

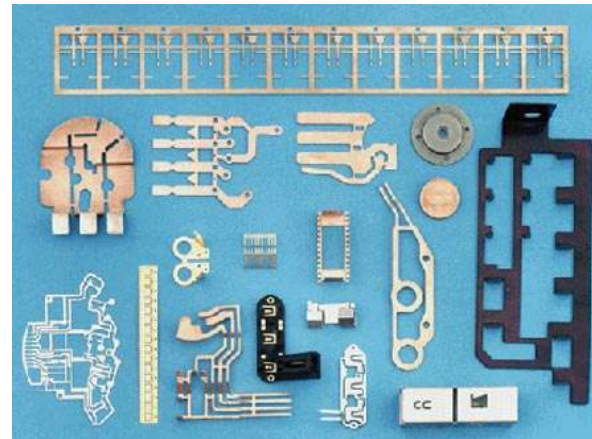
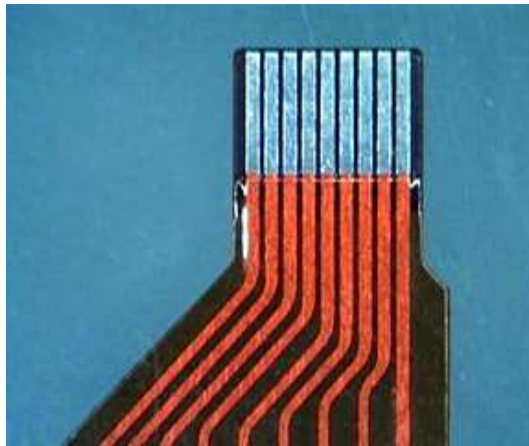
Aula 23

Usinagem com Ferramentas de Geometria Não Definida

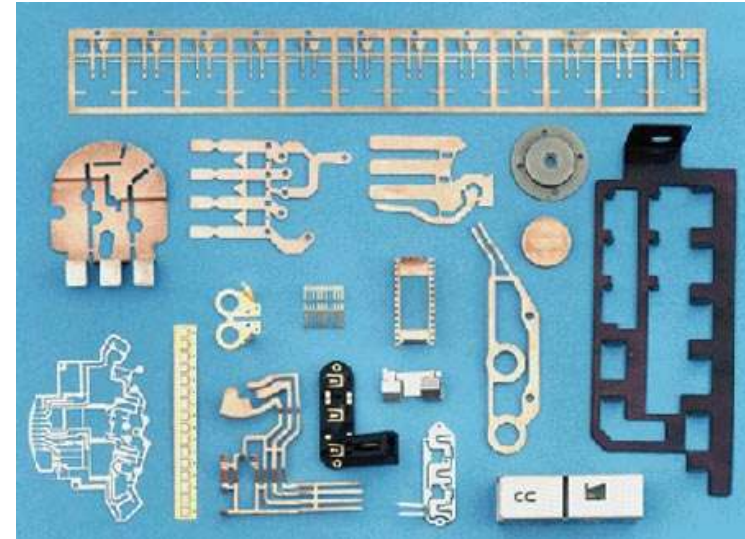
- Brunimento, Lapidação, Polimento, -**
- lixamento e jateamento -**

PROCESSOS NÃO-COVENCIONAIS DE USINAGEM

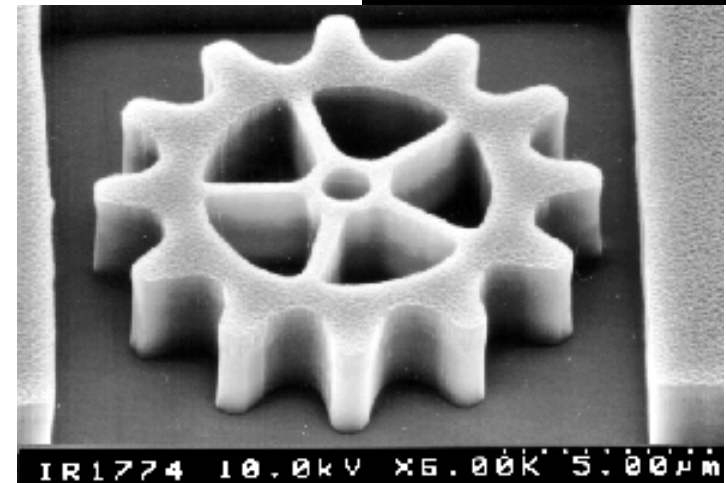
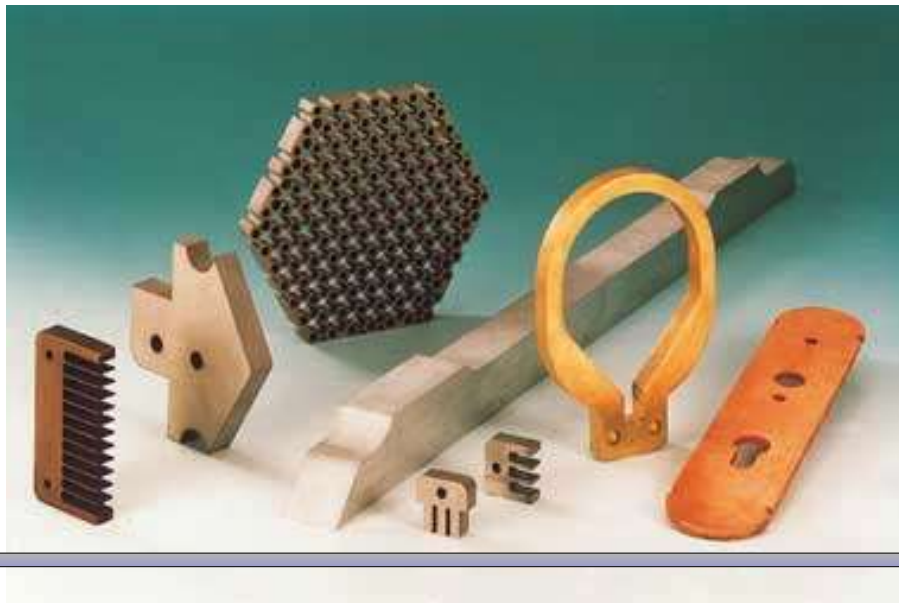
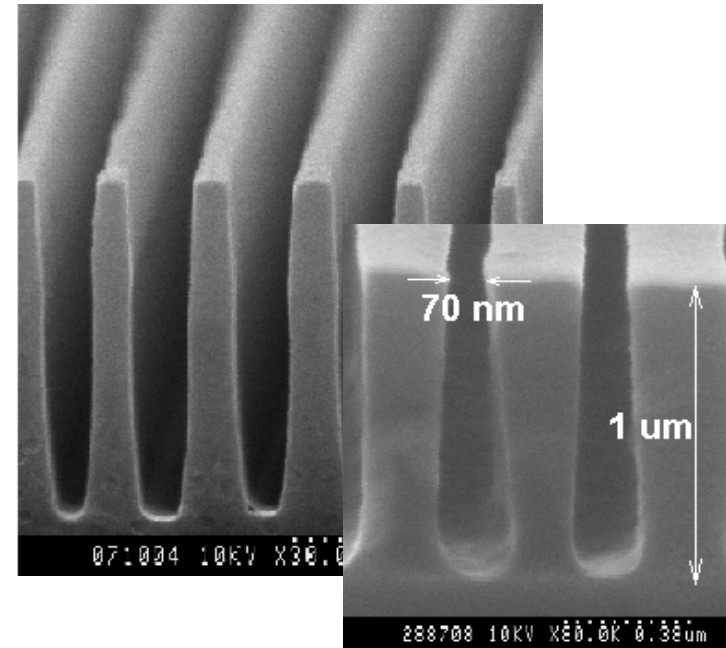
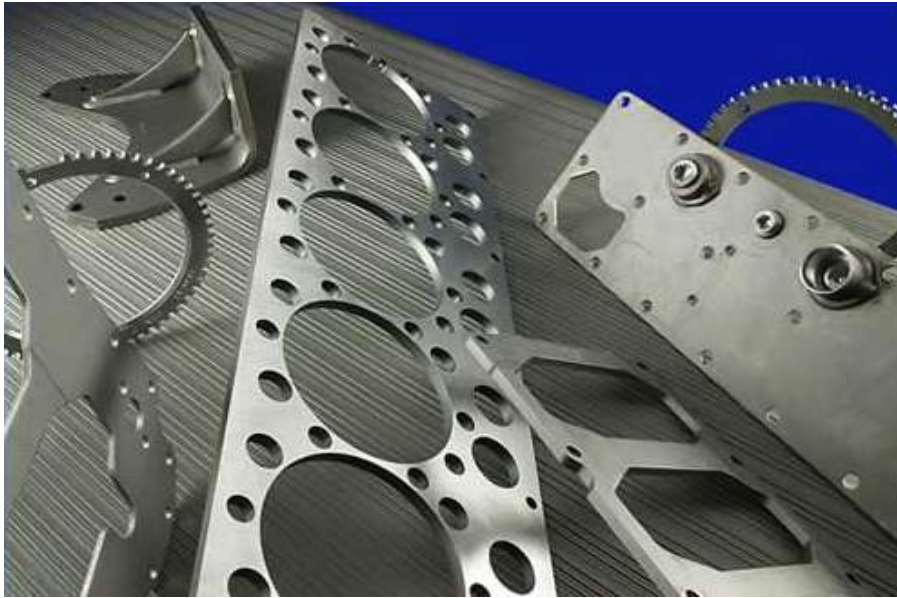
- Usinagem por Laser
- Usinagem por ultrassom
- Usinagem por remoção química
- Usinagem por feixe de elétrons
- Usinagem por jato d'água



Exemplo de peças usinadas por processos não-covencionais



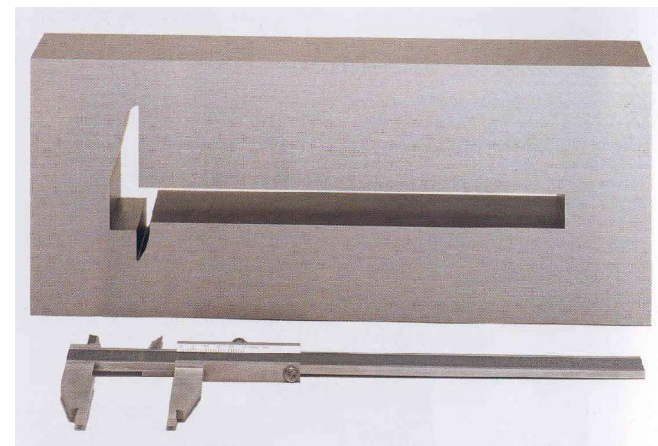
Exemplo de peças usinadas por processos não-covencionais



Usinagem por processos não-convencionais

Introdução

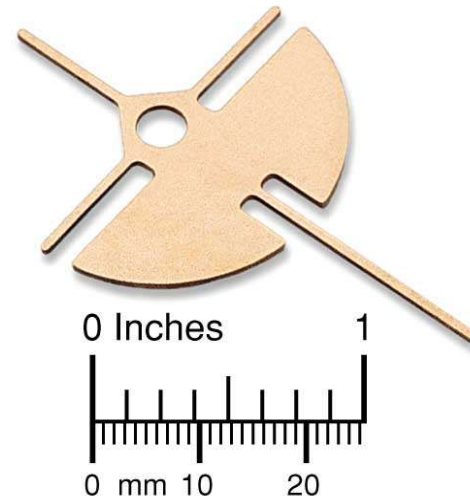
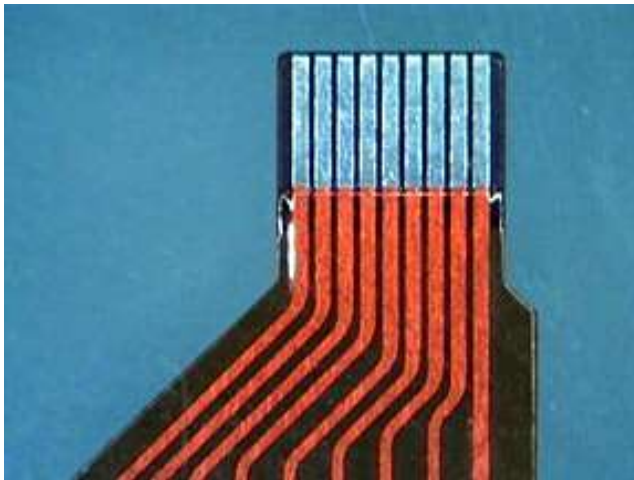
- Remoção de material por processos físicos e químicos
- Utilizado para a usinagem de peças de materiais de difícil usinabilidade e/ou formas geométricas complexas
- Exemplos: usinagem de turbinas de reação, ferramentas de conformação, matrizes de injeção, microfuros em palhetas de turbinas para refrigeração etc



