



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de São Carlos

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS NÃO-  
CONVENCIONAIS DE FABRICAÇÃO**

Flávio Camarinho Moreira  
Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos – 2009

## Índice

<b>1. Introdução</b> .....	4
Usinagens não convencionais de ação única .....	5
Usinagens não convencionais híbridas .....	8
<b>2. Usinagem a ultrassom</b> .....	10
Sistema de usinagem.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Capabilidade do processo .....	20
<b>3. Usinagem a jato de água</b> .....	26
Sistema de usinagem.....	27
Vantagens e limitações .....	28
<b>4. Usinagem a jato abrasivo</b> .....	29
Capabilidade do processo .....	31
Vantagens e limitações .....	32
<b>5. Usinagem a jato de água abrasivo</b> .....	32
Sistema de usinagem.....	34
Capabilidades do processo.....	34
<b>6. Usinagem química</b> .....	35
Sistema de usinagem.....	37
Capabilidade do processo .....	38
Vantagens e limitações .....	39
<b>7. Usinagem Eletroquímica</b> .....	40
Sistema de usinagem.....	43
Capabilidade do processo .....	44
<b>8. Usinagem por eletroerosão</b> .....	44
Eletroerosão por penetração.....	45
Eletroerosão a fio .....	48
Capabilidade do processo .....	49
<b>9. Usinagem por feixe laser</b> .....	51
Sistema de usinagem.....	52
Vantagens e limitações .....	54
<b>10. Usinagem a feixe de elétrons</b> .....	56

Sistema de usinagem.....	56
Capabilidade do processo .....	59
<b>11. Usinagem a feixe de plasma .....</b>	<b>61</b>
Sistema de usinagem.....	61
Arco de plasma .....	61
Jato de plasma .....	62
Plasma protegido.....	62
Plasma a ar .....	63
Capabilidade do processo .....	64
Vantagens e limitações .....	65
<b>12. Usinagem a feixe de íons.....</b>	<b>66</b>
Sistema de usinagem.....	66
Capabilidade do processo .....	67
<b>13. Processos de adição de material.....</b>	<b>68</b>
Sinterização seletiva a laser .....	69
Vantagens e limitações .....	70
Impressão tridimensional .....	71
<b>14. Alguns processos adicionais .....</b>	<b>73</b>
Shot Peening .....	73
Soldagem a Laser .....	76
<b>15. Bibliografia .....</b>	<b>78</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Quando se ouve falar a palavra usinagem normalmente o tipo de máquina que se tem em mente são aquelas que utilizam energia mecânica para remover material da peça. Fresadoras, serras e tornos são alguns dos tipos mais comuns de máquinas que utilizam a energia mecânica para remover material. Em todos esses casos, a ferramenta faz contato com a peça e o cisalhamento resultante faz com que o material deslize sobre a ferramenta sendo removido. Todas as formas convencionais de se usinar metal usam cisalhamento como método primário para remoção de material. De forma semelhante, quando se pensa em processos de conformação, ou adição de material, os processos de forjamento, dobra, extrusão, etc, vem à mente, assim como a solda elétrica, ou por aquecimento com gases no último caso.

O grande desenvolvimento das propriedades térmicas, químicas e mecânicas dos novos materiais de engenharia tornou cada vez mais difícil, ou de alto custo, sua transformação por usinagem, ou outros processos de fabricação, usando os processos convencionais normalmente conhecidos. Para o caso de remoção de material isso aconteceu pelo fato de que a usinagem convencional ser baseada no uso de ferramentas mais duras do que a peça. Por exemplo, a elevada razão entre o volume de um rebolo e de material por ele removido (50-200) tornou a retificação convencional aplicável somente a uma limitada extensão de perfis de ferramenta de diamante policristalino (PCD). Por outro lado, o elevado custo das cerâmicas e dos compósitos e o dano gerado durante a usinagem convencional são os principais obstáculos ao maior uso desses materiais. Adicionalmente ao desenvolvimento desses novos materiais, formas mais complexas, estruturas de pouca rigidez e micro-componentes que necessitam faixas de tolerância apertadas e elevada qualidade superficial exigiram que novos processos fossem desenvolvidos. Sendo assim, é crescente o desenvolvimento de novos processos de fabricação não-convencionais, não só para remoção de material, mas também para sua conformação e adição. Tais novos processos de fabricação já desempenham um papel importante na fabricação de aviões, carros, ferramentas e moldes e continuarão a se expandir, atingindo o ponto, no futuro, onde poderão vir a ser tratados como processos convencionais.

