadas cuidadosamente com água, para evitar novas reações ou exposição a quaisquer resíduos de corrosão.

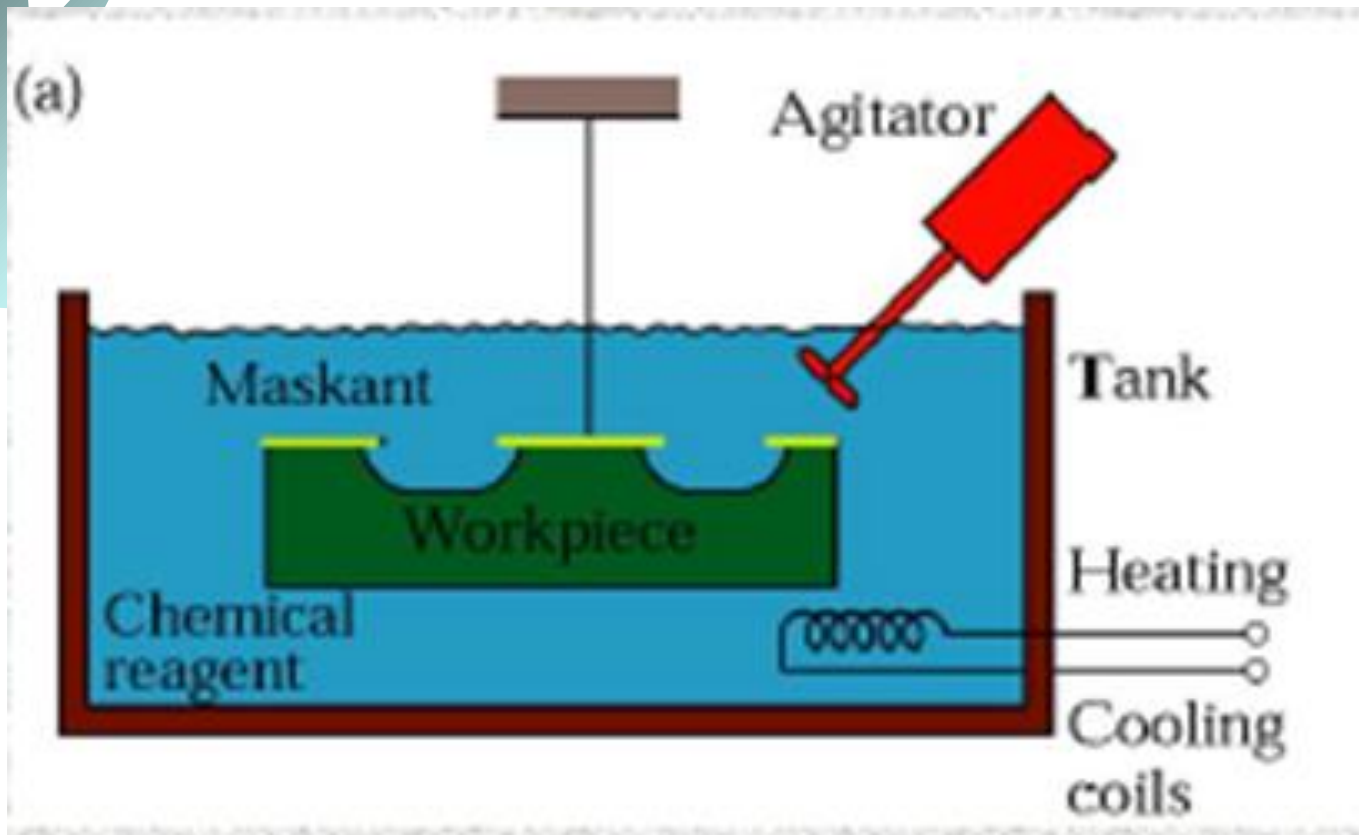
7. O restante do material de máscara é removido e a peça é limpa e inspecionada. Embora a máscara não seja afetada pelo reagente, ela pode ser facilmente dissolvido por um tipo diferente e apropriado de solvente, como acetona e outros.



8. Operações de acabamento adicionais podem ser executadas em peças quimicamente usinadas, como usinagem com fluxo abrasivo;

9. Esta sequência de operações pode ser repetida para produzir cavidades escalonadas e vários contornos .

Usinagem Química





A usinagem química é usada na indústria aeroespacial para remover camadas finas de material de grandes componentes de aeronaves, painéis e peças estruturais extrudadas.

O processo também é usado para fabricar dispositivos microeletrônicos.



A usinagem química pode gerar alguns danos na superfície da peça.

A usinagem química de estruturas soldadas pode resultar em remoção irregular do material; superfícies irregulares também podem ser produzidas em peças fundidas, causadas por porosidade e não uniformidade de propriedades no material.

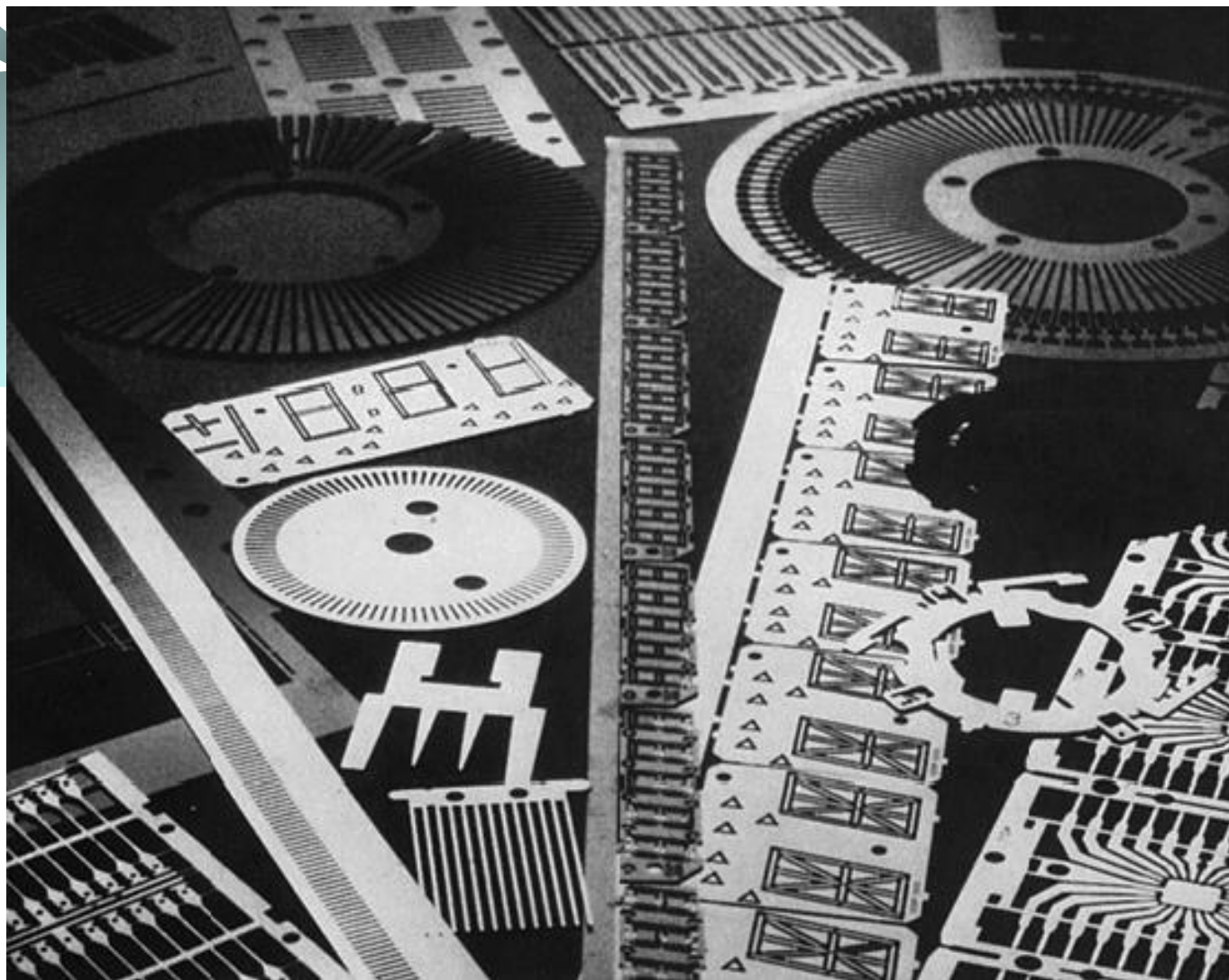
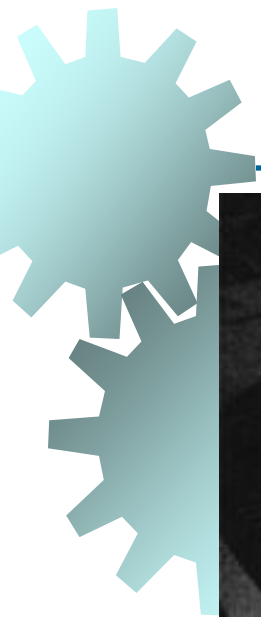


Fotogravação – Variação da usinagem química

1. O projeto da peça é implementado com uma ampliação de até 100×; um negativo fotográfico é então feito e reduzido ao tamanho da peça finalizada (arte). O desenho original (ampliado) permite que os erros de projeto inerentes sejam reduzidos em função da redução (como 100 ×) para a imagem final;
2. A chapa é revestida com um material fotossensível (fotorresistente - denominado emulsão) e posteriormente seco em forno.



-
3. O negativo é colocado sobre a chapa e exposto à luz ultravioleta, que endurece as áreas expostas.
 4. As áreas não expostas são dissolvidas;
 5. A chapa é então imersa em um banho de reagente (como na usinagem química), que grava as áreas expostas;
 6. O material de máscara é removido e a peça é lavada cuidadosamente com água, para remover todos os resíduos químicos.





- Video Usinagem Química

Usinagem Eletroquímica

É a remoção controlada de material por dissolução anódica em uma célula eletrolítica, na qual o material a ser usinado é o ânodo e a ferramenta é o cátodo, ou seja baseia-se na eletrólise.

É semelhante ao oposto de um processo de eletro-deposição.

O eletrólito é bombeado através do espaço entre os eletrodos, enquanto circula corrente contínua pela célula de baixa voltagem, para dissolver o metal da peça.

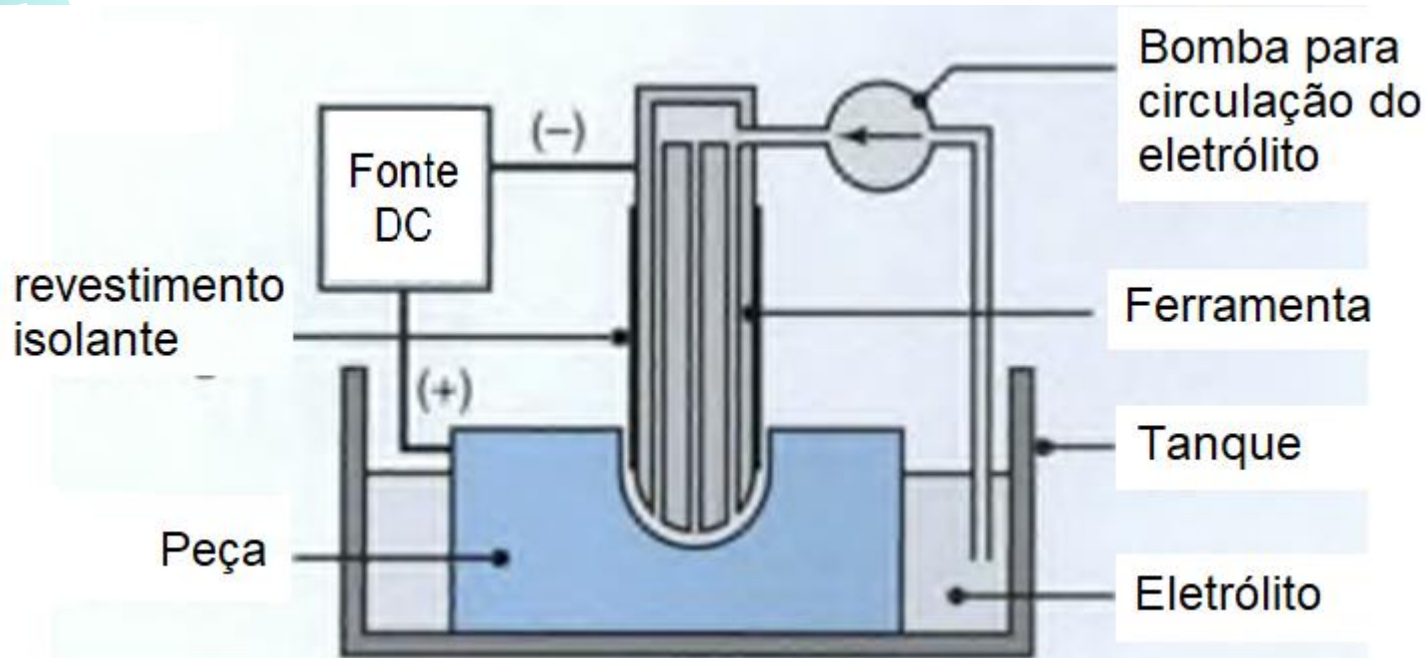
É um processo a frio, que não provoca danos térmicos à peça, gerando uma superfície lisa e sem rebarbas. Entretanto, ela não é apropriada para a produção de cantos vivos ou cavidades com fundo chato.