Usinagem por processos não-convencionais

Introdução

- ✓ Eletroerosão por descargas elétricas
 - Remoção eletroquímica - princípio da dissolução anódica, tecnologia dos processos, processos especiais e combinados, rebarbação e aplicações
 - Remoção química - ataque ácido, remoção termoquímica



Remoção Química



Remoção Química

Princípio

- Baseado na reação química entre a peça e um agente
- Resulta num produto volátil, solúvel ou de fácil remoção
- Ao menos um ou ambos os parceiros de reação são não condutores de eletricidade

Exemplo: Corrosão ácida

- ⇒ Gravação em vidro, com a qual é possível ornamentar e gravar letras em vitrines com auxílio de ácido fluorídrico
 - ⇒ Com solução aquosa de ácido fluorídrico as superfícies permanecem claras e transparentes
 - ⇒ A aplicação sob a forma gasosa tornam as superfícies opacas
-

Remoção Termo Química

Exemplo: Corrosão termo química

- ⇒ Processo no qual as rebarbas em peças metálicas ou não-metálicas são removidas em uma atmosfera de oxigênio (oxidação)
 - ⇒ As peças são colocadas numa campânula que é enchida com uma mistura de oxigênio e hidrogênio, e então acesa por uma centelha
 - ⇒ Nas rebarbas se atingem as temperaturas necessárias à queima
 - ⇒ Após a rebarbação, as peças são revestidas por uma fina camada de óxido oriunda da combustão
 - ⇒ Os custos operacionais são proporcionais ao consumo de gás
 - ⇒ A rebarbação química é empregada tanto na fabricação em séries como na de peças isoladas
-

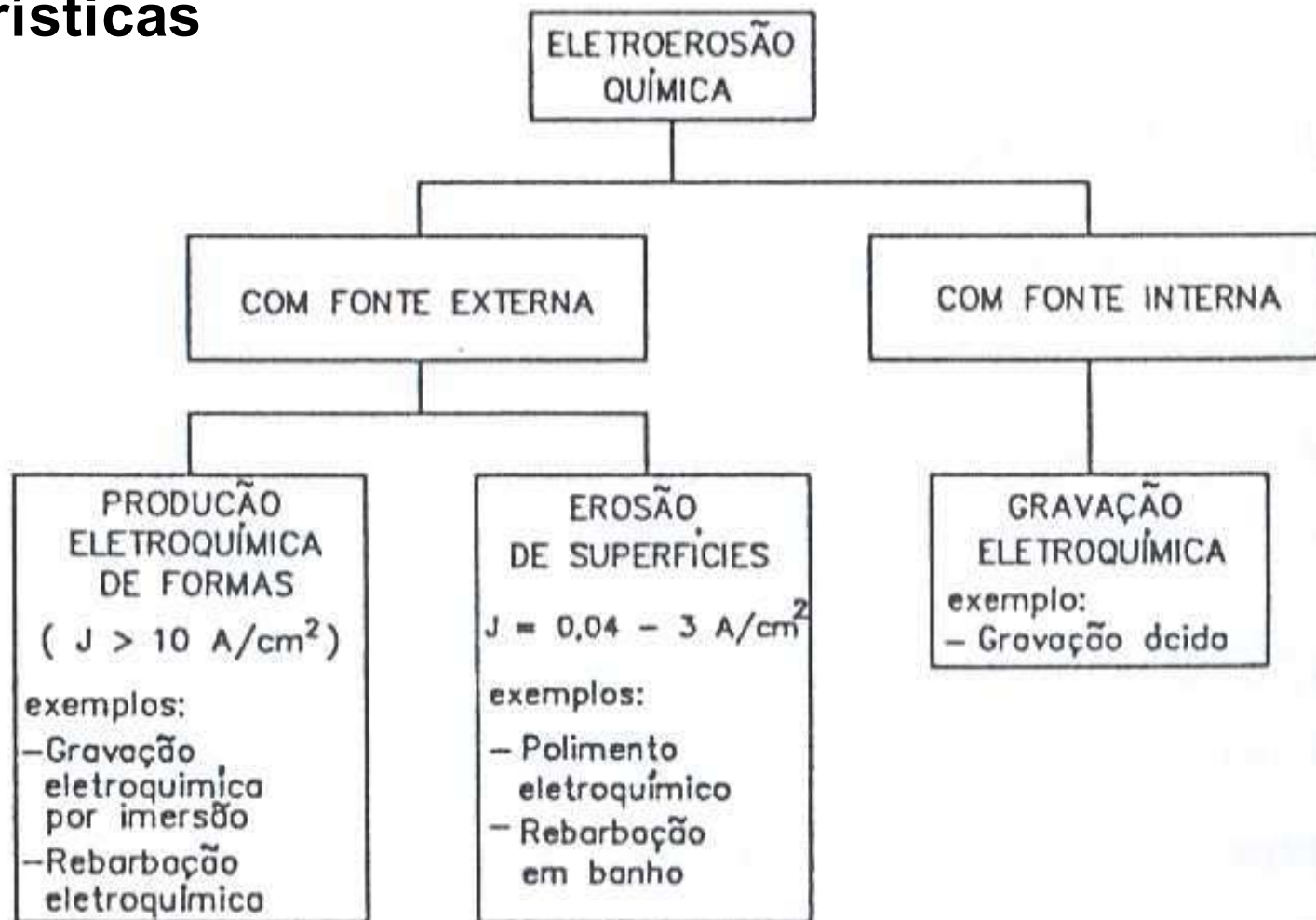
Remoção Eletroerosão Química

Características

- Baseado na reação eletroquímica entre um material metálico e um meio de ação, dissociado ionicamente e condutor de eletricidade sob a ação de uma corrente elétrica
 - Resulta na formação de um produto solúvel no meio da reação o qual precipita no meio da ação
 - A alimentação pode ocorrer por fontes externas ou por uma fonte interna
 - Processo marcado pela dificuldade em se trabalhar materiais cada vez mais resistentes e formas complexas
-

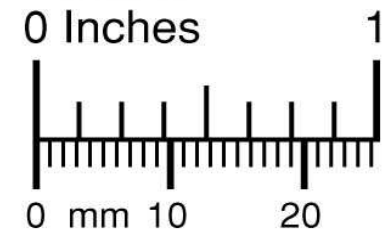
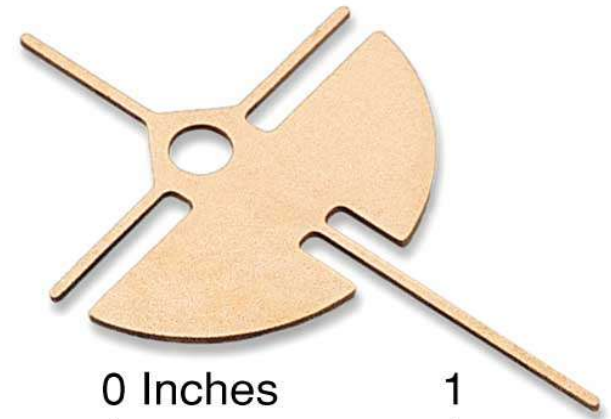
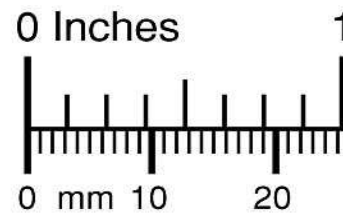
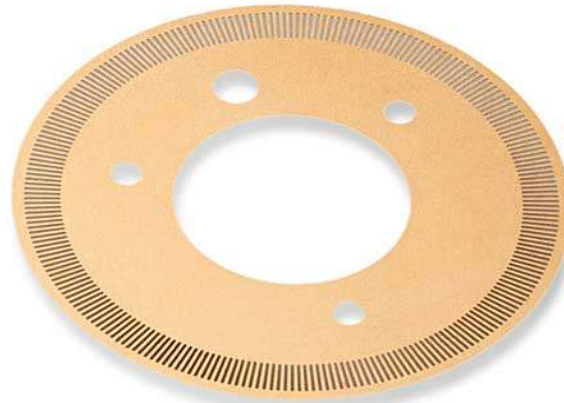
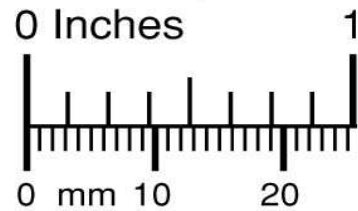
Remoção Eletroerosão Química

Características



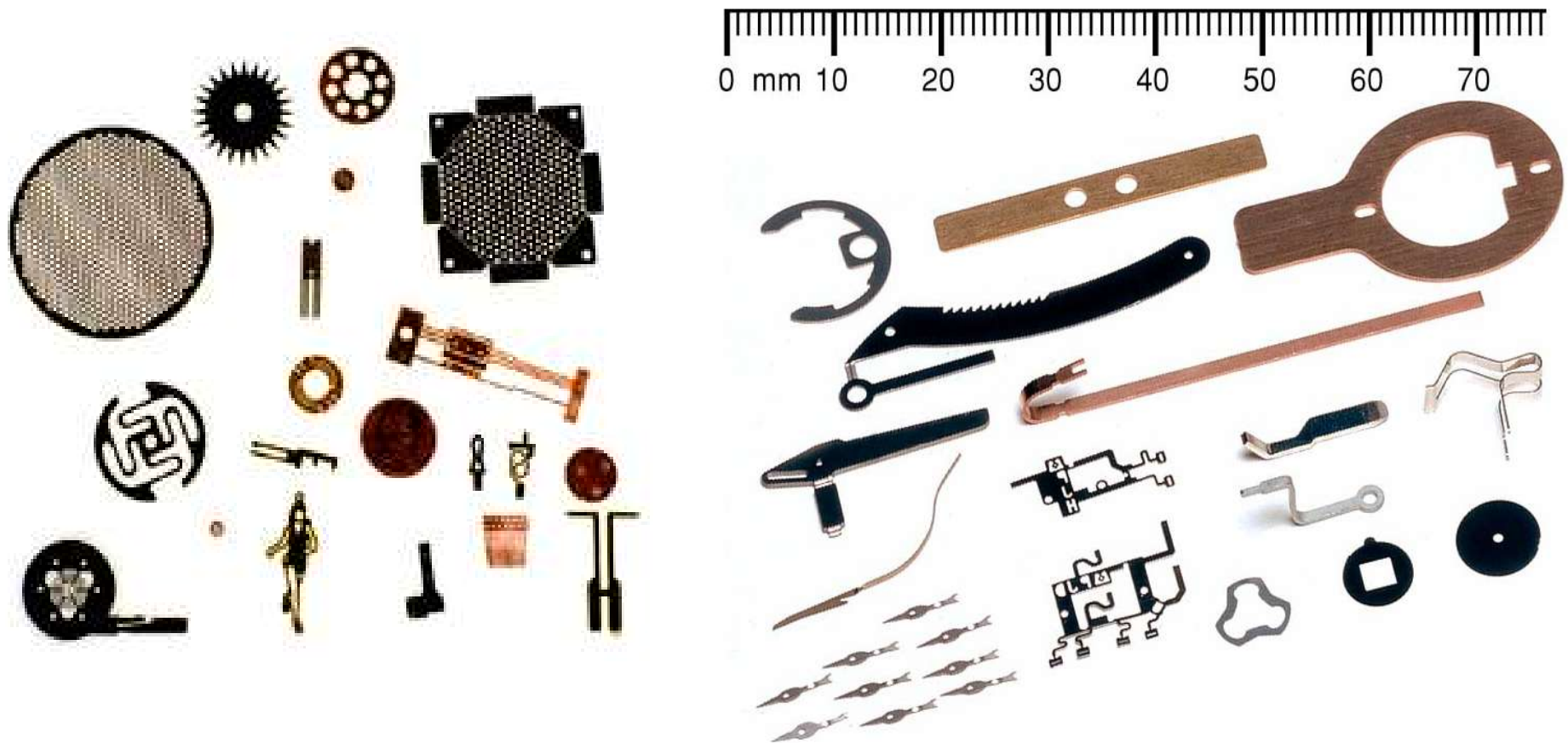
Remoção Eletroerosão Química

Exemplos



Remoção Eletroerosão Química

Exemplos



Remoção Eletroerosão Química

Aplicação

- Erosão de materiais de difícil usinabilidade
 - Confecção de formas geométricas complicadas
 - Inexistência de desgaste decorrente do próprio processo
 - Nenhuma influência térmica ou mecânica da estrutura da camada limite do material da peça
-