Os métodos de usinagem não-convencionais são classificados de acordo com o número de ações de usinagem que causam a remoção do material da peça.

### *1.1 - Usinagens não-convencionais de ação única*

Nesses processos, apenas um tipo de ação de usinagem é usado na remoção de material. Podem ser classificados de acordo com a fonte de energia usada para gerar a ação de usinagem: mecânica, térmica, química, e eletroquímica, conforme a Figura 1.

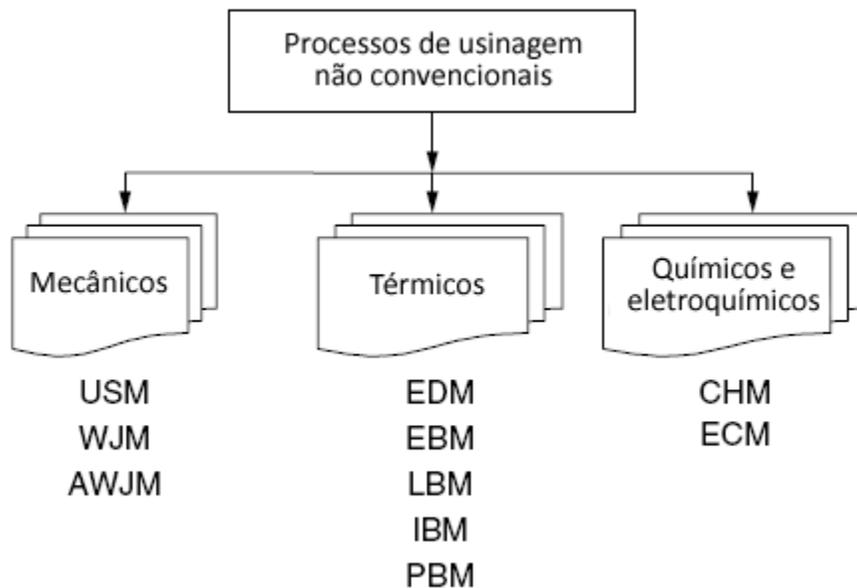


Figura 1 – Processos de usinagem não convencionais

#### *1.1.1 - Usinagem mecânica*

A usinagem por ultrassom e a usinagem com jato de água são exemplos típicos de processos não-convencionais de ação única mecânicos. Na usinagem por ultrassom a remoção de material ocorre por abrasão mecânica, enquanto na usinagem com jato de água ela ocorre pela ação do jato de fluido contra o material. A introdução de abrasivos no jato do fluido aumenta o poder de corte no caso da usinagem com jato de água abrasivo. A Figura 2 mostra um esquema desses processos.