Utilizado na usinagem de materiais de alta dureza, alta resistência e baixa usinabilidade.

Usinagem Eletroquímica

A usinagem eletroquímica (ECM) é basicamente o inverso da galvanização.

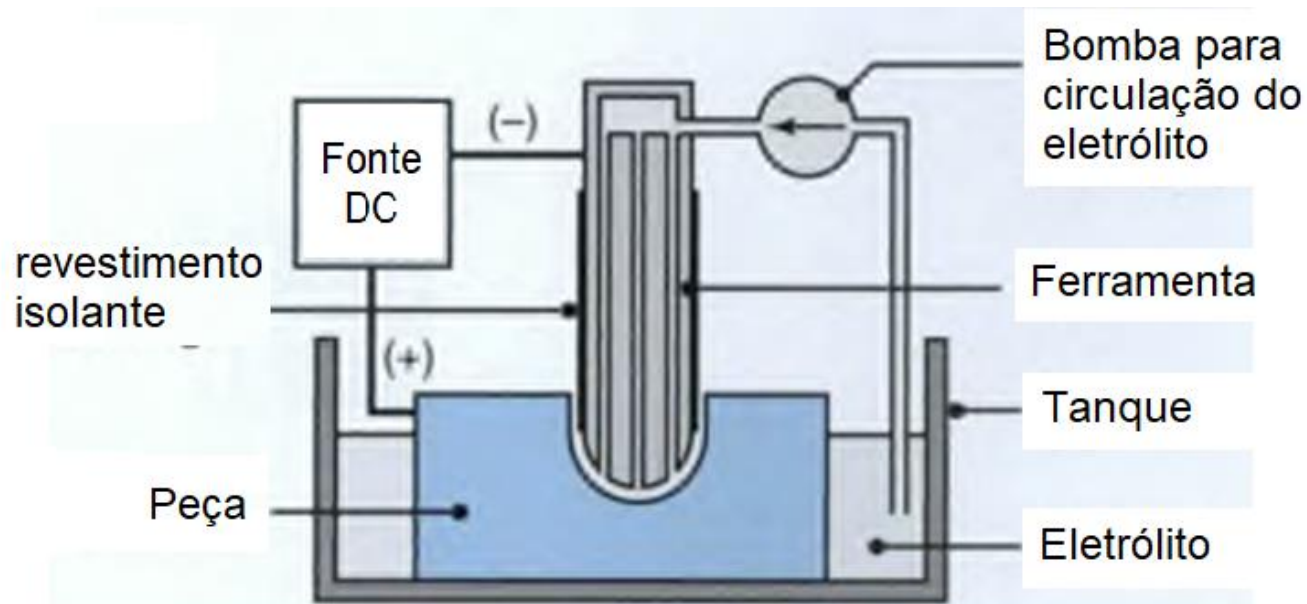
Um eletrólito atua como condutor de corrente, e a alta vazão de eletrólito no espaço entre a ferramenta e a peça (normalmente 0,1-0,6 mm) lava os íons metálicos para longe da peça (ânodo) antes que eles tenham a chance de se prender na ferramenta (cátodo). Observe que a cavidade produzida é a imagem correspondente da forma da ferramenta.



A ferramenta moldada, na forma sólida ou tubular, geralmente é feita de latão, cobre, bronze ou aço inoxidável.

O eletrólito é um fluido inorgânico altamente condutor, como uma solução aquosa de nitrato de sódio; é bombeado pelas passagens da ferramenta, a taxas de 10 a 16 m / s.

Uma fonte de alimentação CC, na faixa de 10 a 25 V, mantém densidades de corrente, que, para a maioria das aplicações, são de 20 a 200 A / cm² de superfície usinada ativa.






-
- ◀ A taxa de remoção de material (*MRR*) na usinagem eletroquímica, para uma eficiência de 100%, pode ser
 - estimada através da equação:

$$MRR = CI$$

onde *MRR* é dada em mm^3/min ;

I é a corrente em Amperes;

C é uma constante do material, dada em mm^3/Amin .



Máquinas podem trabalhar com correntes tão altas quanto 40.000 A e tão baixas quanto 5 A;

- A taxa de penetração da ferramenta é proporcional à densidade de corrente e a taxa de remoção de material normalmente varia entre 1.5 e 4mm³ por A-min;

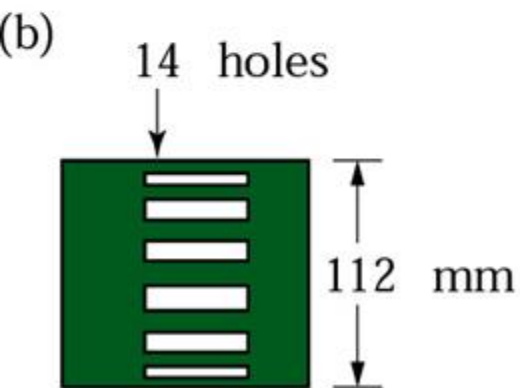
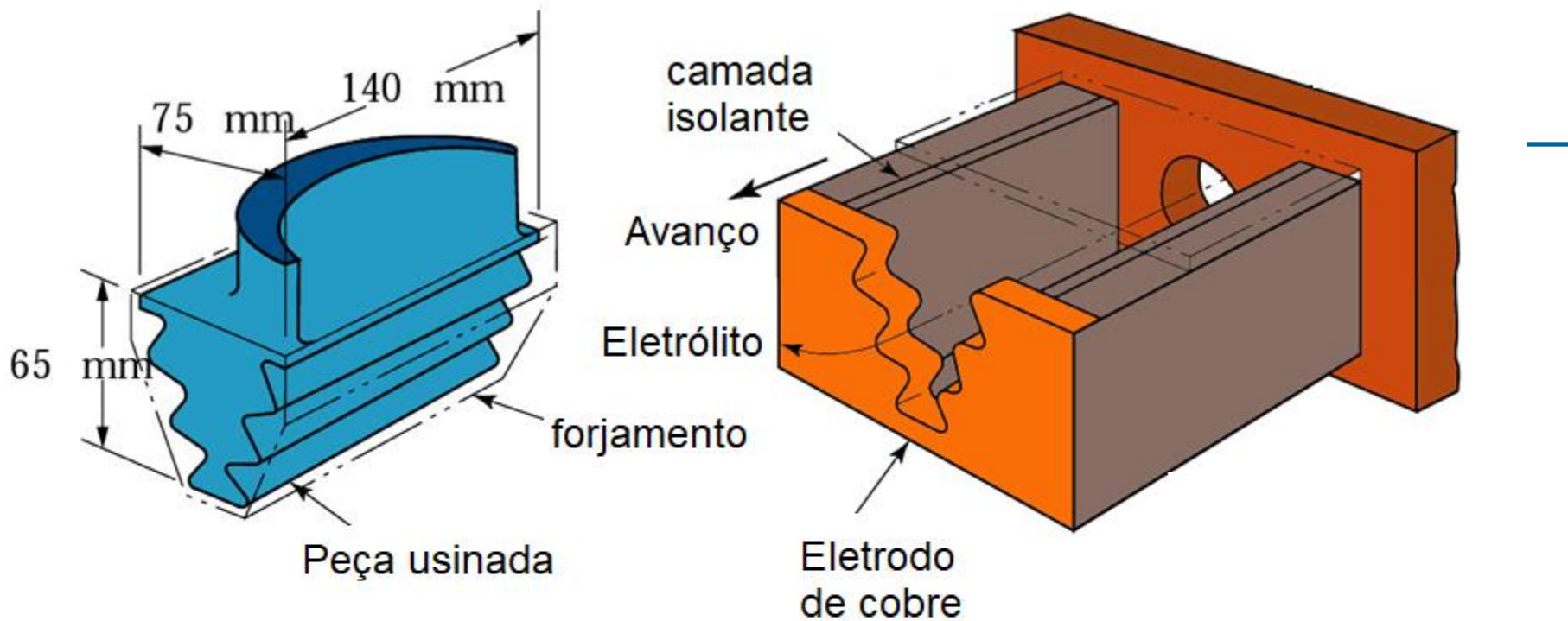
Como a taxa de remoção de material é função somente da taxa de troca iônica, ela não é afetada pela dureza ou resistência da peça.



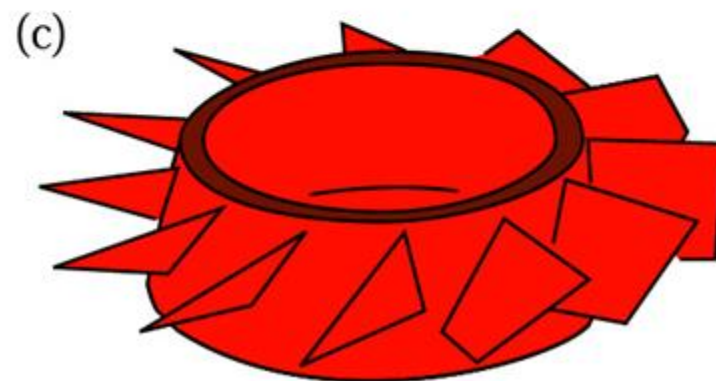
Usinagem eletroquímica geralmente é usada para usinar cavidades e formas complexas em materiais de alta resistência, particularmente na indústria aeroespacial, para a produção em massa de pás de turbinas, peças de motores a jato, etc..

Outras aplicações incluem indústria automotiva (engrenagens, peças de motores) e indústria médica.

(a) Pá de turbina de liga de níquel (360HB).



Gaiola de rolamento em aço 4340



Aerofólio em disco de compressor



A usinagem eletroquímica também é usada para usinagem e acabamento de cavidades de matriz de forjamento e para produzir pequenos orifícios.

- Modificações neste processo são usadas para operações de torneamento, faceamento, fresagem, etc..

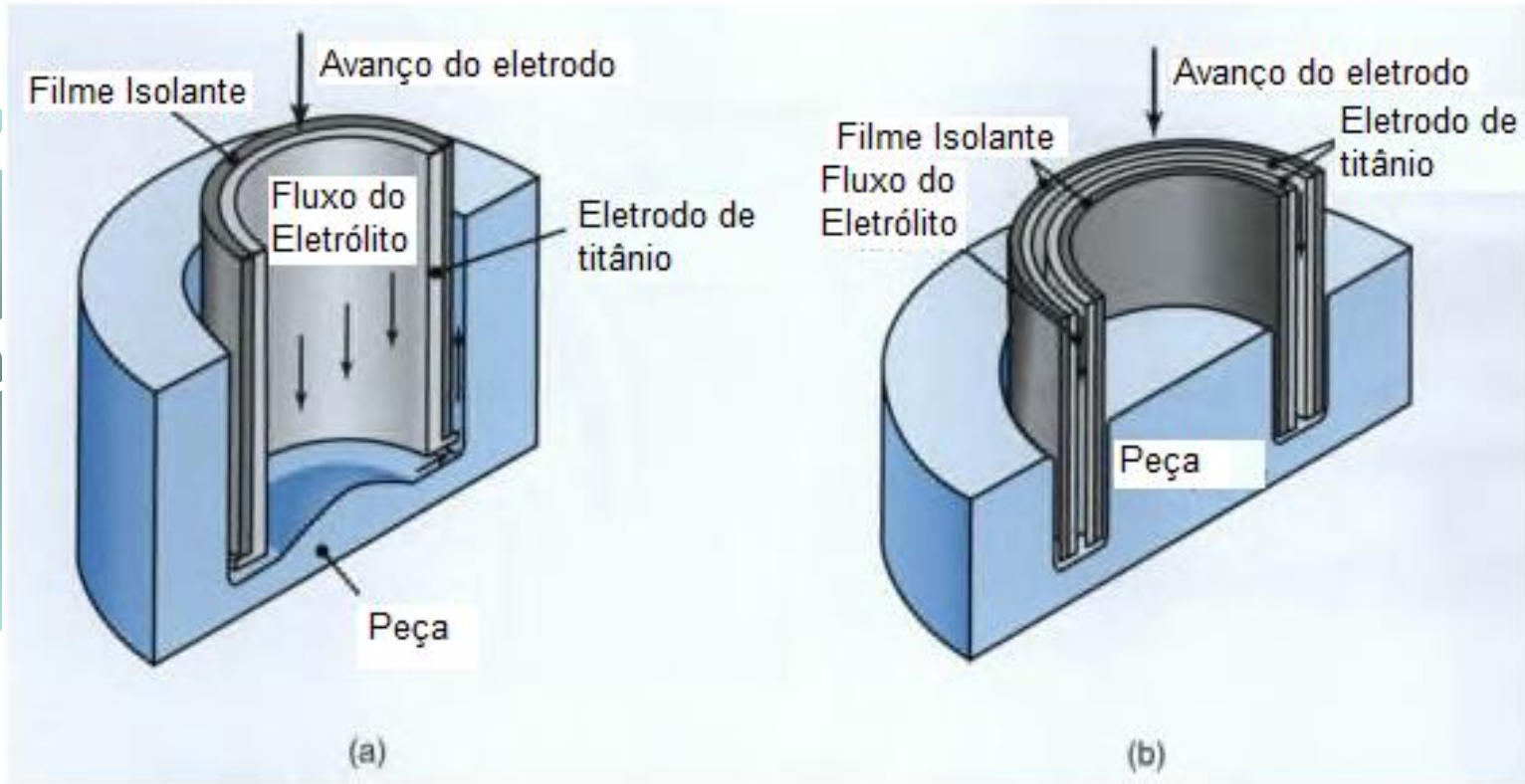
Aplicações mais recentes incluem micro-usinagem para a Indústria de eletrônicos.