Remoção Eletroerosão Química

Vantagens

- Repetibilidade e elevada precisão
 - Inexistência de rebarbas
 - Bom acabamento superficial da peça, mesmo para taxas de remoção elevada
 - Elevada liberdade no projeto no que diz respeito a escolha do material e da geometria a ser reproduzida
-

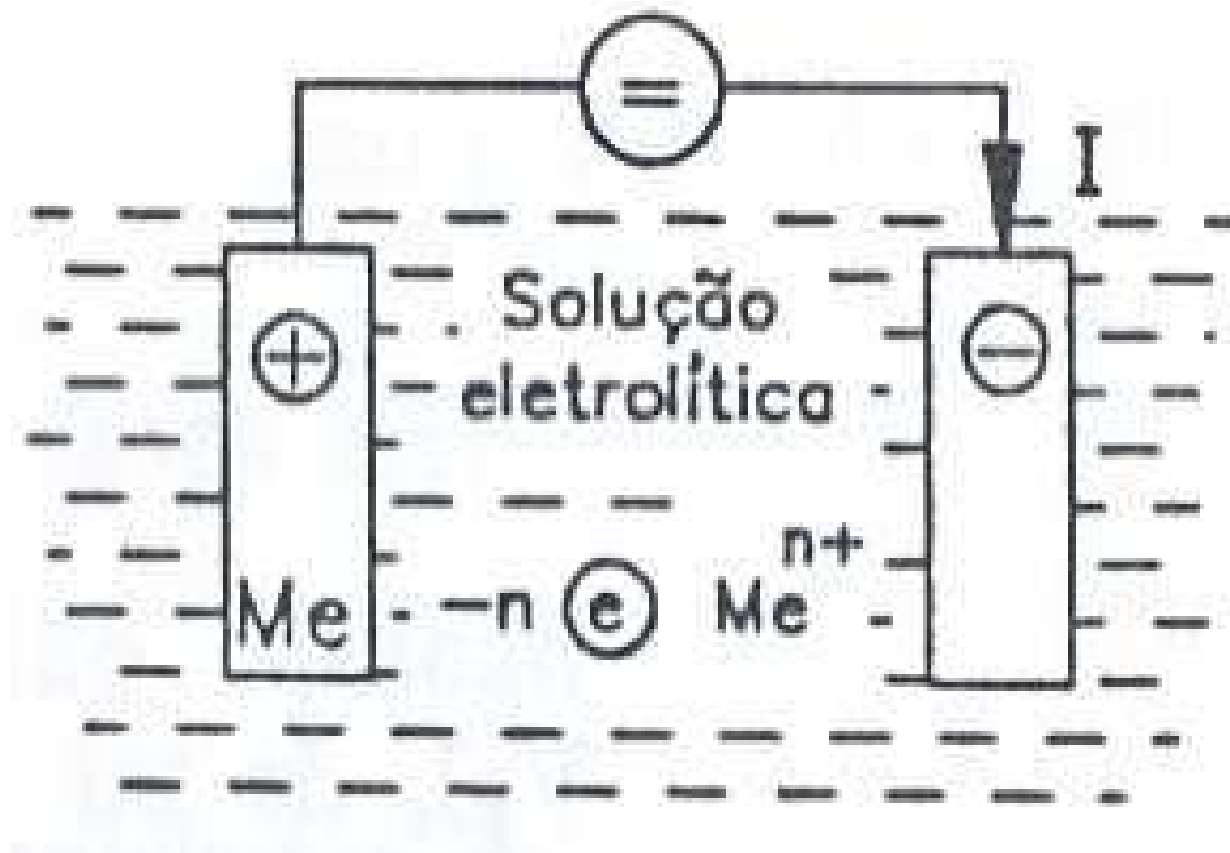
Remoção Eletroerosão Química

Eletrólitos

- ⇒ Função de transporte dos transportadores de carga e promover uma conversão eletroquímica nos eletrodos durante a eletrólise
 - ⇒ Exigências que devem ser cumpridas
 - ⇒ Alta estabilidade química, isto é a solubilidade eletrolítica deve manter sua estabilidade de forma durável
 - ⇒ Pouca ação corrosiva sobre os parceiros de reação
 - ⇒ Neutralidade fisiológica em relação aos operadores
 - ⇒ Baixo custo
 - ⇒ Deve-se garantir a exaustão de gases venenosos decorrentes da evaporação do eletrólito
-

Remoção Eletroerosão Química

Princípio de funcionamento



Remoção Eletroerosão Química

Eletrólitos - Solubilidade de uma solução eletrolítica

- ⇒ do tipo e da composição do eletrólito
- ⇒ da concentração e da temperatura
- ⇒ da quantidade de hidrogênio desenvolvida no cátodo
- ⇒ do tipo dos produtos de remoção

Soluções eletrolíticas usuais

- ⇒ NaCl
 - ⇒ Soluções de nitratos NaNO_3
-

Remoção Eletroerosão Química

Eletroerosão Química por imersão

- ⇒ A ferramenta catódica é imergida com velocidade constante para dentro da peça
 - ⇒ Forma-se uma fenda entre a ferramenta e a peça, através do qual o eletrólito flui com alta velocidade, removendo os produtos da reação e o calor formado pelo aquecimento
 - ⇒ Deve-se garantir a constância da condutividade do eletrólito para garantir uma precisão dimensional elevada nas peças
-

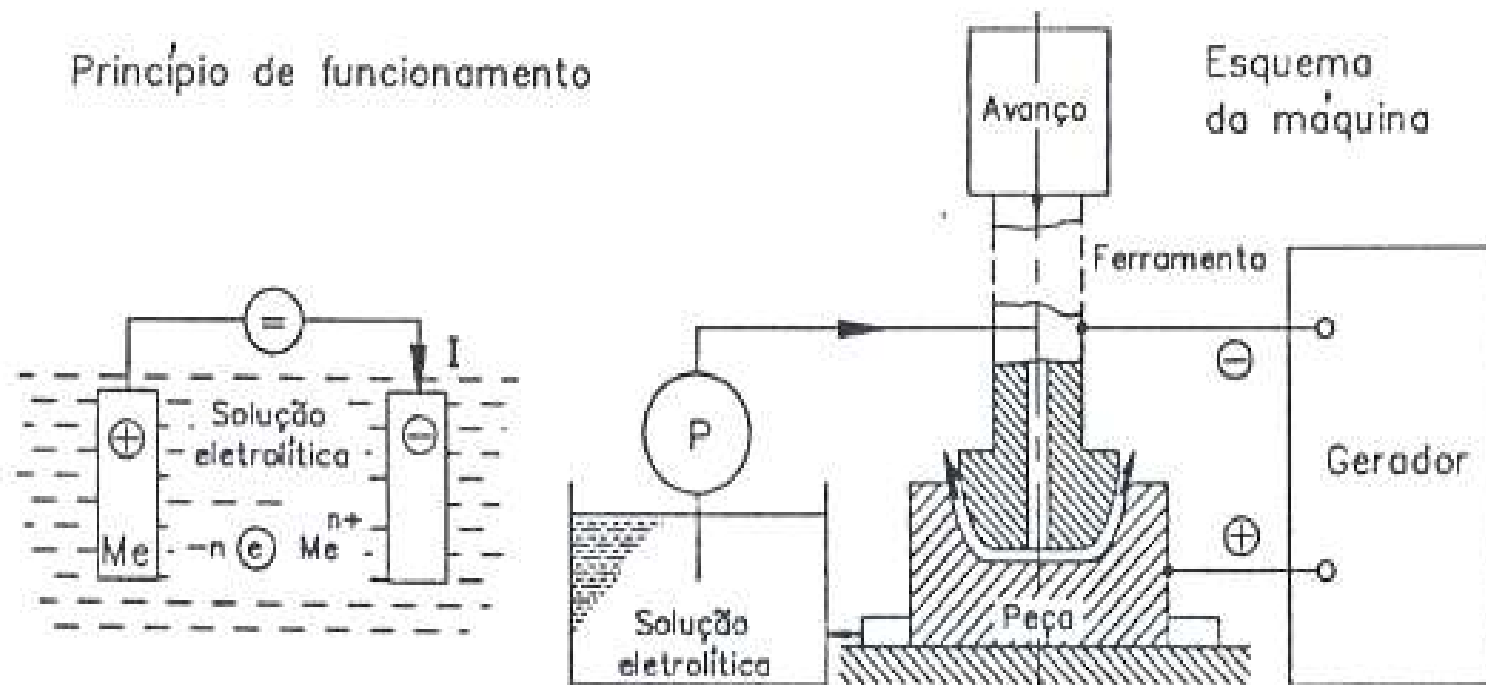
Remoção Eletroerosão Química

Eletroerosão Química por imersão

- A ferramenta catódica é imergida com velocidade constante para dentro da peça
 - Forma-se uma fenda entre a ferramenta e a peça, através do qual o eletrólito flui com alta velocidade, removendo os produtos da reação e o calor formado pelo aquecimento
 - Deve-se garantir a constância da condutividade do eletrólito para garantir uma precisão dimensional elevada nas peças
-