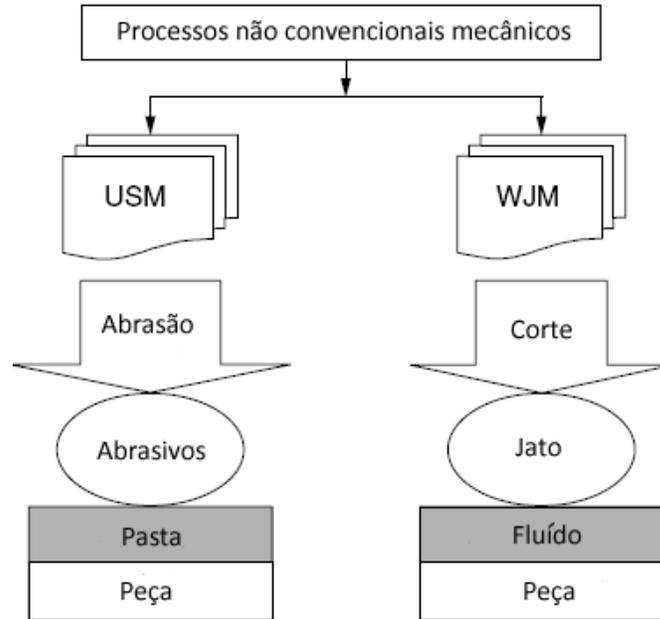


Figura 2 – Processos de usinagem não convencionais mecânicos

### 1.1.2 - Usinagem térmica

Na usinagem térmica, a remoção de material ocorre pelo derretimento e/ou vaporização do material da peça. Muitos fenômenos secundários relativos a qualidade superficial ocorrem durante esse tipo de usinagem, como por exemplo microfissuras e zonas afetadas pelo calor. A fonte de calor exigida para a remoção do material pode ser o plasma, na usinagem por eletroerosão e na usinagem por plasma, fótons na usinagem com feixe de laser, ou íons na usinagem com feixe de íons. Para cada um desses métodos, o meio da usinagem é diferente. Enquanto a eletroerosão ocorre em um meio fluído dielétrico, a usinagem a feixe de íons e feixe de elétrons é realizada no vácuo. A Figura 3 mostra um esquema desses processos.