Um avanço no conceito de Usinagem Eletroquímica é a usinagem eletrolítica de tubo moldado (STEM) ou furação eletrolítica;

É usada para produzir furos profundos de pequeno diâmetro, como nas pás de turbina. O eletrólito é à base de ácido, para garantir que o metal removido fique na forma de solução e não de precipitado (o que poderia obstruir o fluxo de eletrólito e prejudicar a operação).

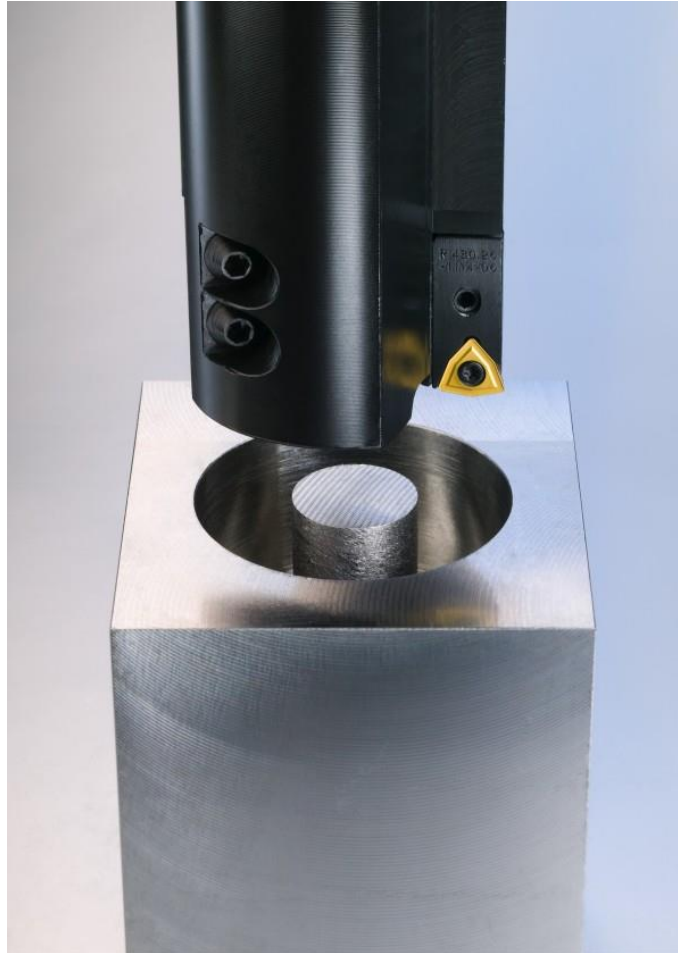
A ferramenta é um tubo de titânio puro (resistente ao ataque do eletrólito ácido), revestido com uma camada isolante (resina eletricamente isolante), para restringir a ação eletrolítica à superfície frontal do eletrodo (evitar a remoção de material na região central).

Podem ser feitos furos de até 0,5 mm e em proporções profundidade-diâmetro tão altas quanto 300: 1; Furos maiores podem ser produzidos por trepanação eletrolítica.



Operações de usinagem eletrolítica modelada: (a) usinagem eletrolítica de tubo moldado, usada para fazer pequenos furos com proporções tão grandes quanto 300: 1; (b) trepanação eletrolítica, usada para furos de diâmetro maior.

Trepanação – usinagem convencional





O processo Usinagem Eletroquímica produz uma superfície brilhante e livre de rebarbas, e também pode ser usado como uma operação de rebarbação.

Não causa nenhum dano térmico à peça, e a ausência de forças da ferramenta evita distorções, especialmente em peças finas e flexíveis.



Além disso, não há desgaste da ferramenta (uma vez que apenas o hidrogênio é gerado no cátodo) e o processo é capaz de produzir formas complexas.

No entanto, as propriedades mecânicas dos componentes fabricados pela ECM devem ser cuidadosamente comparadas às dos componentes fabricados por outros processos, para garantir que não haja um comprometimento significativo devido a reações químicas.

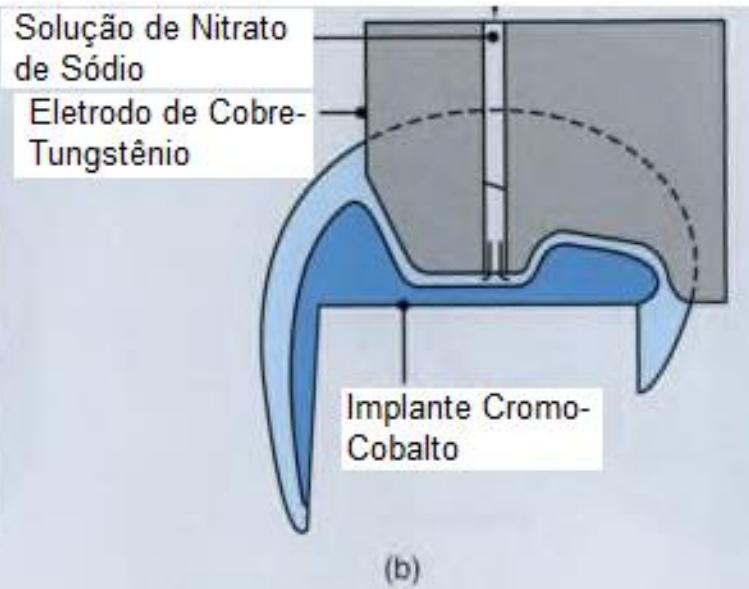


Os sistemas de usinagem eletroquímica agora estão disponíveis como centros de usinagem controlados numericamente, com capacidade de altas taxas de produção, alta flexibilidade de operação e manutenção de tolerâncias dimensionais estreitas.

O processo ECM também pode ser combinado com a usinagem de descarga elétrica (EDM) na mesma máquina (chamada usinagem híbrida).



(a)



(b)

(a) Duas próteses de joelho, mostrando implantes metálicos (peças superiores) com insertos de polietileno de peso molecular ultra-alto (peças inferiores). (b) Seção transversal do processo de ECM aplicada ao implante metálico. Fonte: Cortesia da Biomet, Inc.



Exemplos de aplicações do processo


- Furos para refrigeração de pás de turbinas;
- Passagens de óleo;
- Bicos de combustível;
- Furos com profundidade superior a 100 mm;
- Produção de furos sem zona termicamente afetada.



Principais vantagens da furação eletrolítica

- A operação não depende da dureza da peça;
- É possível produzir furos com L/\varnothing de até 300;
- Um grande número de furos pode ser feito simultaneamente;
- Furos não paralelos podem ser feitos simultaneamente;
- Sem alterações microestruturais na peça;
- Produção de furos curvos.

Desvantagens do processo

- 
- Ineficaz em materiais refratários;
 - Maquinário complexo;
 - Processo lento para a geração de um único furo;
 - Necessidade de manuseio de ácido;
 - Resíduo tóxico.



Usinagem eletroquímica pulsada

O processo de usinagem eletroquímica pulsada (PECM) é um refinamento da ECM;


Usa densidades de corrente muito altas (da ordem de $1\text{A}/\text{mm}^2$), mas a corrente é pulsada, em vez de corrente direta.

O objetivo da pulsação é eliminar a necessidade de altas taxas de fluxo de eletrólitos, que limitam a utilidade do ECM na fabricação de moldes e matrizes.



Investigações mostraram que o PECM melhora a vida à fadiga em comparação com o ECM;

As tolerâncias obtidas estão tipicamente na faixa de 20 a 100 μm .



O processo de Usinagem Eletroquímica é eficaz para a micro-fabricação. A completa ausência de desgaste da ferramenta implica que esse processo também possa ser usado para componentes eletrônicos de precisão.

As máquinas de ECM apresentam grande flexibilidade, com a implementação de controles numéricos (CNC).



- Video usinagem eletroquimica



Retífica Eletroquímica - (ECG -electrochemical grinding).

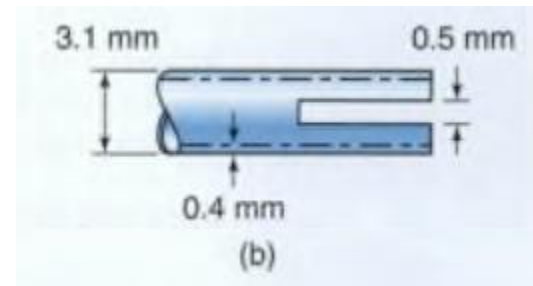
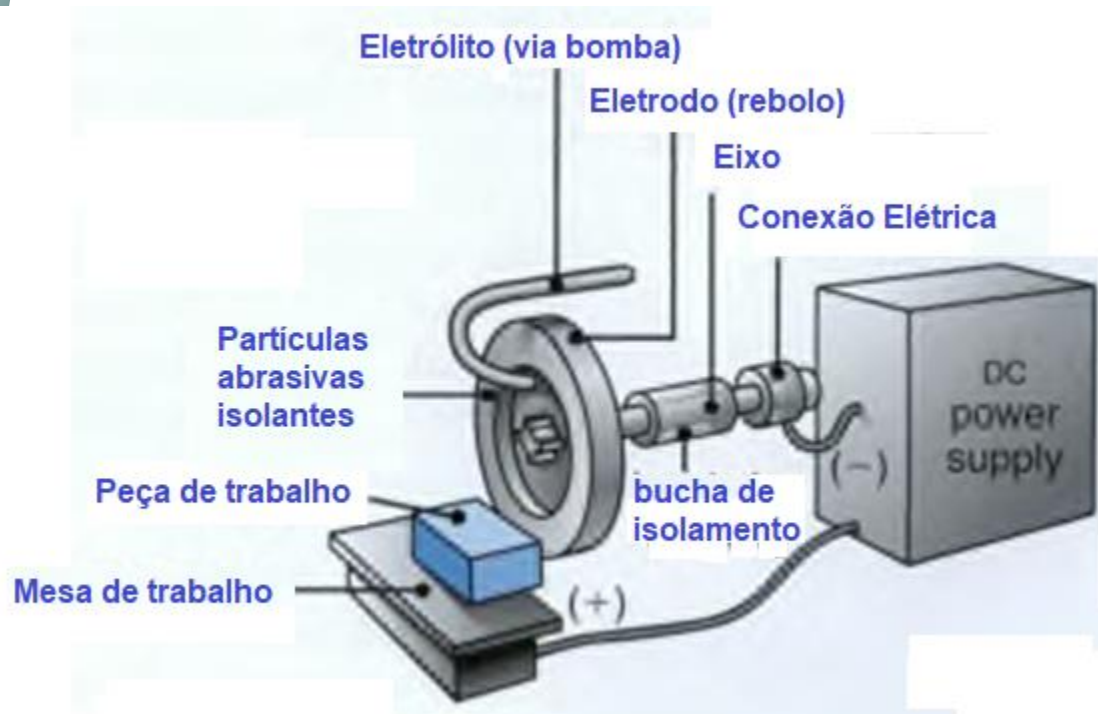
Combina a usinagem eletroquímica com a retificação convencional.