Eletroerosão Química por imersão

➤ Princípio de funcionamento

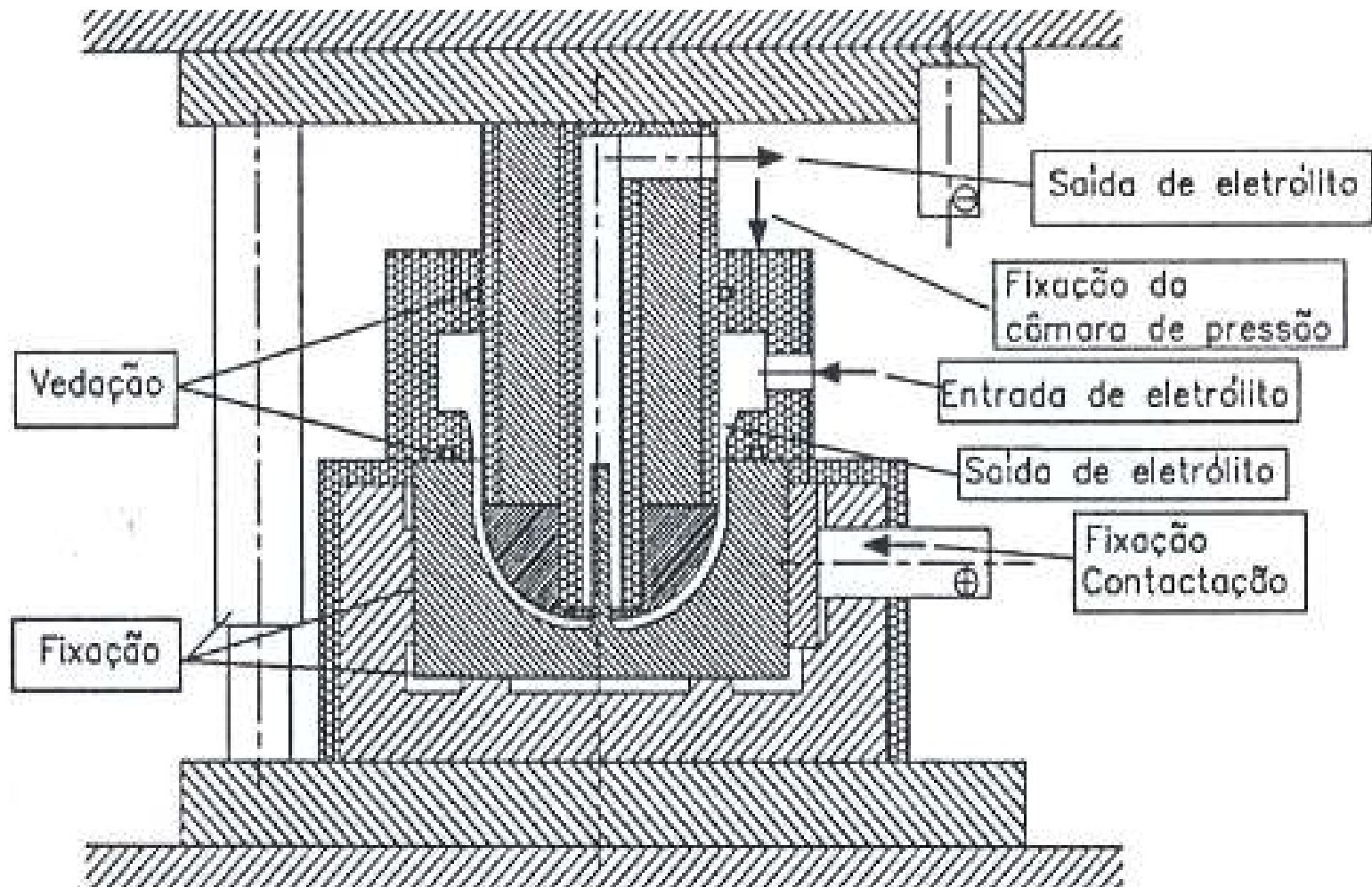


Eletroerosão Química por imersão

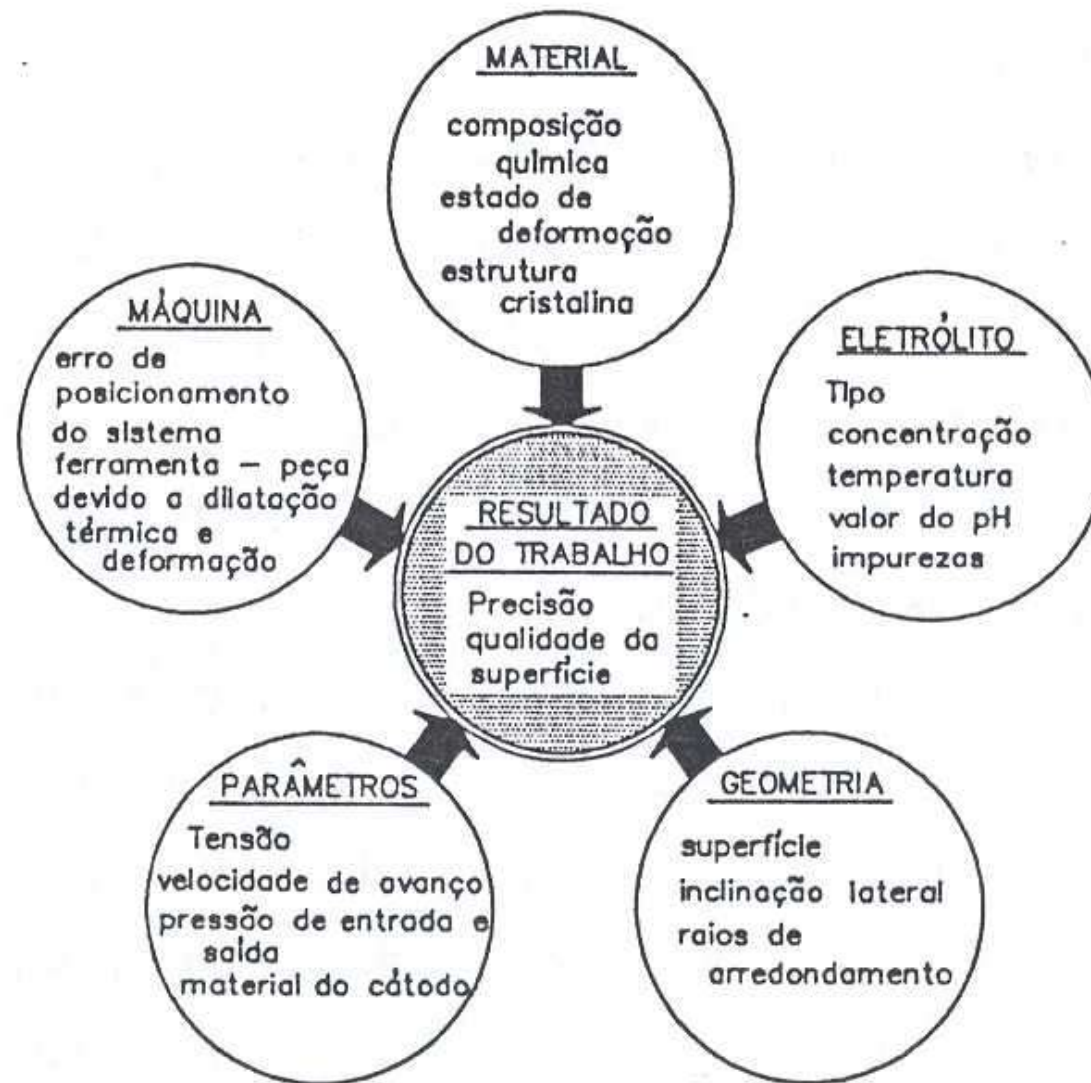
- Eletrodo, dispositivos e ferramentas
 - O eletrodo ferramenta é confeccionado respeitando-se a fenda de trabalho decorrente do processo para produzir a imagem na peça
 - Basicamente todos os metais condutores de eletricidade podem ser empregados na fabricação de eletrodos ferramenta
 - A escolha do material deverá ser função da:
 - ⇒ Condutividade elétrica
 - ⇒ Resistência mecânica
 - ⇒ Usinabilidade
 - Cobre e grafite são empregados preferencialmente
-

Eletroerosão Química por imersão

➤ Eletrodo, dispositivos e ferramentas



Influência sobre o Resultado de Trabalho na Eletroerosão Química

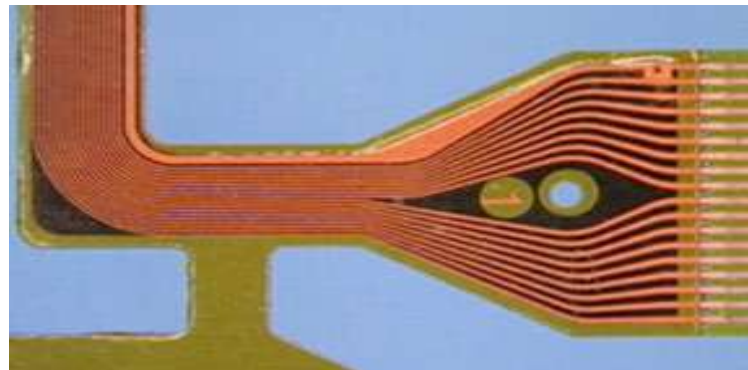
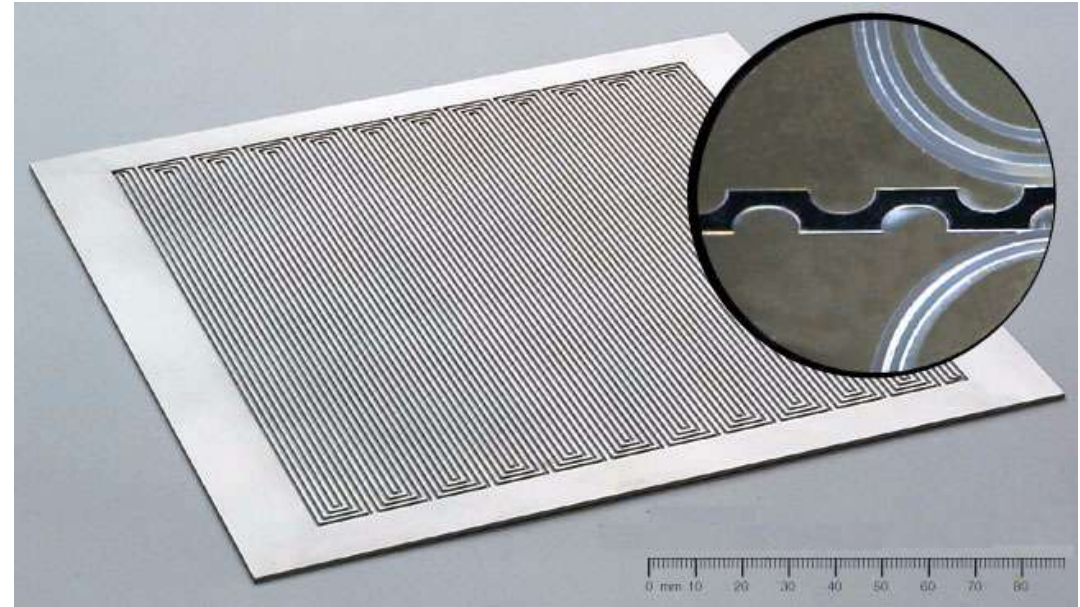
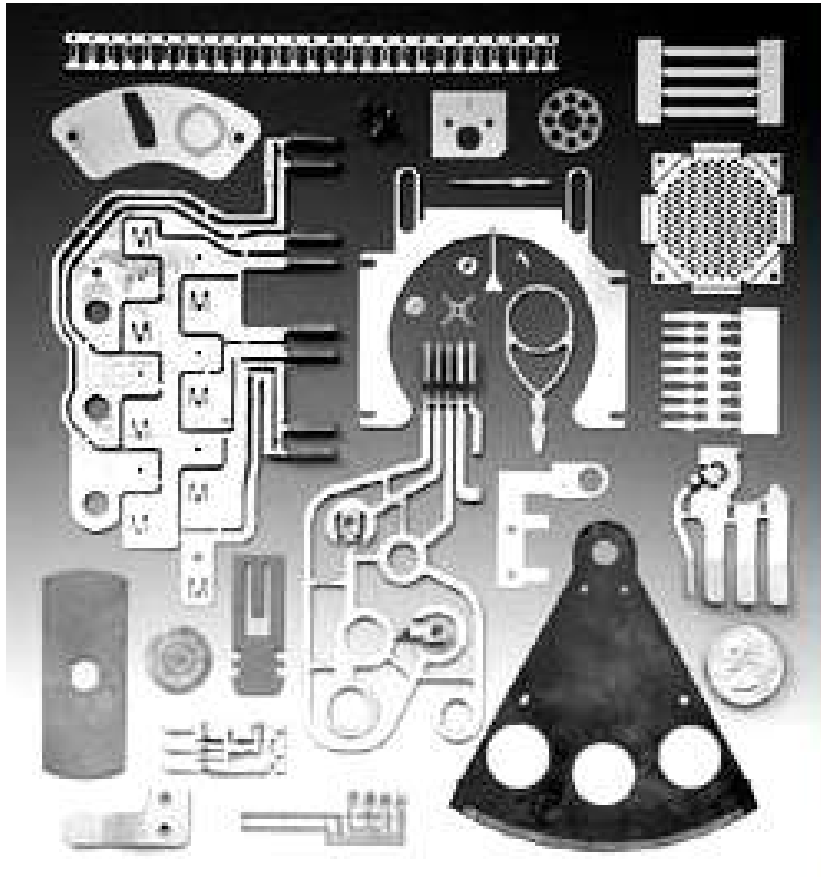