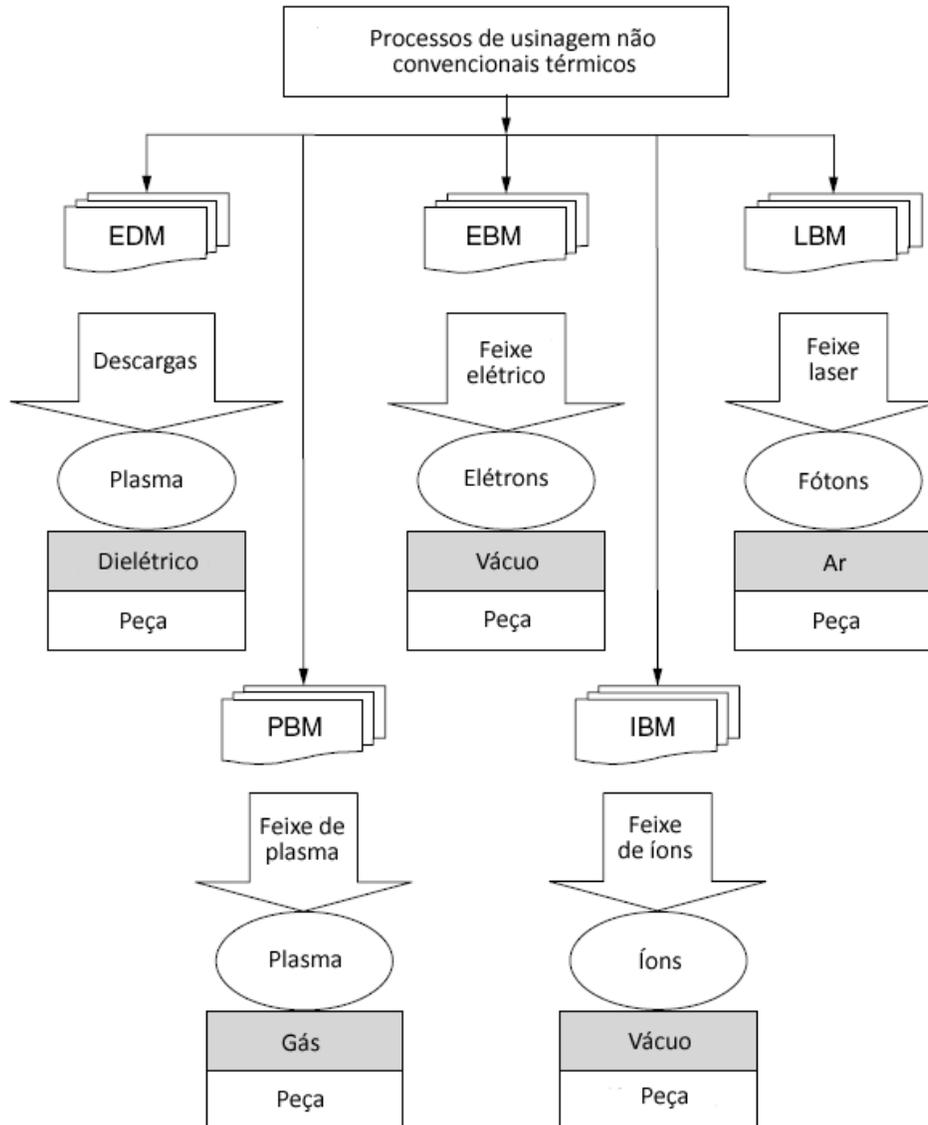


Figura 3 – Processos de usinagem não convencionais térmicos

### 1.1.3 - Usinagem química e eletroquímica

As usinagens químicas e eletroquímicas usam a ação da dissolução química para remover o material da peça em uma célula eletrolítica. São classificadas conforme a Figura 4.

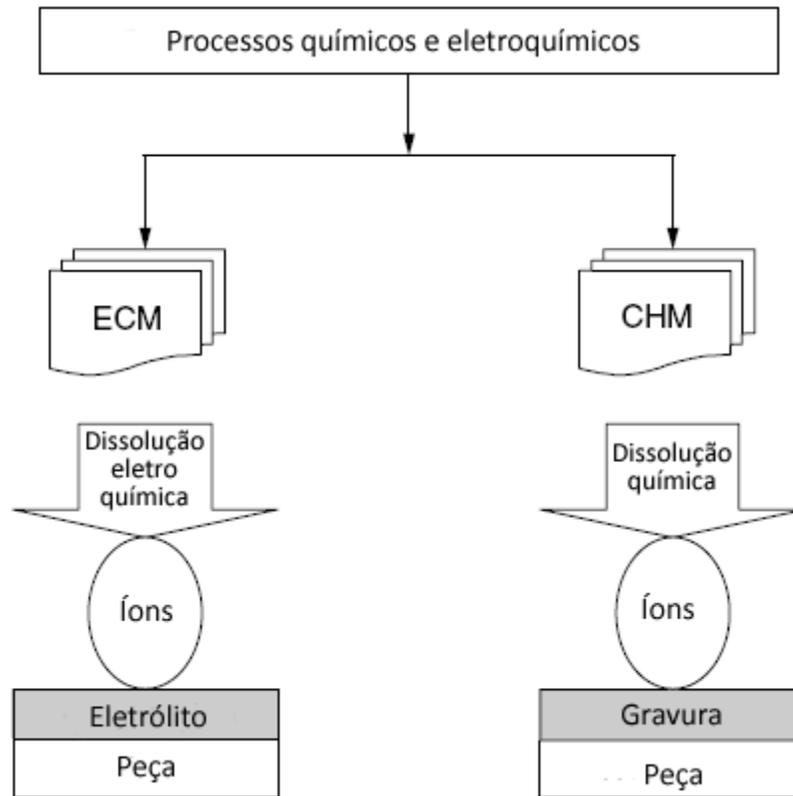


Figura 4 – Processos de usinagem não convencionais químicos e fotoquímicos

#### 1.1.4 - Usinagens não convencionais híbridas

Um aprimoramento tecnológico dos processos de usinagem pode ser alcançado com a combinação de diferentes ações ou fases de usinagem para a remoção do material. Um processo de corte mecânico convencional simples ou abrasão mecânica pode ser combinado com a respectiva fase de usinagem por eletroerosão ou por dissolução química. A razão para tal combinação e o desenvolvimento de um processo de usinagem híbrido é, principalmente, fazer uso das vantagens combinadas e impedir ou reduzir alguns efeitos adversos que processos constituintes causam quando aplicados individualmente. As características de desempenho de um processo híbrido são consideravelmente diferentes dos processos de ação única em termos de produtividade, acuracidade e qualidade superficial.