O equipamento utilizado é similar a uma retífica convencional, exceto pelo rebolo abrasivo e condutor atuando como catodo.



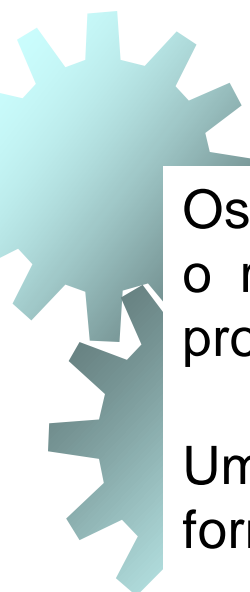
Retificação eletroquímica

- Processo combina a remoção eletroquímica (90%) com a ação abrasiva (10%);
- Emprega um rebolo abrasivo e condutor elétrico como catodo (polo negativo);
- Consiste de uma fonte de corrente contínua, um rebolo e um sistema de circulação e aplicação do eletrólito;
- O eixo-árvore pode ser disposto vertical ou horizontalmente;
- Baixa tensão DC e altas correntes (1000 A, podendo chegar a 3000 A).



slot fino produzido em liga de níquel

Ilustração esquemática do processo de retificação eletroquímica



Os abrasivos têm duas funções: (a) servir como isoladores entre o rebolo e a peça de trabalho e (b) remover mecanicamente produtos eletrolíticos da área de trabalho.

Um fluxo de solução eletrolítica, geralmente nitrato de sódio, é fornecido para a fase de usinagem eletroquímica da operação.

As densidades de corrente variam de 1 a 3 A / mm².

A maioria da remoção de metal no ECG é por ação eletrolítica e, normalmente, menos de 5% do metal é removido pela ação abrasiva; assim, o desgaste do rebolo é muito baixo e a peça permanece fria.

Os cortes de acabamento geralmente são feitos pela ação de retificação, mas apenas para produzir uma superfície com bom acabamento e precisão dimensional.

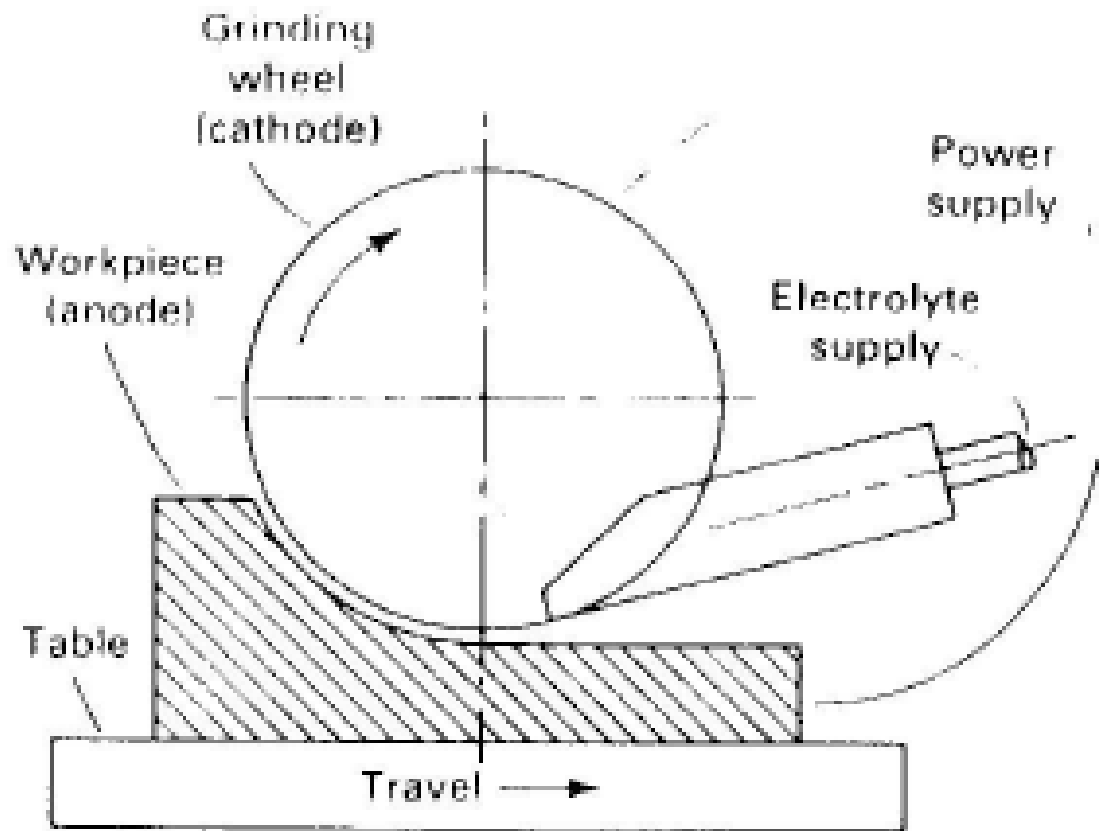


O processo de Retificação Eletroquímica é adequado para aplicações semelhantes às de fresagem, retificação e serragem mas não é adaptável a operações de desbaste de cavidades.

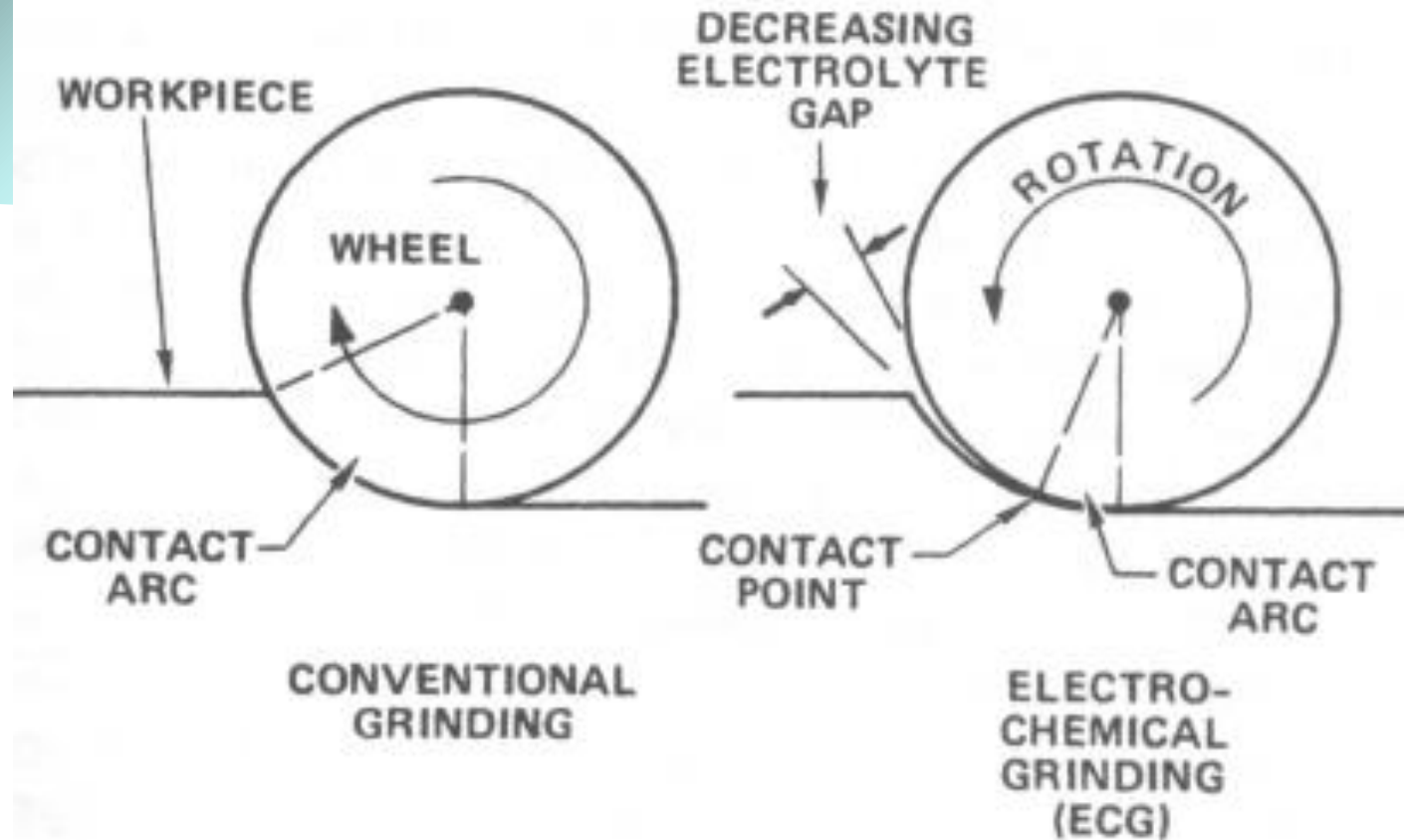
O processo pode ser aplicado com sucesso em ligas de alta resistência; vantagem em relação à retificação tradicional de materiais muito duros, onde o desgaste do rebolo pode ser alto.


As máquinas de Retificação Eletroquímica estão disponíveis com controles numéricos, que melhoram a precisão dimensional e a repetibilidade e aumentam a produtividade.

Esquema da retificação eletroquímica



Remoção de material nas operações de retificação convencional (esquerda) e eletroquímica (direita).



- 
- O abrasivo empregado no rebolo geralmente é o óxido de alumínio - Al_2O_3 (também o carbeto de silício - SiC e diamante);
 - Eletrólitos normalmente utilizados são o cloreto de sódio (NaCl) e o nitrato de sódio (NaNO_3)
 - Concentrações de 0,12 a 0,36 kg por litro de água;
 - Velocidade do rebolo é crítica:
 - se for muito alta, a força centrífuga afasta o eletrólito
 - se for muito baixa, não há passagem de corrente elétrica



-
- A rugosidade da peça varia de $Ra = 0,12 - 0,8 \mu\text{m}$;
 - tolerâncias dimensionais em torno de $\pm 25 \mu\text{m}$ ou menos;
 - processo produz superfícies isentas de rebarbas e não há risco de queima da peça.



Esta operação é usada nas seguintes situações

- Retificação de materiais de difícil usinabilidade (superligas, etc.);
- Peças com dureza superior a 60 HRC (Rockwell);
- Peças frágeis ou sensíveis ao calor;
- Fabricação de instrumentos cirúrgicos;
- Usinagem de peças livres de tensões residuais ou rebarbas



Principais vantagens da retificação eletroquímica

- Não há encruamento da peça;
- Não ocorre queima da peça (peça sem distorções);
- Peça sem rebarbas;
- Dressagem do rebolo menos freqüente que na retificação convencional;
- Vida mais longa do rebolo.



Desvantagens

- Custo de capital superior à retificação convencional;
- Limitada a materiais condutores;
- Ação corrosiva do eletrólito;
- Exige um sistema de filtragem e descarte do eletrólito;
- Competitiva somente para materiais não convencionais.



Usinagem por descarga elétrica (eletro-erosão)

O princípio da usinagem por descarga elétrica (EDM), também chamado de usinagem por eletro-erosão, baseia-se na erosão de metais por descargas elétricas.

Quando dois condutores energizados se tocam, um arco é produzido.

Examinando o ponto de contato entre estes dois condutores pode-se notar que uma pequena porção do metal foi corroída, deixando uma pequena cratera na superfície.

Princípio de Operação do EDM.

O sistema EDM básico consiste em uma ferramenta moldada (eletrodo) e a peça de trabalho, conectada a uma fonte de alimentação CC e colocada em um fluido dielétrico (eletricamente não condutor),

Quando a diferença de potencial entre a ferramenta e a peça de trabalho é suficientemente alta, o dielétrico é rompido e uma centelha transitória é descarregada através do fluido, removendo uma quantidade muito pequena de metal da superfície da peça de trabalho.

A descarga deste “capacitor” é repetida continuamente, a taxas entre 200 e 500 kHz, com tensões geralmente variando entre 50 e 380 V e correntes de 0,1 a 500 A. O volume de material removido por descarga de centelha é tipicamente na faixa de 10^{-6} a 10^{-4} mm³.