Processos Especiais de Eletroerosão Química

- Rebarbação eletroquímica
 - Torneamento eletroquímico
 - Retífica eletroquímica
 - Brunimento eletroquímico
 - Lapidação eletroquímica
 - Remoção eletroquímica superficial
 - Polimento eletroquímico
 - Demetalização eletroquímica
 - Decapagem eletroquímica
 - Ataque metalográfico eletroquímico
-

Processos Especiais de Eletroerosão Química

➤ Exemplos:



Usinagem por Ultrasom



Usinagem por Ultrasom

Generalidades

- Processo conhecido como usinagem por ultrasom, lapidação ultrasônica ou erosão ultrasônica
 - Utilizado em usinagem de materiais frágeis e duros
 - Exemplos de materiais de peça: vidro, cerâmica técnica, metal duro, grafite, silício etc.
 - Tem a finalidade de produzir superfícies tridimensionais
 - Aplicações: componentes de joalheria, plaquetas de circuitos eletrônicos, furos em insertos para alocação de sensores etc.
-

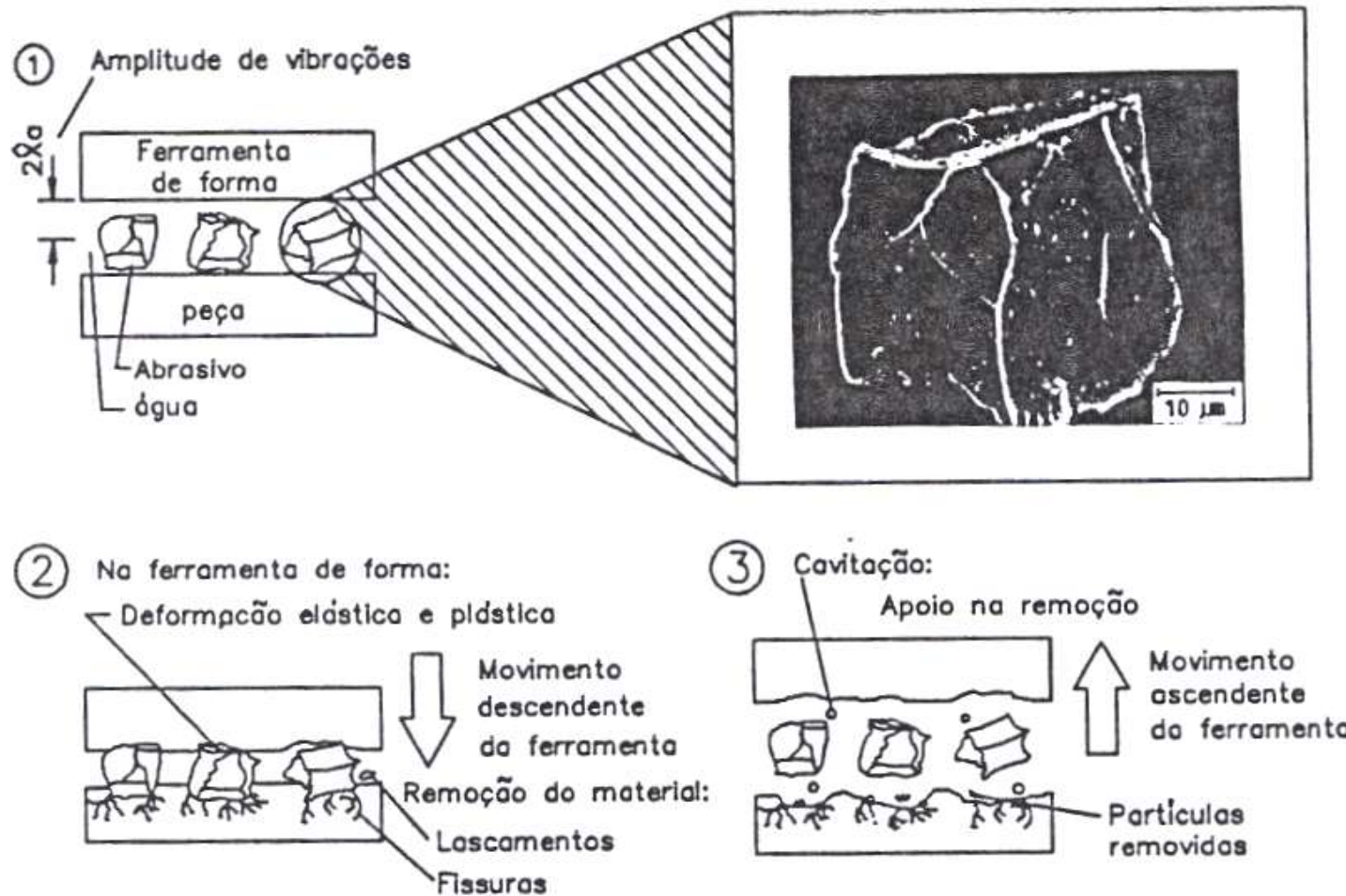
Usinagem por Ultrasom

Generalidades

- Utilização de grãos abrasivos (carboneto de boro, carboneto de silício etc.) em solução aquosa
 - Excitação dos grãos pela da ferramenta de forma, que vibra ultrasonicamente através da utilização de sonotrodos e transdutores
 - O indentamento dos grãos sobre a superfície da peça gera sobre esta microlascamentos e microfissuras, que somadas no tempo levam à remoção de suas partículas
-

Usinagem por Ultrasom

Generalidades



Usinagem por Ultrasom

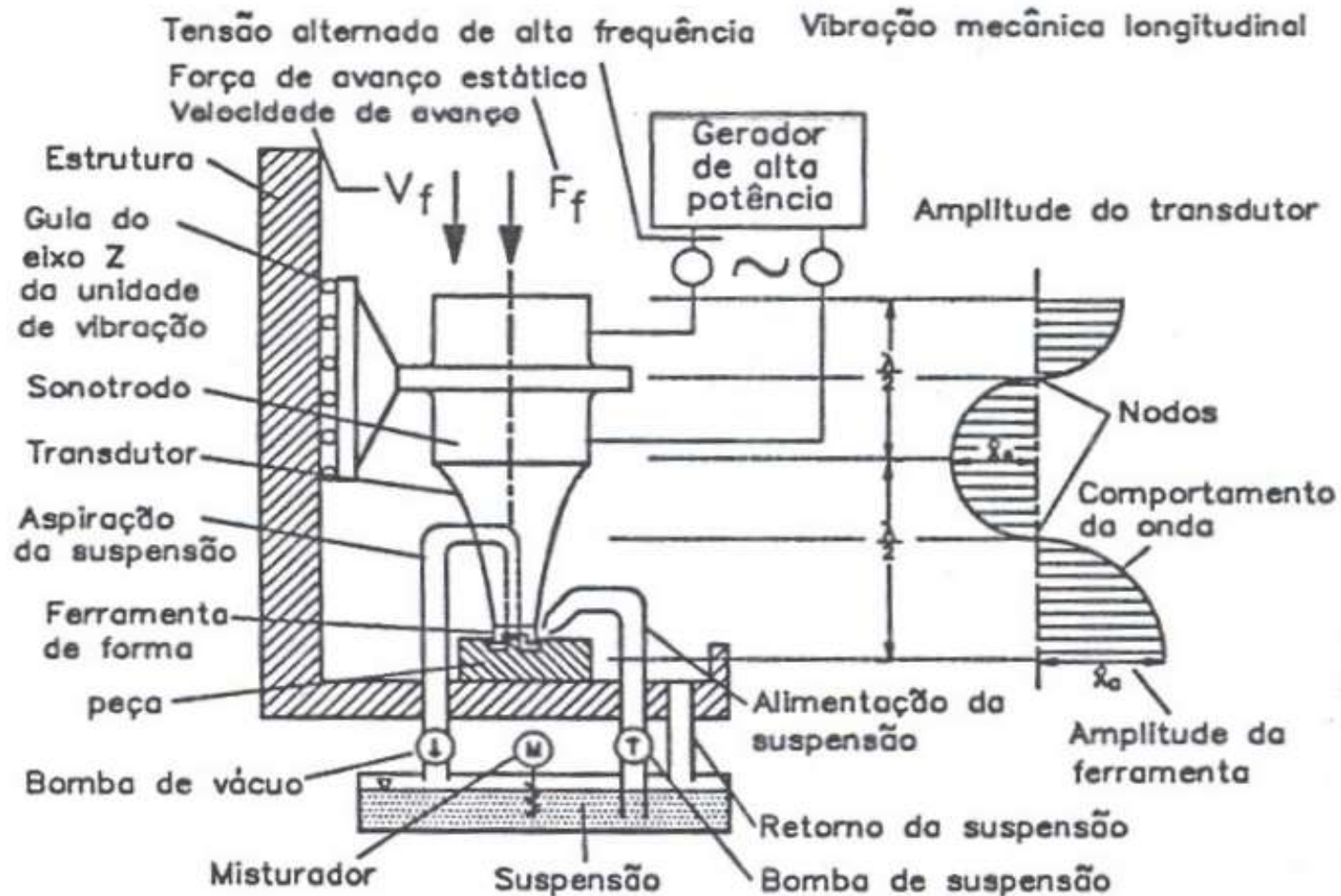
Generalidades

Estrutura do cristal: Romboédrica	Dureza Knopp: 3000 daN/mm ²
Peso específico: 2,51 g/cm ³	Resistência a compressão: 200 - 300 daN/mm ²
Ponto de fusão: 2450°C	Módulo de elasticidade: 450 kN/mm ²

- Em vista dos altos impactos, os grãos abrasivos devem ter uma dureza superior à do material da peça e alta resistência à quebra
- As ferramentas de forma normalmente são de materiais ferrosos, o que induz suas deformações elástica e plástica
- Materiais mais duros para as ferramentas de corte têm menos desgaste, mas têm custo extremamente elevado