Dependendo da fase de usinagem prioritária na remoção de material, os processos de usinagem híbrida podem ser classificados como processos híbridos químicos e eletroquímicos e usinagem térmica híbrida.

- Processos híbridos químicos e eletroquímicos: Neste grupo de processos, a fase principal de remoção de material é a dissolução química ou a dissolução eletroquímica. Tal ação de usinagem pode ser combinada com uma assistência térmica por meio de um aquecimento local, como no caso da usinagem eletroquímica assistida por laser. Ou, em outros casos, pode se introduzir a ação da abrasão mecânica durante a dissolução eletroquímica como é o caso do processo de retificação eletroquímica.
- Usinagem térmica híbrida: Nesse caso, o mecanismo principal de remoção de material é o térmico. A combinação da fase térmica com a fase de dissolução eletroquímica, ação de abrasão mecânica, e vibração por ultrassom gera uma família de processos de ação dupla. Processos de ação tripla são alcançados pela combinação da fase de eletroerosão com a ação da dissolução eletroquímica e a abrasão mecânica. Tal combinação aumenta a taxa de remoção de material e a qualidade no processo de retificação com descarga eletroquímica e outros processos híbridos.

## 2. USINAGEM POR ULTRASOM

A usinagem por ultrassom (ultrasonic machining – USM) é a remoção de material duro e frágil utilizando uma ferramenta que oscila axialmente em frequências ultrassônicas (18-20 kHz). Durante essa oscilação, uma lama contendo água e abrasivos de  $B_4C$  ou  $SiC$  é alimentada continuamente na zona de usinagem entre uma ferramenta macia (latão, carbetto ou aços de baixo carbono) e a peça. As partículas abrasivas são “marteladas” contra a superfície da peça, fazendo com que o atrito das partículas abrasivas desgaste gradualmente o material da peça. A ferramenta de oscilação, em amplitudes que variam de 10 a 40  $\mu m$ , impõe uma pressão estática nos grãos abrasivos e direciona-se para baixo conforme o material é removido. À medida que a mistura abrasiva desgasta a peça por erosão está formada uma imagem reversa da ferramenta ultra-sônica na peça, conforme mostrado na Figura 5.

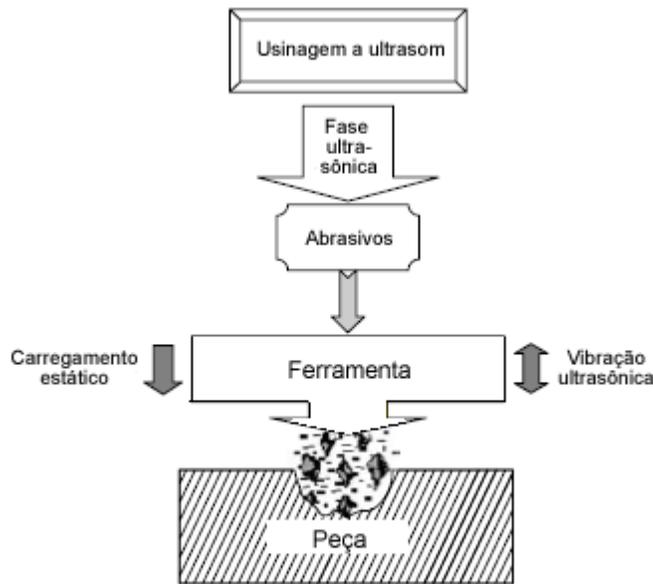


Figura 5 – Componentes de um sistema de usinagem a ultrassom

As aplicações industriais começaram a surgir nos anos 50, quando surgiram as novas máquinas-ferramentas. A USM é caracterizada pela ausência de alguns efeitos de mudança de estrutura metálica do material da peça. A Figura 6 mostra um exemplo de usinagem por ultrassom.