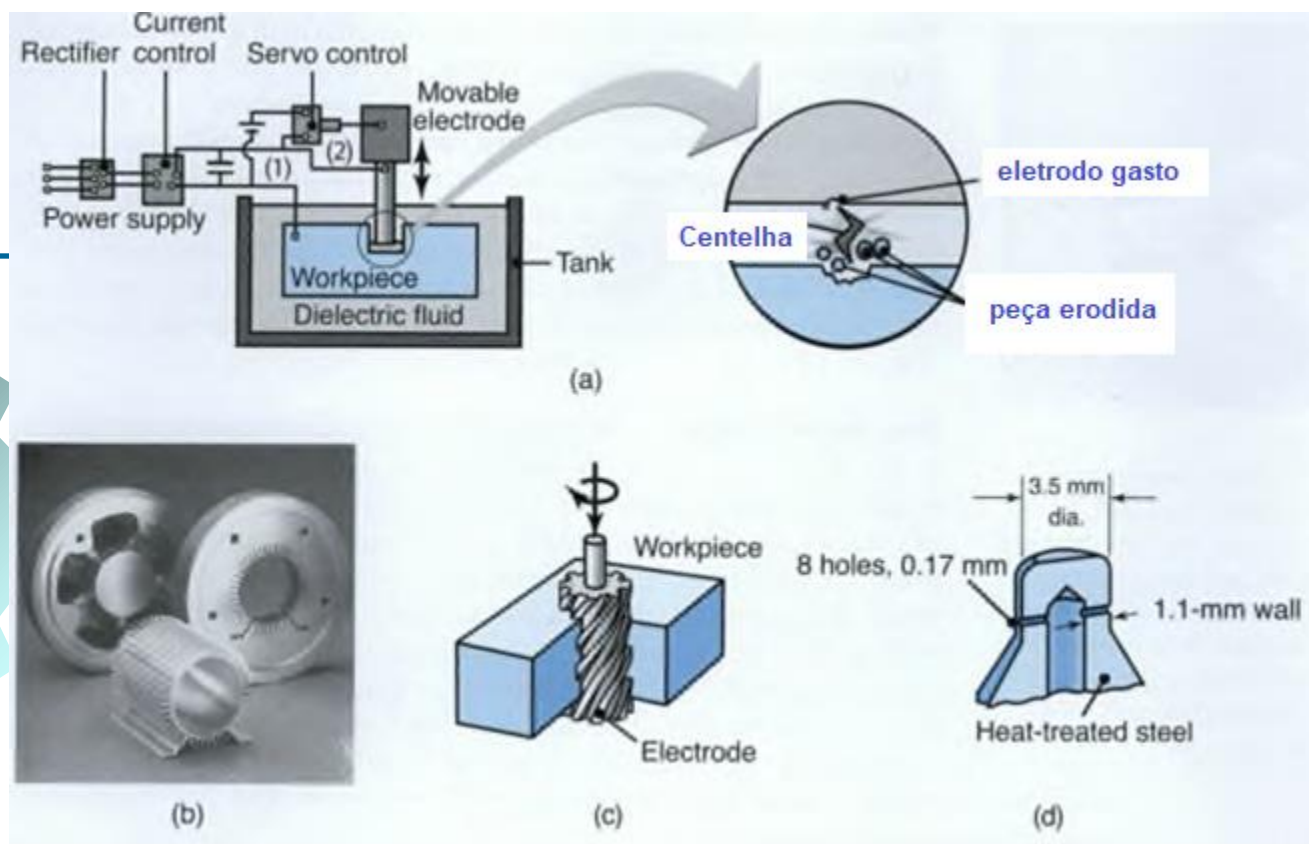
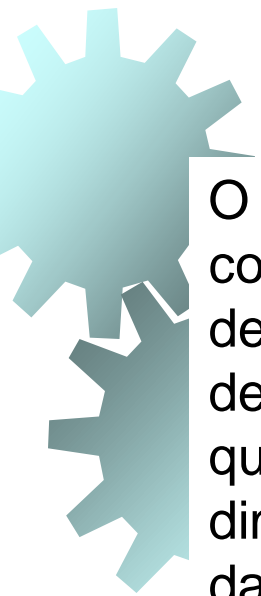


FIGURE 27.11 (a) Schematic illustration of the electrical-discharge machining process; this is one of the most widely used machining processes, particularly for die-sinking applications. (b) Examples of cavities produced by EDM, using shaped electrodes; the two round parts (rear) are the set of dies used in extruding the aluminum piece shown in front (see also Fig. 15.9b). (c) A spiral cavity produced by EDM using a slowly rotating electrode similar to a screw thread. (d) Holes in a fuel-injection nozzle made by EDM; the material is heat-treated steel. Source: (b) Courtesy of AGIE USA, Ltd.


- (a) Ilustração esquemática do processo de usinagem por descarga elétrica;
- (b) Exemplos de cavidades produzidas por EDM, usando eletrodos modelados; as duas peças cilíndricas são o conjunto de matrizes usadas na extrusão da peça de alumínio mostrada na frente;
- (c) Uma cavidade em espiral produzida por usinagem por descarga elétrica usando um eletrodo de rotação lenta semelhante a uma rosca;
- (d) Orifícios em um bico de injeção de combustível fabricado pela Usinagem por descarga elétrica; o material é aço tratado termicamente. Fonte: (b) Cortesia de AGIE USA, Ltd.



O processo EDM pode ser usado em qualquer material que seja um condutor elétrico. Duas propriedades físicas importantes, que determinam o volume de metal removido por descarga, são o ponto de fusão e o calor latente da fusão do material da peça. À medida que essas quantidades aumentam, a taxa de remoção de material diminui. A taxa de remoção de material pode ser estimada a partir da fórmula empírica

$$MRR = 4 \times 10^4 I T_w^{-1.23}$$

onde MRR está em mm³ / min, I é a corrente em amperes e T_w é o ponto de fusão da peça em ° C.



A peça de trabalho é fixada dentro do tanque que contém o fluido dielétrico e seus movimentos são controlados por sistemas numericamente controlados.

O espaço entre a ferramenta e a peça é crítico; assim, a alimentação descendente da ferramenta é controlada por um servomecanismo, que mantém automaticamente uma folga constante.

A frequência da descarga ou a energia por descarga, a tensão e a corrente geralmente variam para controlar a taxa de remoção.

A taxa de remoção e a rugosidade da superfície produzidas aumentam com o aumento da densidade de corrente e com a diminuição da frequência de centelhas.



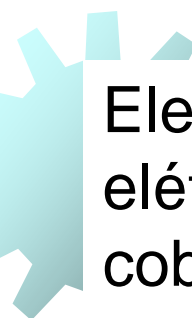
Fluidos dielétricos.

As funções do fluido dielétrico são:

1. Atuar como isolante até que o potencial seja suficientemente alto
2. Fornecer um meio de refrigeração;
3. Atuar como um meio de lavagem e eliminar os detritos no espaço entre peça e ferramenta.

As máquinas de Usinagem por Descarga Elétrica são equipadas com uma bomba e um sistema de filtragem para o fluido dielétrico. Os fluidos dielétricos mais comuns são os óleos minerais, embora o querosene e água destilada ou desionizada também sejam usados em aplicações especializadas.

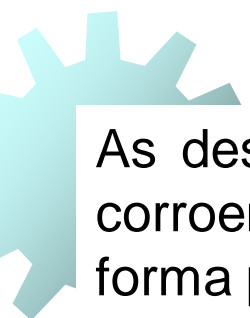
Fluidos mais claros e de baixa viscosidade, que facilitam a limpeza, também podem ser utilizados.



Eletrodos. Os eletrodos para usinagem por descarga elétrica geralmente são feitos de grafite, embora latão, cobre ou ligas de cobre-tungstênio também sejam usadas.

As ferramentas podem ser modeladas através de técnicas de moldagem, fundição, metalurgia do pó ou usinagem CNC.

Eletrodos de fio de Tungstênio tão pequenos quanto 0,1 mm de diâmetro podem ser usados para produzir furos, com proporções profundidade / diâmetro de até 400: 1, uma proporção que é muito superior às obtidas pelos métodos convencionais.




As descargas no processo de usinagem por descarga elétrica também corroem o eletrodo, alterando sua geometria e afetando adversamente a forma produzida e sua precisão dimensional.

A taxa de desgaste é definida como a proporção do volume de material da peça removido para o volume de desgaste da ferramenta; varia de cerca de 3: 1 para eletrodos metálicos a até 100: 1 para eletrodos de grafite.

O desgaste da ferramenta está relacionado aos pontos de fusão dos materiais envolvidos: quanto maior o ponto de fusão do eletrodo, menor a taxa de desgaste.

Os eletrodos de grafite têm a maior resistência ao desgaste.

A decorative graphic of a gear with a light blue-to-white gradient, positioned in the top-left corner of the slide.

A usinagem por descarga elétrica tem inúmeras aplicações, como matrizes para forjamento, extrusão, fundição sob pressão, moldagem por injeção, etc.

Outras aplicações incluem:

- usinagem de furos profundos de pequeno diâmetro, usando fio de tungstênio como eletrodo;
- ranhuras estreitas em peças;
- orifícios de resfriamento nas pás das turbinas;
- Cavidades escalonadas podem ser produzidas controlando os movimentos relativos da peça em relação ao eletrodo.



Cavidades escalonadas produzidas com um eletrodo quadrado pelo processo de usinagem por descarga elétrica.

A peça se move nas duas principais direções horizontais e seu movimento é sincronizado com o movimento descendente do eletrodo para produzir essas cavidades; também é mostrado um eletrodo redondo capaz de produzir cavidades redondas ou elípticas. Fonte: Cortesia da AGIE USA, Ltd.



Usinagem Blue Arc

Uma variação da usinagem de descarga elétrica desenvolvido para desbaste de materiais difíceis de usinar, especialmente superligas à base de níquel.

Usa um eletrodo e usinagem de descarga elétrica para remover o material, mas adiciona descarga de fluido de alta pressão para remover cavacos da zona de corte.

Essa abordagem reduz o consumo de energia em mais de 30% em comparação com a fresagem e reduz consideravelmente o tempo do ciclo (de dias para horas)

Existem variações da usinagem Blue Arc para torneamento e retificação.

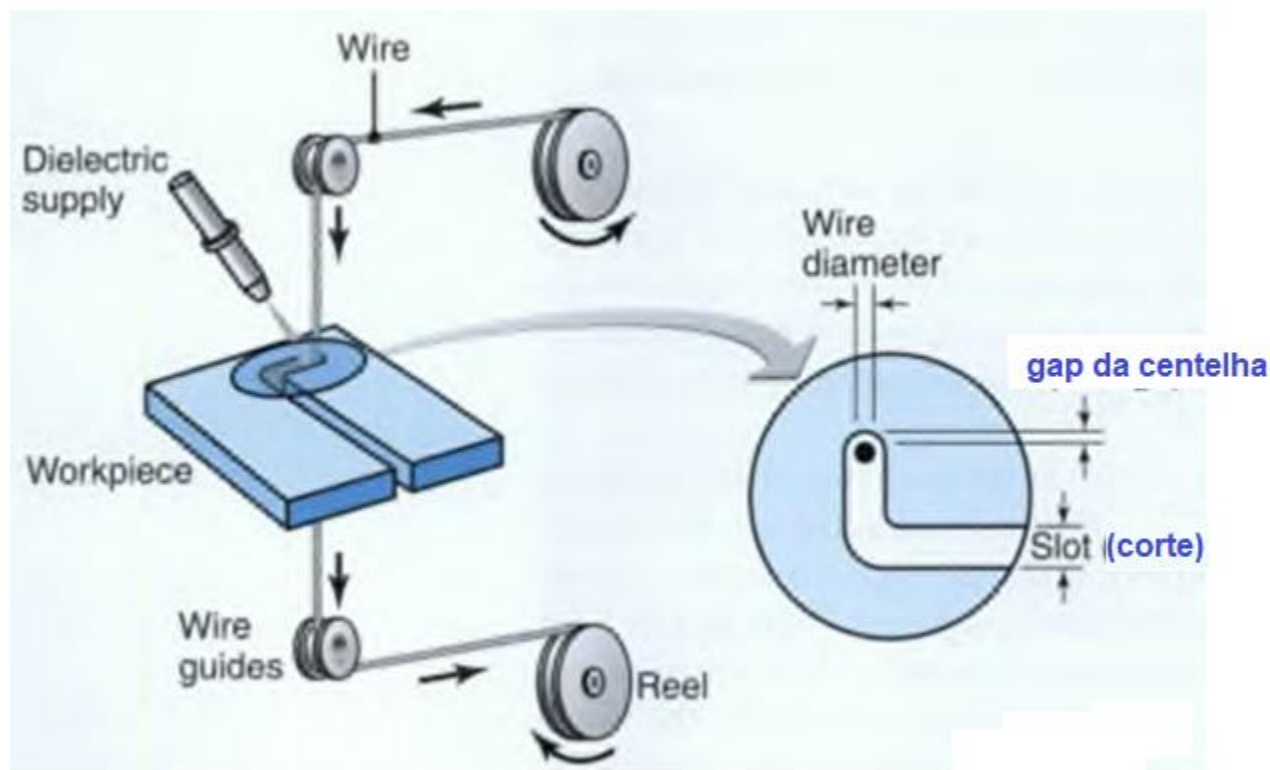


Considerações de projeto para a usinagem por descarga elétrica:


- As peças devem ser projetadas de tal forma que os eletrodos necessários possam ser desenvolvidos a um custo não muito elevado.
- Cavidades profundas e rasgos estreitos devem ser evitados.
- Para que economicamente viável, o acabamento superficial especificado deve ser adequado ao processo.
- Para alcançar alta taxa de produção, a maior parte da remoção de material deve ser feita por processos convencionais (de desbaste)

Uma variação do processo de usinagem por descarga elétrica (EDM) é o EDM a fio.