Usinagem por Ultrassom

Princípio do processo



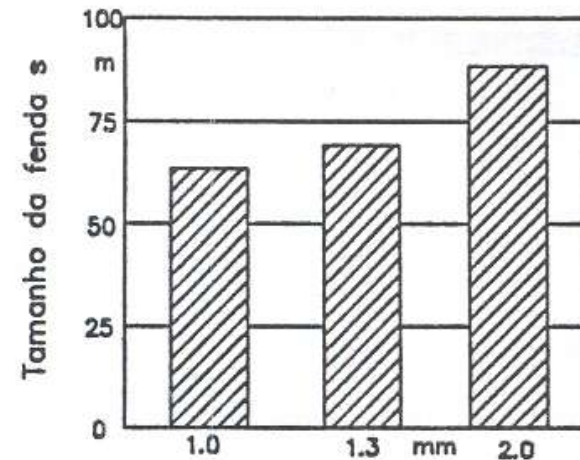
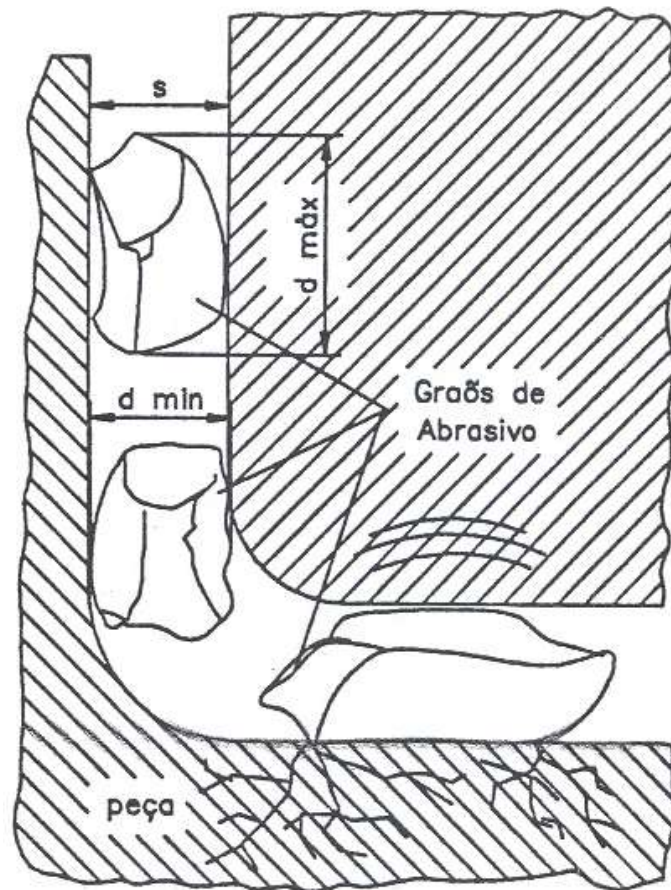
Usinagem por Ultrasom

Princípio do processo

- A ferramenta é excitada por um transdutor, que executa uma vibração longitudinal
 - O meio de lapidação é recirculado e a alimentação do meio de lapidação é feita por uma tubeira colocada lateralmente à ferramenta.
 - A retirada do meio de lapidação e do material removido da peça é feita pela lavação transversal, reversão cíclica da ferramenta de forma (máq. horizontais) ou pela sucção através da própria ferramenta (ferramentas especiais)
-

Usinagem por Ultrasom

Fenda de trabalho



Espessura da parede da ferramenta de forma d

Ferramenta de forma: St 35, ϕ 10 mm
 Peça: Carboneto de Silício infiltrado com silício
 Suspensão: B_4C - 280
 25 % peso em água

Usinagem por Ultrasom

Fenda de trabalho

- A forma reproduzida na peça é a forma negativa da face da ferramenta
 - Para a produção de uma forma geométrica precisa sobre a peça, deve haver uma correção na ferramenta pela fenda de trabalho
 - A amplitude da fenda de trabalho depende principalmente da dimensão dos grãos maiores
 - Os grãos maiores trabalham alinhando-se no sentido da sua menor dimensão, portanto a amplitude da fenda de trabalho deve ser a ela relacionada
-

Usinagem por Ultrasom

Desgaste do Meio de Lapidação

- Caracterizado pela diminuição do tamanho médio dos grãos abrasivos e arredondamento dos seus gumes
 - Tanto o cegamento quanto o lascamento dos gumes dos grãos influem na redução da remoção de material da peça
 - Em vista do acréscimo de dejetos do material da peça e da ferramenta de forma ao meio de lapidação, este deve ser renovado em intervalos regulares
-

Usinagem por Ultrasom

Desgaste da Ferramenta de Forma

- Por ser feita de material dútil, há deformações elástica e plástica da ferramenta de forma, com uma remoção de cavacos muito menor do que da peça, dura e frágil
 - Há desgaste por encruamento e fadiga sobre a face da ferramenta, região mais solicitada
 - A abrasão causa o arredondamento dos cantos e desgaste lateral da ferramenta
-

Tecnologia e Qualidade da Superfície Usinada

- A taxa de remoção depende principalmente das características do material a ser usinado (é possível uma taxa de remoção em vidro muito mais elevada do que em cerâmica técnica, por exemplo)
 - Grãos excessivamente finos induzem a baixas taxas de remoção, em vista da penetração insuficiente no material da peça
 - O aumento da profundidade de remoção gera uma maior fenda de trabalho lateral ao longo de seu comprimento, o que aumenta o percurso de rejeição e alimentação do meio abrasivo, com isso reduzindo a taxa de remoção (pode ser melhorado com sucção do meio de lapidação com ferramentas especiais)
 - Amplitudes de vibração muito pequenas: menor taxa de remoção em função da baixa penetração dos grãos sobre a superfície do material da peça
 - Amplitudes de vibração muito grandes: menor taxa de remoção em função do aumento do percurso sem contato dos grãos com a peça por unidade de tempo
-

Tecnologia e Qualidade da Superfície Usinada

- Forças de avanço muito pequenas: redução da taxa de remoção, dada à diminuição da troca de impulsos entre a ferramenta, grãos abrasivos e superfície trabalhada
 - Forças de avanço muito grandes: esmagamento dos grãos abrasivos e colapso da fenda de trabalho
 - O movimento relativo entre a peça e a ferramenta pode resultar em melhor qualidade de forma do componente usinado
 - Enquanto o fundo do furo é produzido pela face da ferramenta, as laterais são produzidas pela sua superfície lateral. As precisões obteníveis estão na faixa de alguns milésimos de milímetro por milímetro
 - Grandes amplitudes de vibração podem acarretar no maior desgaste lateral da superfície evolvente da ferramenta, o que gera conicidade na superfície evolvente do furo produzido
-

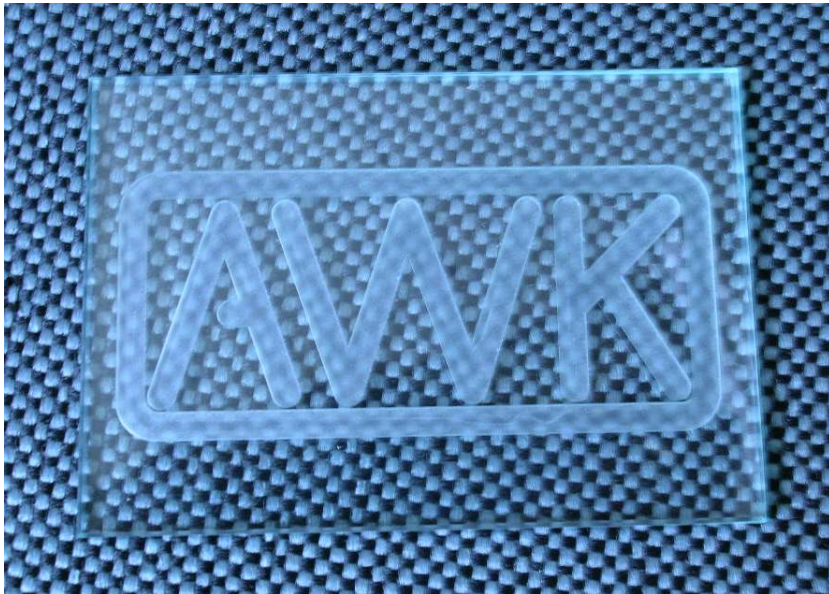
Usinagem por Ultrasom

Exemplos de aplicação

- Usinagem de óxido de alumínio, para a fabricação de circuitos eletrônicos. Os furos produzidos têm diâmetros entre 0,15 e 0,5 mm.
 - Produção de furos com 1 mm de diâmetro e 0,3 mm de profundidade em pastilhas reversíveis para a alocação de termopares
 - Na fabricação de pistões de nitreto de silício compactados a quente, as cavidades opostas às válvulas podem ser feitas com êxito por usinagem ultrasônica
-

Usinagem por Ultrasom

Exemplos de aplicação



Usinagem por LASER



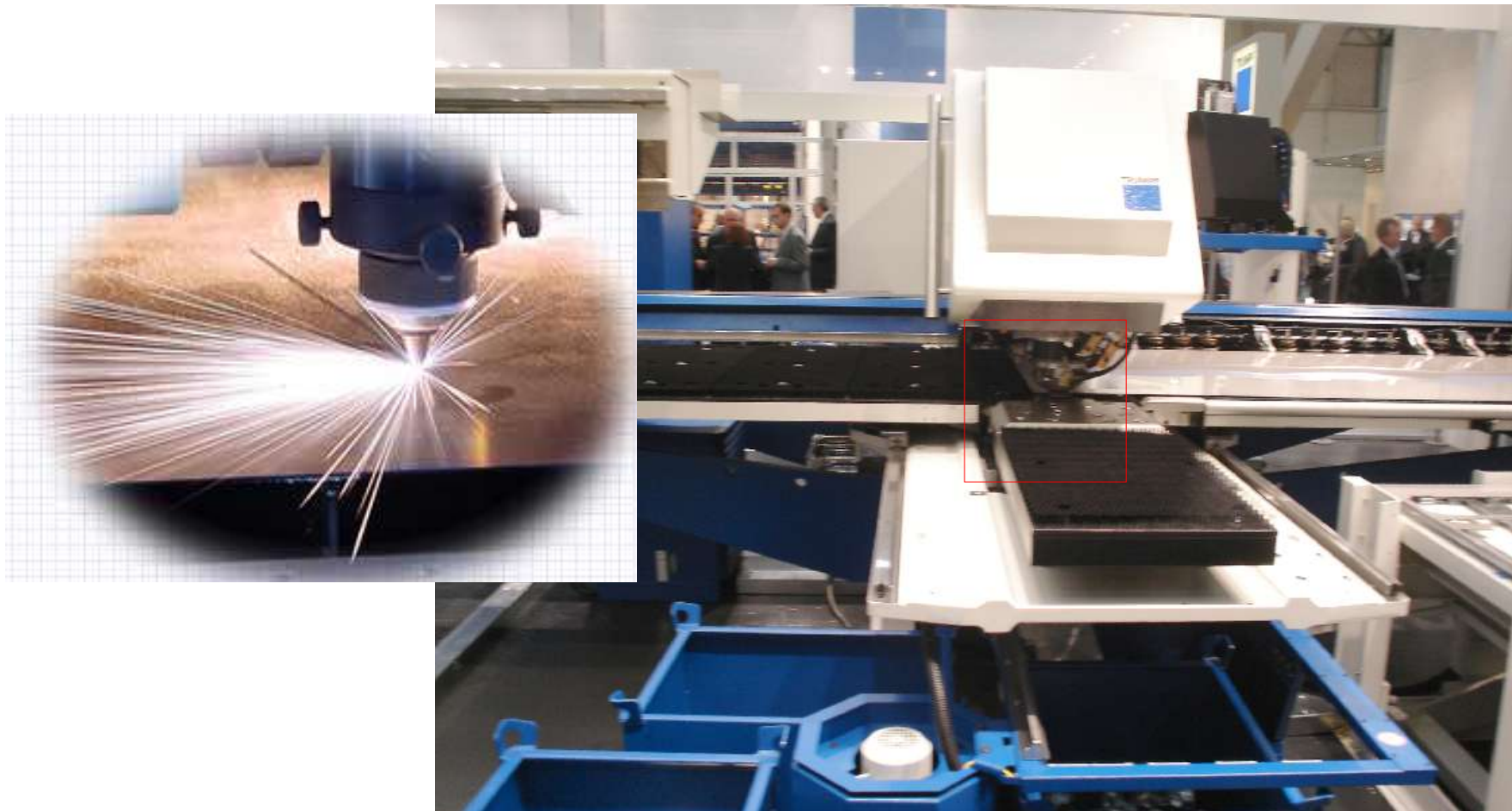
Usinagem por LASER

Exemplo de peça usinada a LASER



Usinagem por LASER

Exemplo de máquina



Usinagem por LASER

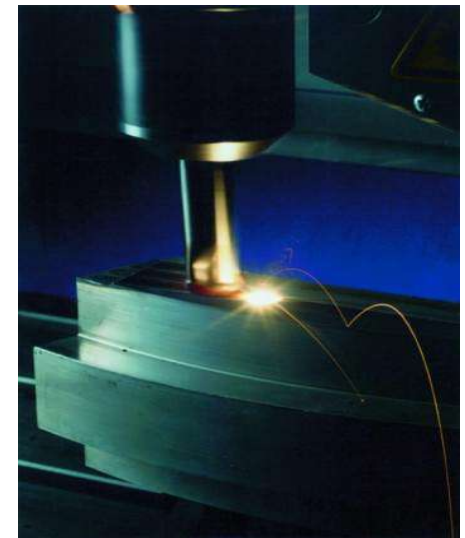
Generalidades

- É gerado na amplificação de luz pela emissão estimulada de irradiação
 - Além do processo de corte, é empregado para soldagem e tratamento superficial
 - Em vista das suas propriedades ópticas, o feixe de laser é adequado para o corte dos mais diversos materiais
 - Utilizado largamente na fabricação de formas complexas, sem concorrência com outros processos em muitas aplicações da indústria automobilística
-