Figura 6 – Exemplo de usinagem por ultrassom

Qualquer material pode ser cortado por meio da usinagem por ultrassom, porém a usinagem é mais efetiva em materiais com dureza acima de 40 HRc.

### ***2.1 – Sistema de usinagem***

O sistema de usinagem, como mostrado nas Figuras 7 e 8, é composto principalmente de um magnetostritor, um concentrador, a ferramenta, e o alimentador da lama abrasiva.

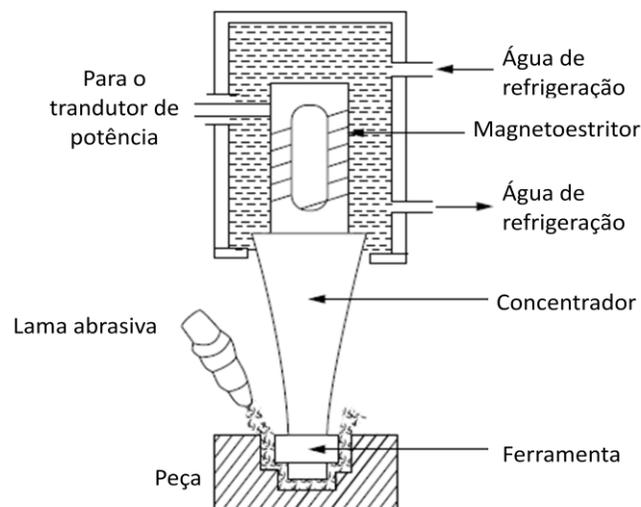


Figura 7 – Principais elementos de um sistema para usinagem por ultrassom.

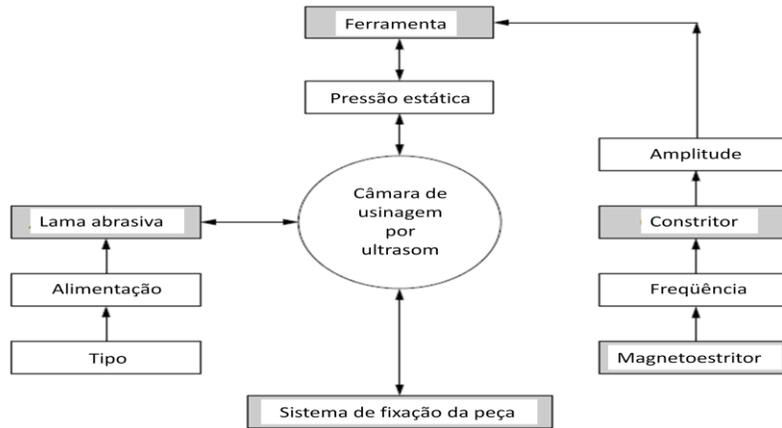


Figura 8 – Principais componentes de um sistema de usinagem por ultrassom.

O magnetostritor é energizado em frequências ultrasônicas e produz vibrações de pequena amplitude. Tais vibrações são amplificadas através de um constritor (amplificador mecânico) no qual é montada a ferramenta. A pasta abrasiva é bombeada entre a ferramenta oscilante e a peça, em geral de material duro e frágil. Uma pressão estática é aplicada contra a interface ferramenta-peça, de forma a manter a pasta abrasiva nessa região.

O magnetoestritor usado no processo de usinagem por ultrassom é mostrado na Figura 9 e possui um enrolamento de alta frequência sobre um núcleo magnético com uma polarização especial em torno de uma armadura. O efeito da magnetoestricção foi primeiramente descoberto por Joule em Manchester em 1874. A magnetoestricção é um fenômeno observado, por exemplo, em transformadores da rede elétrica de energia. O núcleo do transformador fica sujeito a uma vibração mecânica de aproximadamente o dobro da frequência da corrente elétrica circulando pelas bobinas.