Esse processo é semelhante ao corte de contorno com uma serra de fita (ilustrada na qual um fio que se move lentamente percorre um caminho prescrito e corta a peça de trabalho.




O fio é movimentado a uma velocidade constante, na faixa de 0,15 a 9m/min e uma folga constante (kerf) é mantida durante o corte.



O fio é geralmente feito de latão, cobre, tungstênio ou molibdênio; também são utilizados fios revestidos de zinco ou latão, multicamadas e com núcleo de aço.

O diâmetro do fio é tipicamente de cerca de 0,30 mm para cortes de desbaste e 0,20 mm para cortes de acabamento. O fio deve ter alta condutividade elétrica e resistência à tração.

Normalmente, ele é usado apenas uma vez, pois é relativamente barato em comparação com o tipo de operação que ele executa.



Os centros de usinagem de corte a fio EDM Multi-eixos são capazes de produzir formas tridimensionais e estão equipados com recursos como:

- Controles CNC do caminho de corte do fio e seu ângulo em relação ao plano da peça;
- Cabeças múltiplas, para cortar duas peças ao mesmo tempo;
- Recursos para evitar o rompimento do fio e de reposição automática, em caso de rompimento do fio;
- Estratégias de usinagem programadas, para otimizar a operação.

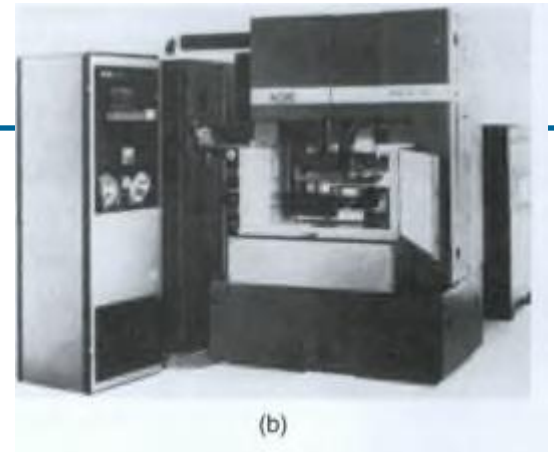
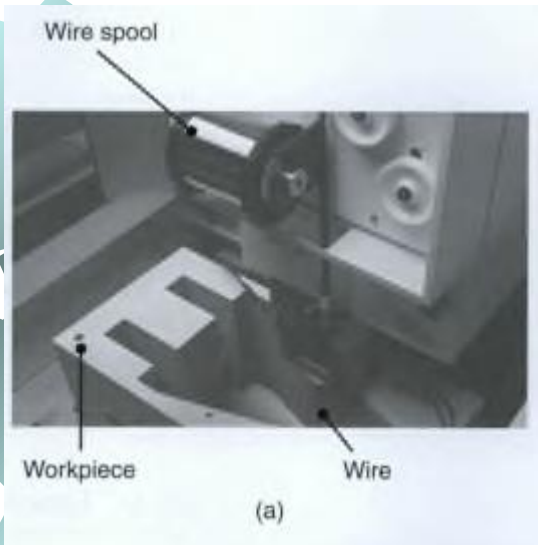


FIGURE 27.14 (a) Cutting a thick plate with wire EDM. (b) A computer-controlled wire EDM machine. *Source:* Courtesy of AGIE USA, Ltd.



Máquinas controladas por CNC de dois eixos podem produzir formas cilíndricas, de maneira semelhante a uma operação de torneamento ou retificação cilíndrica.

Com o controle de alimentação do fio, pode-se atuar de forma independente em duas direções principais, permitindo a usinagem de peças cônicas.

Retífica por descarga elétrica (EDG)

O rebolo da retífica por descarga elétrica (EDG) é feito de grafite ou latão e não contém abrasivos.

O material é removido da superfície da peça por descargas entre o rebolo e a peça.

Este processo é usado principalmente para retificar ferramentas e matrizes de metal duro, mas também pode ser usado com peças frágeis, como agulhas cirúrgicas, tubos de paredes finas, etc.

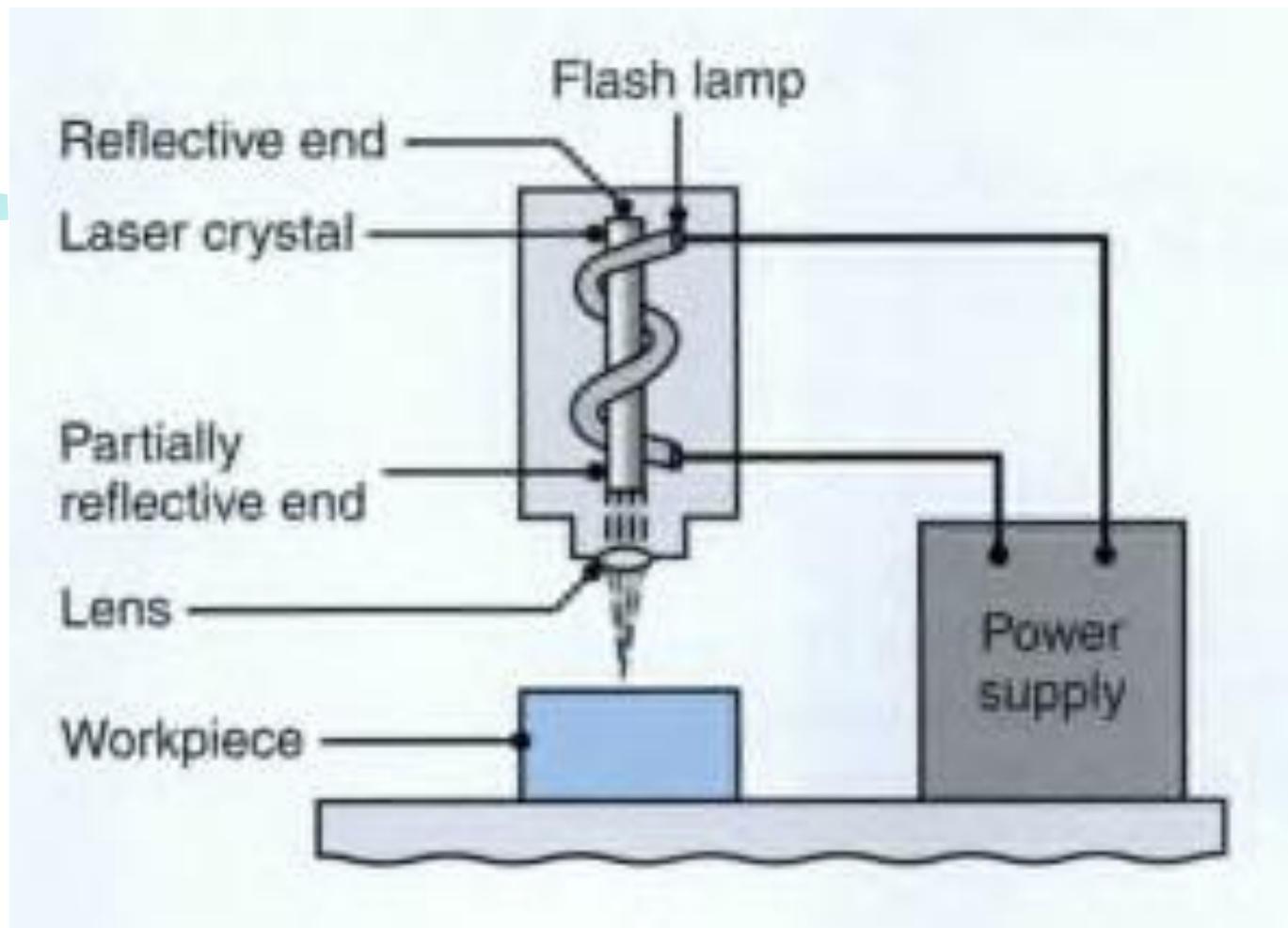
O material é removido por ação química, com as descargas elétricas do rebolo de grafite na peça de trabalho, que é lavada pelo fluxo de eletrólitos.



Usinagem a Laser

Na usinagem com feixe de laser (LBM), a fonte de energia é um laser que concentra energia óptica na superfície da peça de trabalho.

O laser funde e evapora partes da peça de maneira controlada. Este processo, que não requer vácuo, é usado para usinar uma variedade de materiais metálicos e não metálicos.



**TABLE 27.2****General Applications of Lasers in Manufacturing**

Application	Laser type
Cutting	
Metals	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:YAG, ruby
Plastics	CWCO ₂
Ceramics	PCO ₂
Drilling	
Metals	PCO ₂ , Nd:YAG, Nd:glass, ruby
Plastics	Excimer
Marking	
Metals	PCO ₂ , Nd:YAG
Plastics	Excimer
Ceramics	Excimer
Surface treatment	CWCO ₂
Welding	
Metals	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:YAG, Nd:glass, ruby, diode
Plastics	Diode, Nd:YAG
Lithography	Excimer

Note: P = Pulsed, CW = Continuous wave, Nd:YAG = Neodymium:yttrium-aluminum-garnet.



Parâmetros físicos importantes no LBM são a refletividade e a condutividade térmica da superfície da peça de trabalho e seu calor específico e calor latente de fusão e evaporação;

quanto mais baixas essas quantidades, mais eficiente é o processo. A profundidade de corte pode ser expressa como

$$t = \frac{CP}{vd}$$

onde t é a profundidade, C é uma constante para o processo, P é a entrada de energia, v é a velocidade de corte e d é diâmetro do feixe laser.

As densidades de energia de pico dos feixes de laser variam de 5 a 200 kW / mm².



A superfície produzida pela Usinagem com feixe laser é geralmente rugosa e tem uma zona afetada pelo calor, que, em aplicações críticas, pode ser necessário remover ou tratar.

O laser pode ser usado em conjunto com um fluxo de gás (como oxigênio), chamado tocha de laser, para aumentar a absorção de energia para o corte de chapas.

Laser combinado com gás inerte (nitrogênio ou argônio) é usado para aço inoxidável e alumínio;

Os fluxos de gás também têm a importante função de soprar o material fundido e vaporizado da superfície da peça..

A usinagem com feixe de laser é amplamente utilizada na fabricação de furos, trepanação e corte de metais, materiais não metálicos, cerâmica e materiais compósitos

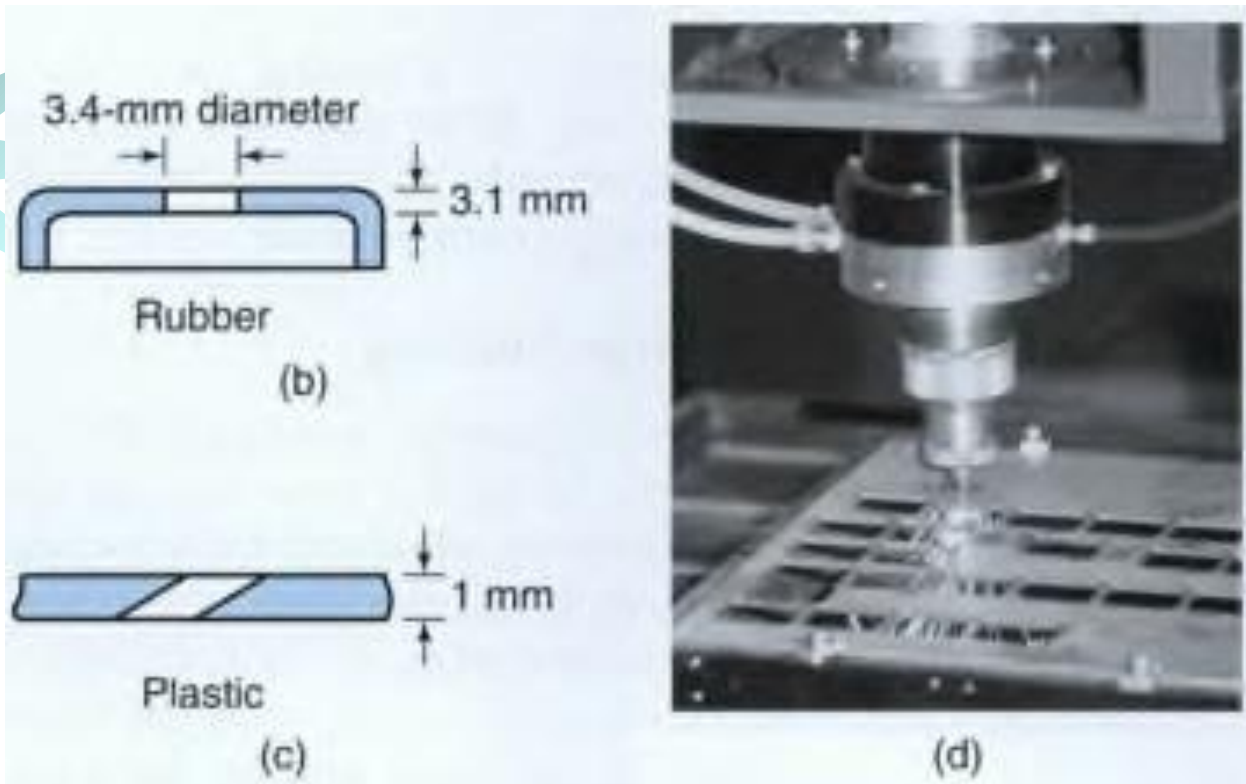


FIGURE 27.15 (a) Schematic illustration of the laser-beam machining process. (b) and (c) Examples of holes produced in nonmetallic parts by LBM. (d) Cutting sheet metal with a laser beam. *Source:* (d) Courtesy of Rofin-Sinar, Inc.