Usinagem por LASER

Generalidades – tipos de LASERs

- EXCIMER - baixa taxa de remoção, utilizado na microusinagem de polímeros e materiais cerâmicos
- Nd:YAG - laser com até 500 W de potência, com aplicação ampla
- CO₂ - possibilidade de corte com laser de vários kW de potência, com aplicação ampla



Subdivisão em Termos da Forma de Remoção

➤ Corte por fusão

- ⇒ Fusão contínua e expulsão do material da fenda de trabalho por sopro de um gás inerte ou um gás inativo
 - ⇒ O fluxo de gás (argônio, nitrogênio ou hélio) evita a oxidação na fenda de corte
 - ⇒ Exemplo de material de corte: cobre
-

Subdivisão em Termos da Forma de Remoção

➤ Corte por oxidação

- ⇒ Aquecimento do material a temperatura de ignição pela adição de oxigênio
 - ⇒ Formação de óxido de ferro com liberação complementar de energia, que é soprado para fora da fenda de corte
 - ⇒ Exemplo de material de corte: materiais ferrosos
-

Subdivisão em Termos da Forma de Remoção

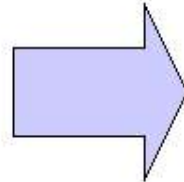
➤ Corte por sublimação

- ⇒ Evaporação do material na região do corte e expulsão dos vapores pela adição de gases inertes
 - ⇒ O fluxo de gás no corte tem a função de expulsar o material evaporado para evitar que este se condense novamente na zona periférica
 - ⇒ Exemplo: materiais plásticos
-

Vantagens e Desvantagens

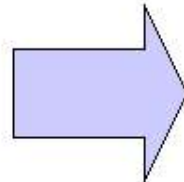
➤ Vantagens

Alta densidade de energia



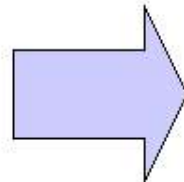
- ⇒ Elevada velocidade de trabalho
- ⇒ Região termicamente afetada pequena
- ⇒ Pequena distorção
- ⇒ Raios pequenos

Trabalho sem contato



- ⇒ Sem desgaste
- ⇒ Trabalho de peça delgada
- ⇒ Manuseio simples da peça

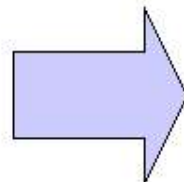
Fácil controle



- ⇒ Pequenas massas
- ⇒ Elevada automação
- ⇒ Integração em sistemas flexíveis
- ⇒ Trabalho de contornos

➤ Desvantagens

Custos elevados



- ⇒ Fonte
- ⇒ Condução de formação
- ⇒ Manuseio
- ⇒ Comando

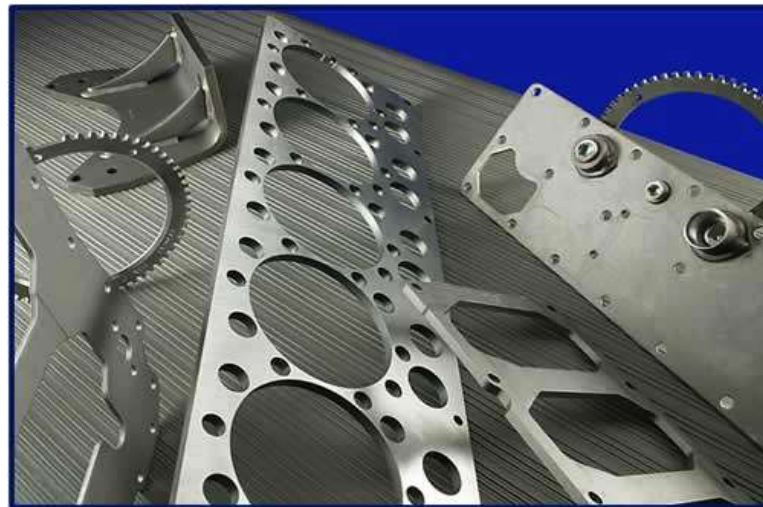
Características

- As velocidades de corte obteníveis são aproximadamente proporcionais à potência do LASER e inversamente proporcionais à espessura do material
- Com o aumento do teor dos elementos de liga no material cortado, por regra, há diminuição da velocidade de corte

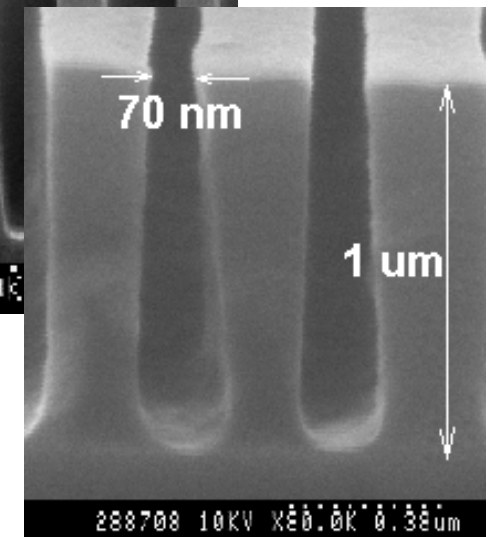
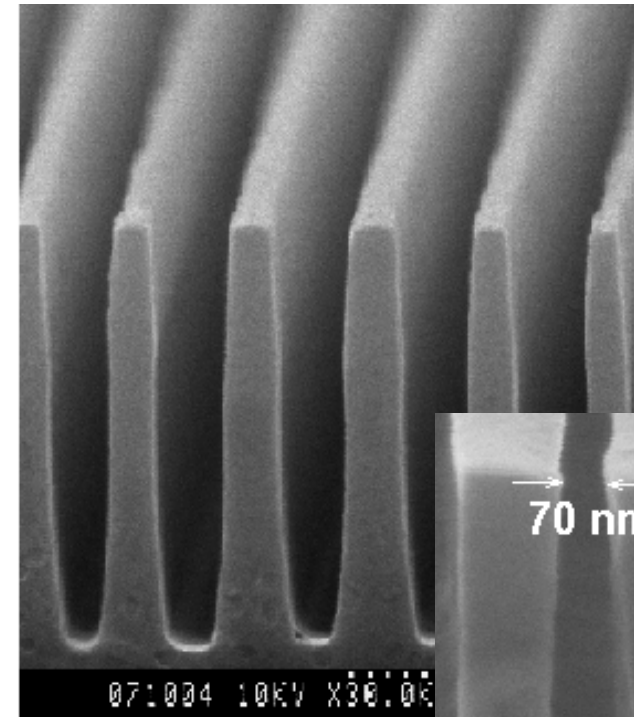


Exemplos de Aplicações

- Indústria automobilística: número de séries muito grande, contornos complexos e uma grande gama de variantes, exigindo tempo de fabricação muito curtos. O CO_2 é usado sem concorrência.
- Dentes de serra: não há necessidade de tratamento térmico posterior e há possibilidade de obtenção de cantos vivos para peças com espessuras inferiores a 10 mm.



Usinagem por Feixe de Eletrons



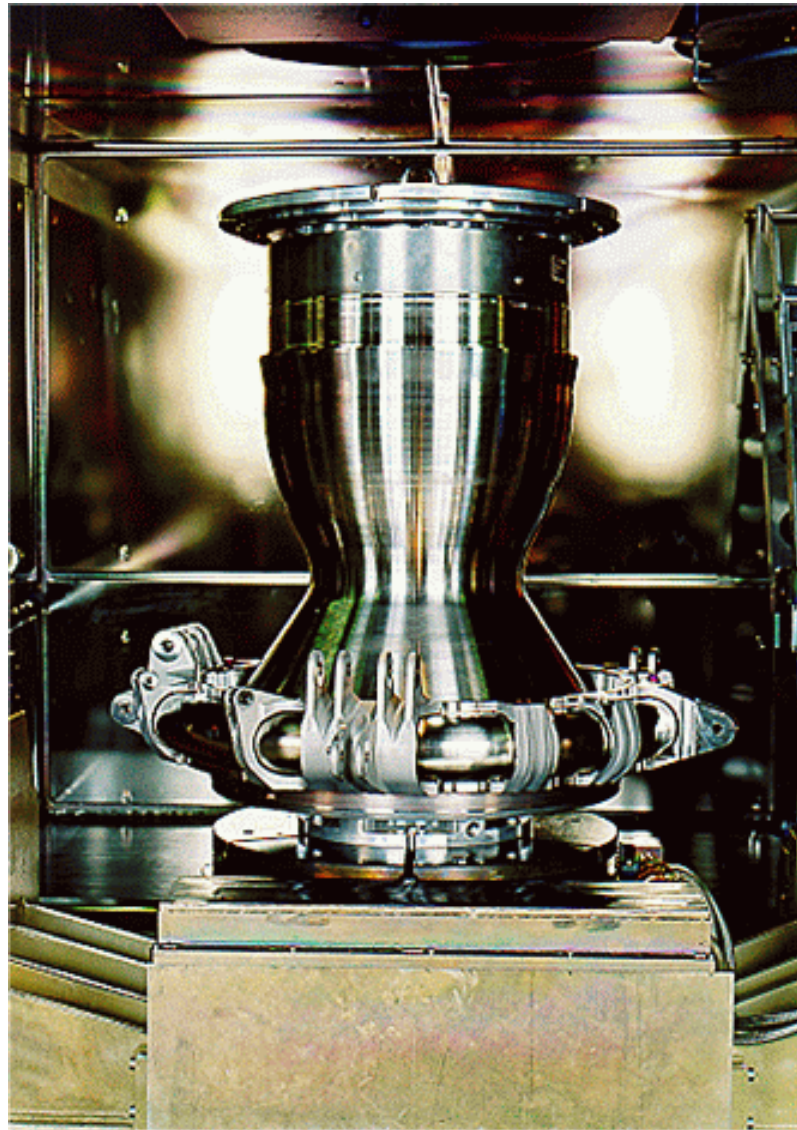
Usinagem por Feixe de Elétrons

Generalidades

- O processo de remoção ocorre através do impacto de um feixe concentrado de elétrons sobre a superfície da peça
 - Em vista da colisão do feixe, ocorre fusão e vaporização do material da peça no ponto de incidência, chamado “ponto focal”, formando um furo
 - Com a combinação de um movimento de avanço transversal, o furo acompanha tal deslocamento
 - Na geração de furos, estes apresentam certa conicidade, que pode ser controlada com a intensidade do feixe
-