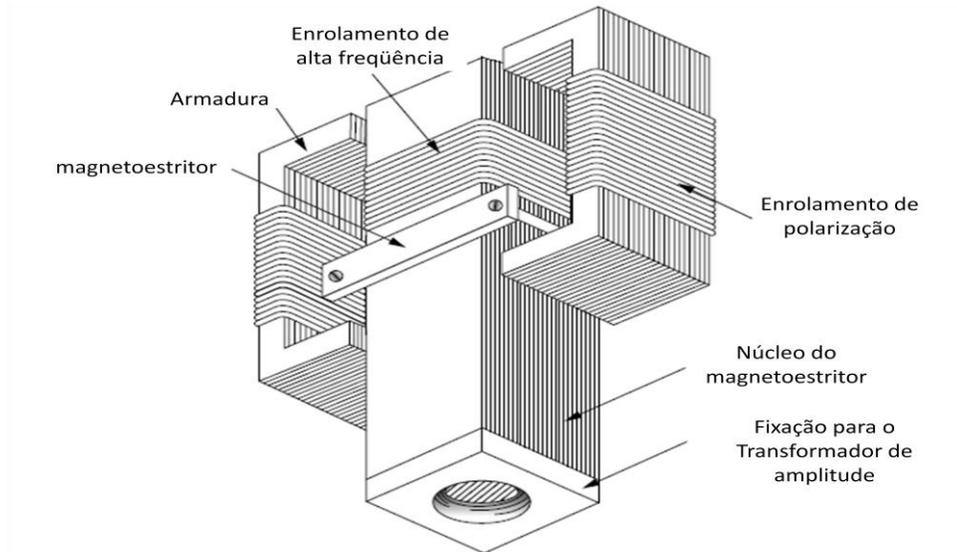


Figura 9 – Transdutor por magnetoestricção (Kaczmarek, 1976)

O efeito da magnetoestricção é usado para oscilar a ferramenta do processos de usinagem por ultrassom, a qual é montada ao final do magnetoestritor vibrando a frequências entre 18 e 20 kHz. O método de operação do magnetoestritor pode ser explicado como segue. O coeficiente de alongamento por magnetoestricção  $\varepsilon_m$  é:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Onde  $\Delta l$  é o comprimento incremental do núcleo do magnetoestritor e  $l$  é o comprimento original, ambos em mm. Materiais com altos valores de magnetoestricção são recomendados. A Figura 10 mostra a relação entre a intensidade de campo magnético  $H$  e  $\varepsilon_m$ . Assim:

- O alongamento é independente do sinal do campo magnético;
- A variação da intensidade de campo magnético muda o alongamento no dobro da frequência ( $2f$ );
- As mudanças em alongamento não são senoidais (onda completa retificada) como no caso de intensidade de campo.

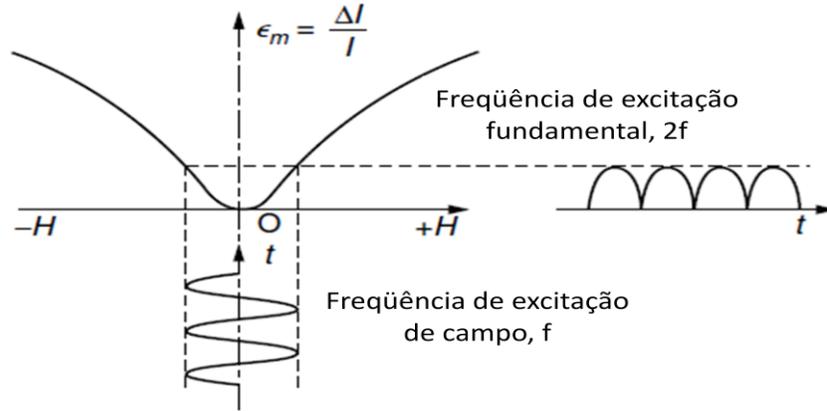


Figura 10 – Magnetoestrutor excitado por um campo magnético variável sem se magnetizar (Kacmarek, 1976).