A usinagem com laser é uma alternativa atraente aos métodos de usinagem tradicionais.

Furos tão pequenos quanto 0,005 mm, com proporções profundidade-diâmetro de 50:1, podem ser realizados em diversos materiais.

Placas de aço com espessura de 32 mm podem ser usinadas com laser.

A usinagem a laser vem sendo mais econômica do que a usinagem por descarga elétrica.

Vem sendo usado cada vez mais nas indústrias eletrônica e automotiva e em materiais compósitos.

Exemplos: Usinagem a laser dos orifícios de resfriamento em algumas palhetas dos motores a jato Boeing 747 e orifícios de sangramento nas tampas das bombas de combustível



Exemplos de aplicações:

- Soldagem;

- Tratamento térmico localizado, em pequena escala, de metais e cerâmica, para modificar suas propriedades mecânicas e tribológicas de superfície;

- Marcação de peças, como letras, números e códigos; Embora o equipamento seja mais caro do que o usado em outros métodos, a marcação e gravação a laser se tornaram cada vez mais comuns devido à sua precisão, reprodutibilidade e flexibilidade.

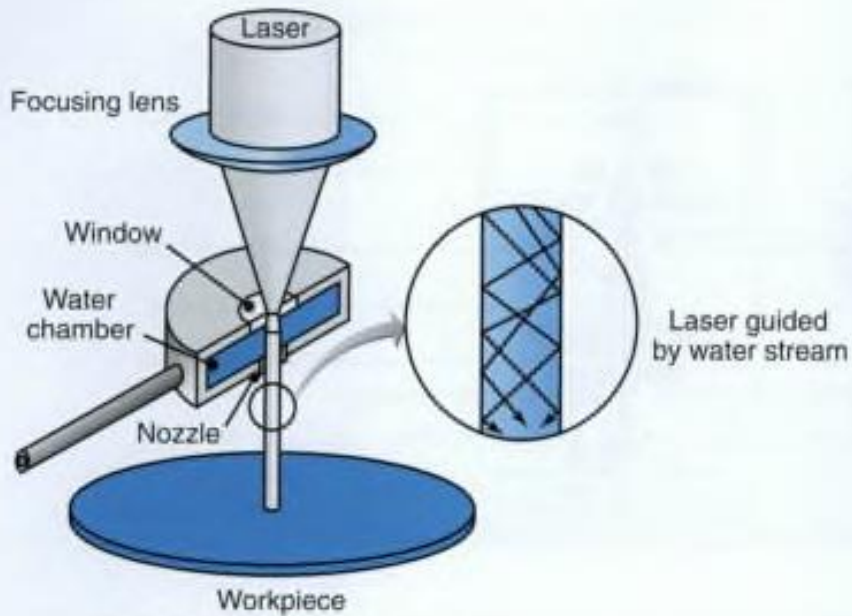


Laser Microjet.

Usa um jato de água laminar de baixa pressão para servir como um cabo de fibra óptica de comprimento variável para direcionar o laser.

O jato de água é produzido por um bico de safira ou diamante com uma abertura de 25–100 μm e exerce uma força menor que 0,1 N.

Na usinagem a laser Microjet, a remoção de material ocorre devido à ação do laser, e a água fornece resfriamento. (reduzindo a zona afetada pelo calor)



(a)



(b)

Ilustração esquemática do processo de Laser Microjet; (b) Um relógio de pulso de 25 mm de diâmetro produzido a partir de chapa de latão por usinagem a laser Microjet. Fonte: (b) Cortesia de Synova S.A.

O laser é tipicamente um laser Nd: Yag, com duração de pulso de micro ou nanossegundo e potência entre 10 e 200 W.

Electron-beam Machining

usinagem com feixe de elétrons (EBM)



A fonte de energia na usinagem com feixe de elétrons (EBM) são elétrons de alta velocidade, que atingem a superfície da peça e geram calor

As máquinas utilizam voltagens na faixa de 150 a 200 kV, para acelerar os elétrons de 50 a 80% da velocidade da luz (300.000 km / s).

As aplicações desse processo são semelhantes às da usinagem com feixe de laser, exceto que, diferentemente dos lasers, o EBM requer vácuo; conseqüentemente, é usado com muito menos frequência do que a usinagem com feixe de laser.

A usinagem com feixe de elétrons pode ser usada para o corte muito preciso de uma ampla variedade de metais, o acabamento da superfície é melhor e o corte é mais preciso do que em outros processos de corte térmico. No entanto, a interação do feixe de elétrons com a superfície da peça produz raios X perigosos.

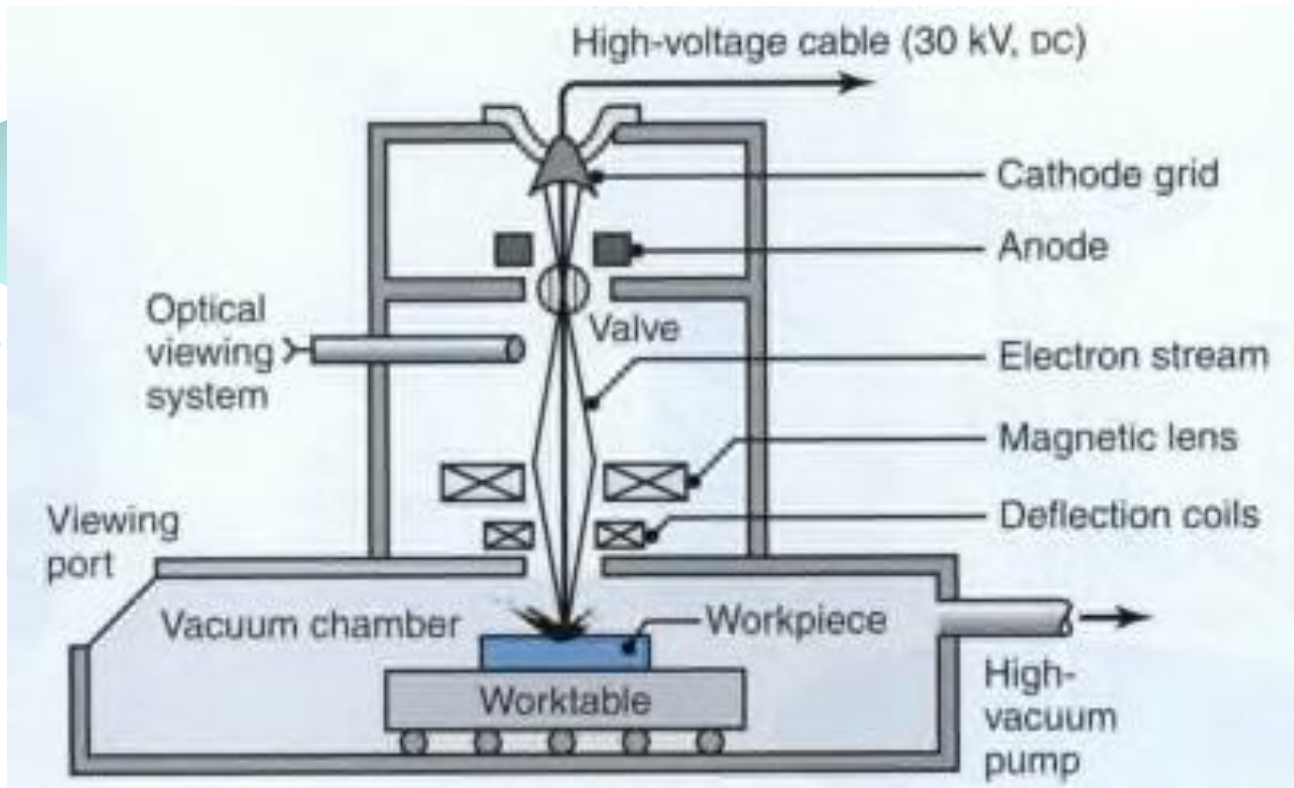


FIGURE 27.17 Schematic illustration of the electron-beam machining process; unlike LBM, this process requires a vacuum, so the workpiece size is limited to the size of the vacuum chamber.



Usinagem a jato de água

O princípio da usinagem por jato de água (WJM), também chamado de usinagem hidrodinâmica, baseia-se na força resultante da mudança momentânea de um fluxo de água.

Essa força é suficientemente alta para cortar materiais metálicos e não metálicos.

O jato de água age como uma serra e corta um sulco estreito no material.

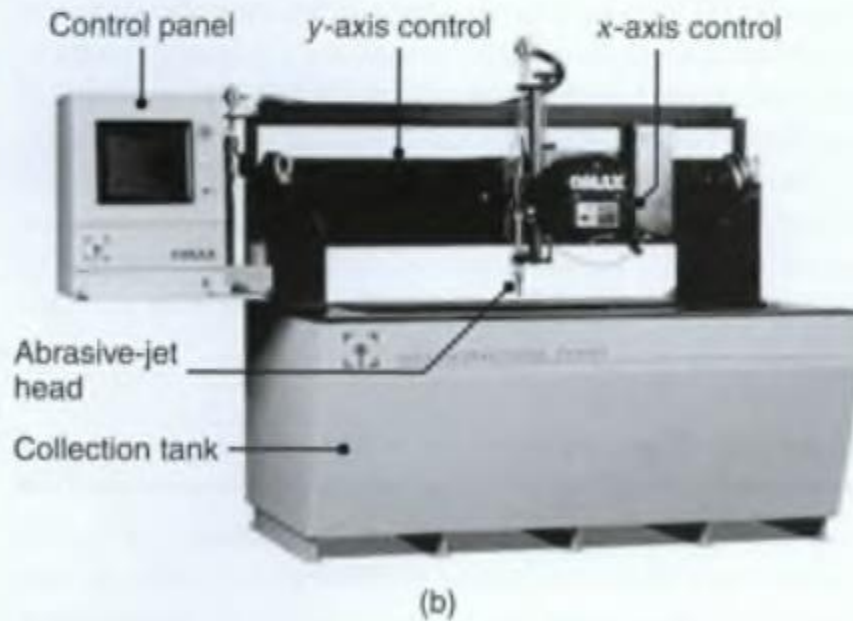
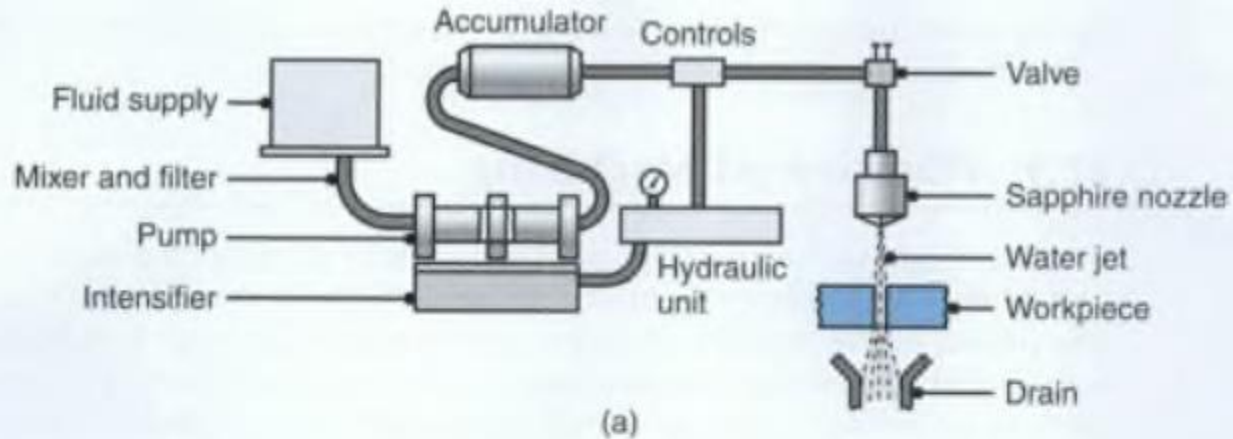


FIGURE 27.18 (a) Schematic illustration of the water-jet machining process. (b) A computer-controlled water-jet cutting machine. (c) Examples of various nonmetallic parts produced by the water-jet cutting process. *Source:* Courtesy of OMAX Corporation.