Usinagem por Feixe de Eletrons

Generalidaes

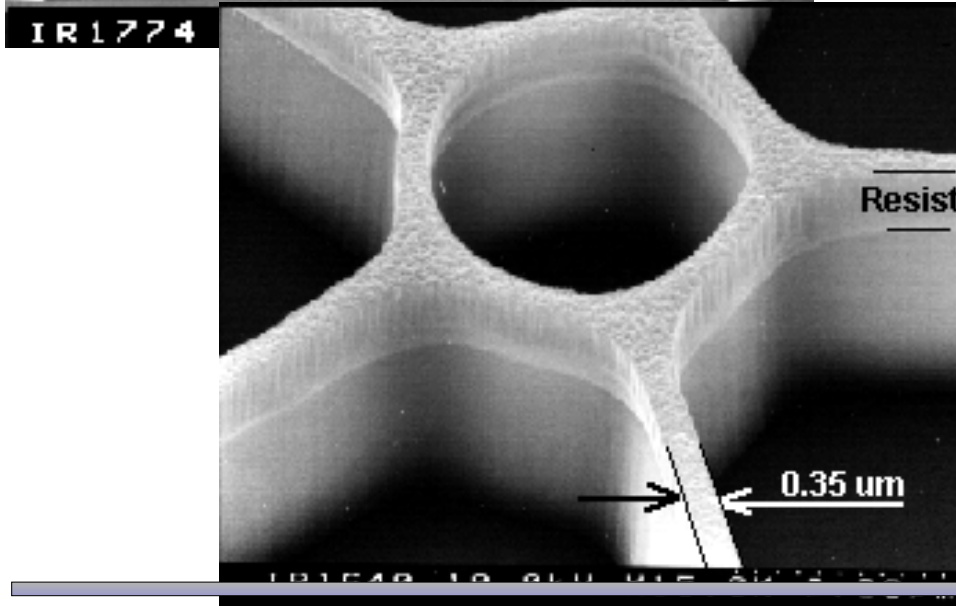
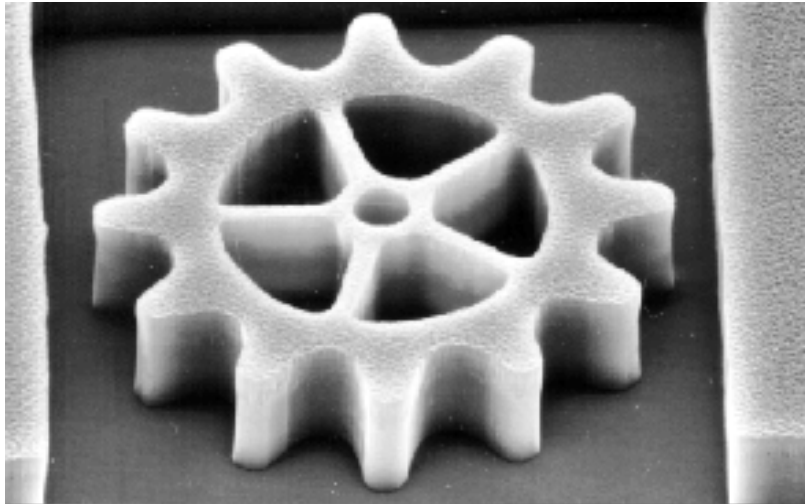


Usinagem por Feixe de Eletrons

Potencialidades

Densidade de energia W/cm ²	Área de aplicação	Materiais
$10^2 - 10^3$	Polimerizar	Plástico
10^3	Processo eletroerosivo	
$10^4 - 10^5$	Temperar	Metais
$10^5 - 10^6$	Soldar e refundir	
$10^5 - 10^7$	Perfurar	
$10^7 - 10^9$	Furar e fresar	
10^8	Gravar	
$>10^8$	Sublimar	

Aplicações



- Com grandes densidade de energia é possível efetuar-se perfuração, furação, fresamento, corte e gravação
- Para a perfuração de placas de aço inóx de 0,1 mm de espessura com furos de 0,2 mm de diâmetro é possível uma frequência de 3000 furos por segundo
- Tal aplicação dá-se para a fabricação de tubeiras de queimadores de gás, anéis de injeção de turbinas, furos de refrigeração em palhetas de turbinas, cabeçotes de fixação para a obtenção de fibras de vidro, tambores de filtros etc.

Usinagem por Jato d'água



Usinagem por Jato d'água

Generalidades

- Aproveitamento da ação erosiva do jato de água de alta pressão para processos de corte
 - Pressões atingidas de até 400 MPa e fluxo de líquido de até 10 l/min
 - Principais atuações no trabalho de materiais plásticos, corte de tapeçaria e tecidos, indústria de alimentos
 - A aplicação de materiais abrasivos permite o corte de materiais metálicos, vidro e cerâmica
-

Usinagem por Jato d'água

Generalidades



Usinagem por Jato d'água

Características

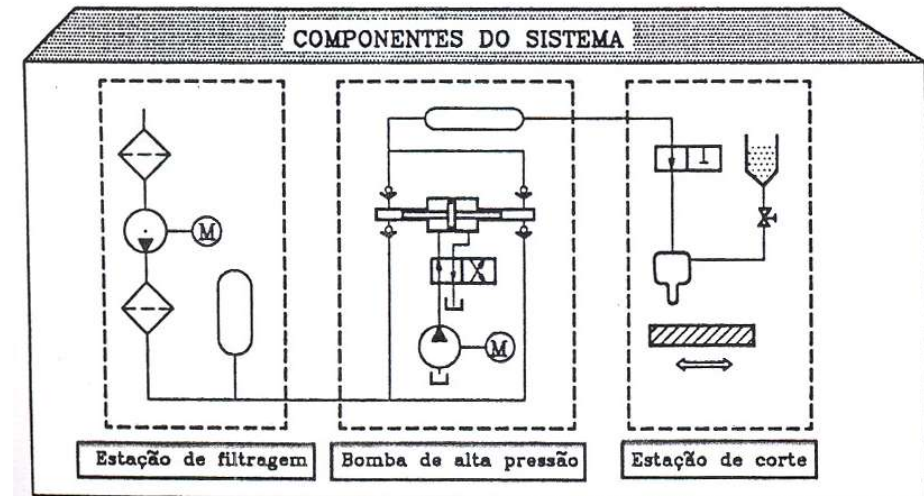
- Pequena solicitação mecânica do material da peça
 - Nenhuma influência térmica da camada limite
 - Não á formação de poeira de corte, produtos fundidos ou gases
 - Possibilidade de corte em qualquer direção normal ao eixo do jato
 - Pequeno desgaste da ferramenta
 - Fendas de corte estreitas
-

Usinagem por Jato d'água

Instalação e Componentes

➤ Subdivisões

- ➡ Bomba de alta pressão
- ➡ Instalação de corte
- ➡ Estação de filtragem



- Para o trabalho de superfícies tridimensionais grandes são largamente empregados robôs de braços ou robôs de portal
- Normalmente estes sistemas têm instalações auxiliares (paredes de proteção, cubas de água etc.)

Usinagem por Jato d'água

Instalação e Componentes



Mecanismos de Ação

➤ Parâmetros de entrada

- ⇒ Pressão da bomba
 - ⇒ Afastamento da tubeira
 - ⇒ Diâmetro da tubeira
 - ⇒ Velocidade de avanço
-

Mecanismos de Ação

- ⇒ Parâmetros de entrada determinam a energia efetiva local no ponto de impacto do jato
 - As propriedades do material influem de forma qualitativa e quantitativa no resultado de trabalho
 - A densidade de energia é significativamente influenciada pela pressão, determinando a resistência máxima do material que pode ser cortado
 - Para materiais finos e dúcteis é observada uma taxa de corte máxima para um certo afastamento da tubeira em relação à superfície da peça
-

Variações do Processo

➤ Jato de água com pó abrasivo

- ⇒ A pressão negativa produzida pelo jato livre logo após a tubeira é aproveitada para misturar o jato de água com ar e pó abrasivo
 - ⇒ Há desgaste considerável dos componentes do misturador em função do material abrasivo
 - ⇒ Os tubos de focalização são normalmente construídos de metal duro ou cerâmica
 - ⇒ Materiais de adição do jato: areia de quartzo, granada, escória de silicato ou de óxido de alumínio, micro-esferas de vidro, pó de ferro e outros, dependendo da aplicação
 - ⇒ Fendas de trabalho mais largas do que no jato de água puro
 - ⇒ Possibilidade de cortar materiais de alta resistência e duros
 - ⇒ Parâmetros adicionais em relação ao jato de água puro: tipo de material abrasivo; granulometria do material abrasivo; fluxo do material abrasivo; diâmetro do tubo de focalização; comprimento do tubo de focalização
-

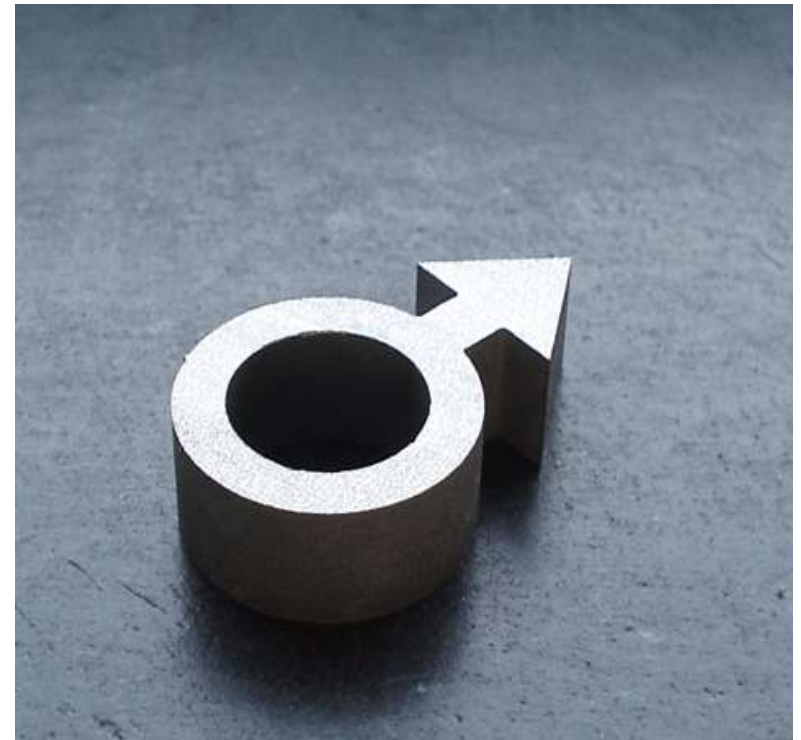
Usinagem por Jato d'água

Exemplo de chapa de Alumínio cortada por jato d'água com abrasivo



Usinagem por Jato d'água

Exemplo de chapa de Alumínio cortada por jato d'água com abrasivo



Exemplos de Aplicações



- Corte de materiais plásticos, couro, tecidos, borracha, papelão, papel, espuma, alimentos (inclusive supercongelados) etc.
- Materiais visco-elásticos sem comportam de forma rígida no corte, evitando o desvio da linha de corte
- No corte de materiais plásticos pode ser feita rebarbação, recorte de contornos e introdução de furos
- Utilizado na fabricação de componentes 3D da indústria automobilística (painéis, consoles, revestimentos internos, tapetes etc.)

Exemplos de Aplicações

- Corte de materiais plásticos, couro, tecidos, borracha, papelão, papel, espuma, alimentos (inclusive supercongelados) etc.
 - Materiais visco-elásticos sem comportam de forma rígida no corte, evitando o desvio da linha de corte
 - No corte de materiais plásticos pode ser feita rebarbação, recorte de contornos e introdução de furos
 - Utilizado na fabricação de componentes 3D da indústria automobilística (painéis, consoles, revestimentos internos, tapetes etc.)
-

Fim - Aula 23