Uma grande variedade de materiais pode ser cortada, incluindo plásticos, tecidos, borracha, produtos de madeira, papel, couro, materiais isolantes e materiais compostos.

Um nível de pressão adequado é utilizado, com bicos injetores com diâmetros que variam entre 0,05 e 1 mm.

As vantagens do WJM são:


- Os cortes podem ser iniciados em qualquer local sem a necessidade de furação prévia;
- Não é produzido calor;
- Não ocorre deflexão do restante da peça, portanto, o processo é adequado para materiais flexíveis;
- A rebarba produzida é mínima;

Usinagem por jato de água abrasivo.

Na usinagem por jato de água abrasivo (AWJM), o jato de água contém partículas abrasivas, como carboneto de silício ou óxido de alumínio, que aumentam bastante a taxa de remoção de material.

Materiais compostos metálicos, não metálicos e avançados de várias espessuras, em camada única ou multicamadas, podem ser cortados.

O nível ideal de abrasivos presentes no fluxo do jato é controlado automaticamente. Os bicos normalmente são feitos de rubis, safiras e diamante.



O processo de usinagem com jato de água abrasivo é particularmente adequado para materiais sensíveis ao calor que não podem ser usinados por processos convencionais.

As velocidades de corte podem chegar a 7,5 m/min para plásticos reforçados, mas são muito menores para metais; conseqüentemente, o processo pode não ser econômico para aplicações que exigem altas taxas de produção.

Furos de 400µm podem ser realizados, com profundidades de 25 mm.

Com máquinas CNC de eixos múltiplos, peças tridimensionais complexas podem ser usinadas, com tolerâncias estreitas.



Usinagem por jato abrasivo

- Na usinagem por jato abrasivo (AJM), as partículas abrasivas são impulsionadas na superfície da peça por um jato de alta velocidade de ar seco, nitrogênio ou dióxido de carbono.

O impacto das partículas desenvolve uma força concentrada, suficientemente alta para remover o material, para:

- Usinar pequenos orifícios, ranhuras ou padrões complexos em materiais metálicos e não metálicos, muito duros ou quebradiços;
- Rebarbação de peças;
- Chanfrar peças;
- Limpar peças com superfícies irregulares.

A velocidade do jato pode chegar a 300 m/s. Os bicos são geralmente feitos de carboneto de tungstênio ou safira, ambos com resistência ao desgaste abrasivo.

O tamanho do abrasivo está na faixa de 10 a 50 μm . Como o fluxo dos abrasivos livres tende a arredondar os cantos, os projetos de usinagem com jato abrasivo devem



A velocidade do jato pode chegar a 300 m/s.

Os bicos são geralmente feitos de carboneto de tungstênio ou safira, ambos com resistência ao desgaste abrasivo.

O tamanho do abrasivo está na faixa de 10 a 50 μm .

Como o fluxo do abrasivo tende a arredondar os cantos, os projetos de usinagem com jato abrasivo devem evitar cantos afiados.

Os furos feitos tendem a ser cônicos, porque os abrasivos atuam mais intensamente na entrada.

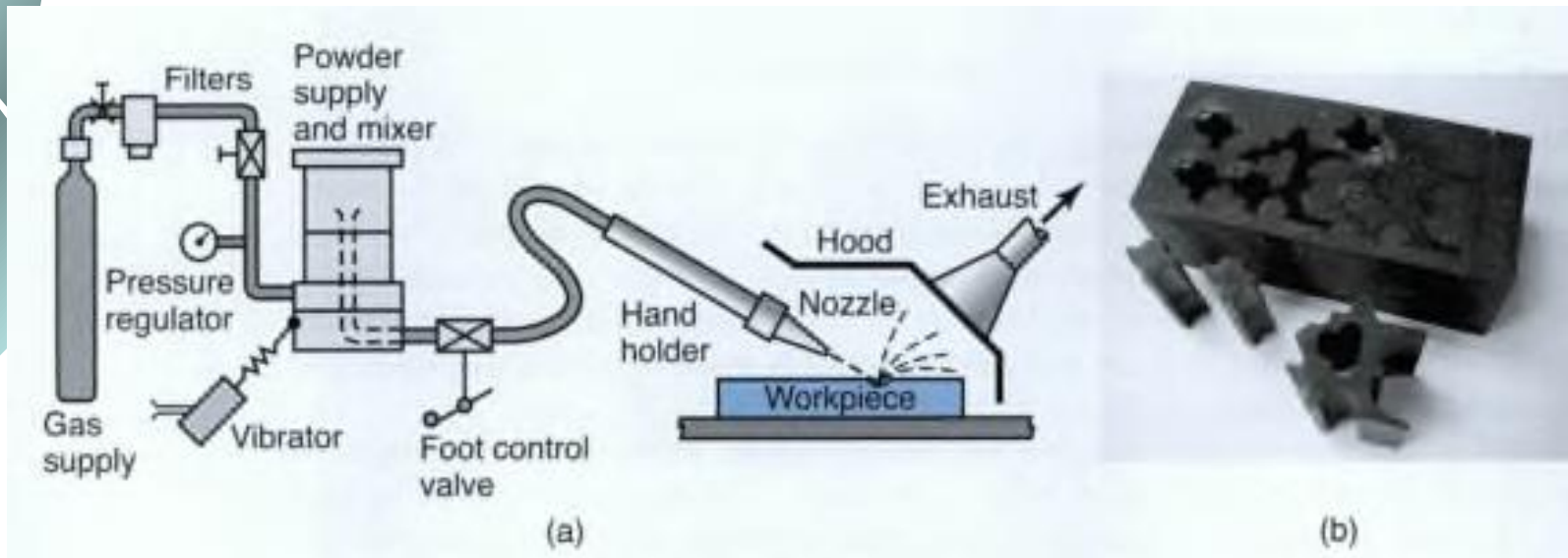


FIGURE 27.19 (a) Schematic illustration of the abrasive-jet machining process. (b) Examples of parts made by abrasive-jet machining, produced in 50-mm thick 304 stainless steel. *Source:* Courtesy of OMAX Corporation.



Sistemas Híbridos de Usinagem


Desenvolvimentos mais recentes nos processos de remoção de material envolvem o conceito de sistemas de usinagem híbridos.

- Dois ou mais processos de usinagem individuais são combinados em um sistema, aproveitando as capacidades de cada processo, aumentando a velocidade de produção e, assim, melhorando a eficiência da operação.

O sistema é capaz de lidar com uma variedade de materiais, incluindo metais, cerâmica, polímeros e compósitos.

Exemplos de sistemas de usinagem híbridos incluem combinações e integração dos seguintes processos:

1. Usinagem abrasiva e usinagem eletroquímica
2. Usinagem abrasiva e usinagem por descarga elétrica
3. Usinagem abrasiva e acabamento eletroquímico
4. Corte por jato de água e fio EDM
- 5. Fresamento de alta velocidade, ablação a laser e jateamento abrasivo, como exemplo de três processos integrados
6. Usinagem e jateamento
7. Usinagem eletroquímica e usinagem por descarga elétrica (ECDM), também chamada de usinagem eletroquímica de fcentelhas (ECSM)
8. Processos de usinagem e conformação, como corte a laser e perfuração de chapas;
9. Combinações de vários outros processos de moldagem, usinagem e união



A implementação desses conceitos e o desenvolvimento de máquinas e sistemas de controle apropriados apresentam desafios significativos.

Considerações importantes incluem fatores como:

1. O material da peça e suas características de fabricação;
2. Compatibilidade dos parâmetros de processamento entre os dois ou mais processos a serem integrados, como velocidade, tamanho, força, energia e temperatura;
3. Tempos de ciclo de cada operação individual envolvida e sua sincronização
4. Considerações de segurança e possíveis efeitos adversos da presença de vários elementos, como abrasivos, produtos químicos, partículas de desgaste, cavacos e contaminantes na operação geral
5. Consequência de uma falha em uma das etapas do sistema, uma vez que a operação envolve processos seqüenciais.

Economia dos processos avançados de usinagem

Os processos avançados de usinagem têm aplicações exclusivas e são úteis principalmente para materiais difíceis de usinar e para peças com perfis internos e externos complexos.

A produção econômica executada para um processo específico depende de fatores como

- (a) custos de ferramentas e equipamentos;
- (b) custos operacionais;
- (c) taxa de remoção de material necessária;
- (d) nível de habilidade do operador necessário;
- (e) operações secundárias e de acabamento que posteriormente podem ser necessárias.

CASE STUDY Manufacture of Small Satellites


Os satélites construídos início da Era Espacial (1960) eram muito grandes e aqueles com menos de 1000 kg eram muito raros.

A Tabela 27.3 mostra a classificação dos satélites modernos por sua massa.

TABLE 27.3

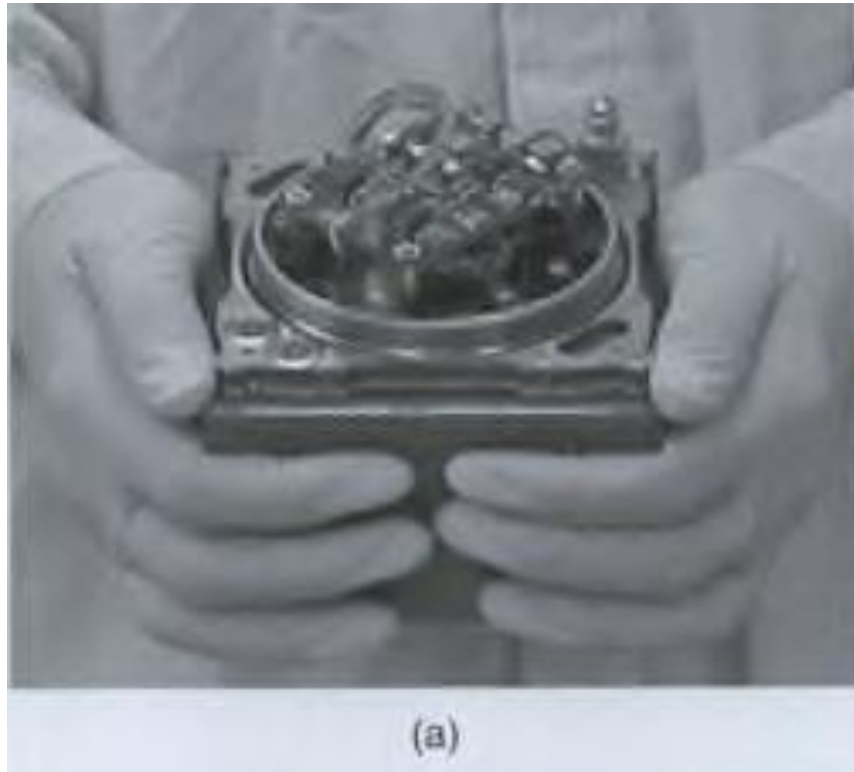
Satellite Classification

Group name	Mass
	kg or g
Large satellite	>1000 kg
Medium satellite	500–1000
Minisatellite	100–500
Small satellites	
Microsatellite	10–100
Nanosatellite	1–10
Picosatellite	0.1–1
Femtosatellite	<100 g



Um dos principais equipamentos de maior massa em um satélite é o sistema de propulsão, essencial para mudar sua órbita ou corrigir desvios.

- A Figura mostra o sistema de propulsão para um microssatélite,



Componentes do sistema de propulsão são mostrados na Figura. A produção dessas peças em miniatura seria difícil através de fundição ou usinagem.





(a)



(b)



(c)

A Figura mostra a sequência de fabricação envolvida. O titânio é comumente usado para componentes do sistema de propulsão, porque possui uma alta relação resistência / peso, possibilitando projetos leves. Esses sistemas totalmente integrados resultaram na produção de sistemas de propulsão por satélite que são menos complexos, mais robustos e com menos massa.