Se o transdutor é magnetizado com uma corrente direta, como mostrado na Figura 11, mudanças senoidais no alongamento são obtidas.

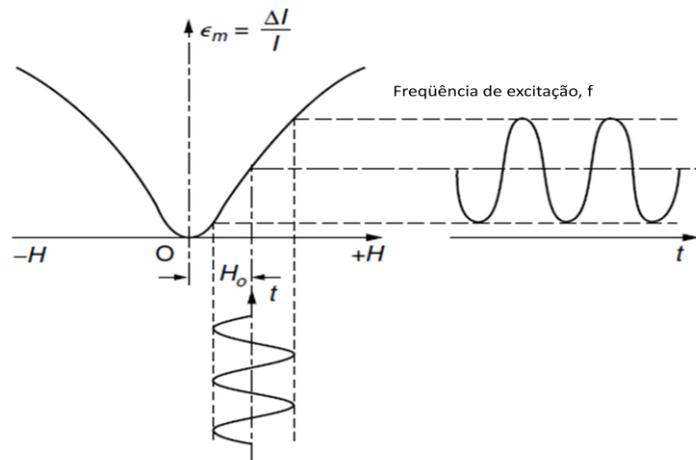


Figura 11 – Magnetoestricção devido ao campo magnético variável após polarização (Kacmarek, 1976).

O alongamento máximo  $A_{m\acute{a}x}$ , no magnetoestrutor de comprimento  $l$  é igual a metade do comprimento de onda  $\lambda$ , (Figura 12) ocorrerá a uma distância  $\lambda/4$  do centro. Portanto:

$$\lambda = \frac{C_s}{f} \quad (2)$$

Onde  $C_s$  é a velocidade do som no material do magnetoestrutor (m/s) e  $f$  a frequência de excitação do campo magnético (1/s). Também:

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{P}} \quad (3)$$

Onde  $E$  é módulo de Young (MPa) e  $P$  a densidade do material do magnetoestrutor ( $\text{kg/m}^3$ ).

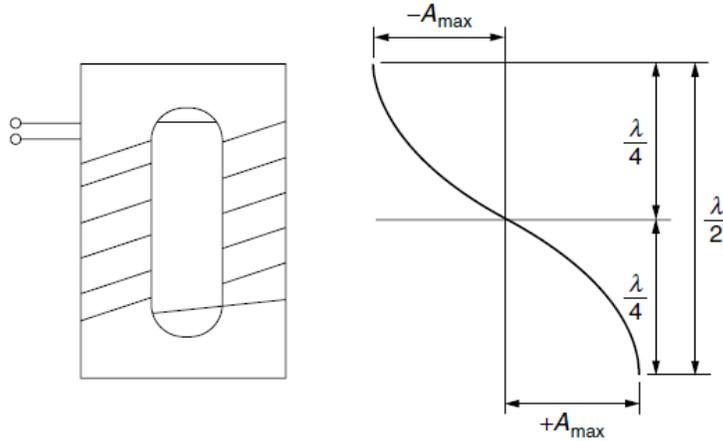


Figura 12 – Variação em um alongamento da onda ao longo do comprimento do magnetoestrutor.

A Tabela 1 mostra alguns materiais tipicamente usados para magnetoestritores e seus coeficientes.

Tabela 1 – Propriedades de alguns materiais usados como magnetoestritores

Material type	Coefficient of magnetostrictive elongation $E_m (\times 10^6)$	Coefficient of magnetomechanical coupling $K_m$
Alfer (13% Al, 87% Fe)	40	0.28
Hypernik (50% Ni, 50% Fe)	25	0.20
Permalloy (40% Ni, 60% Fe)	25	0.17
Permendur (49% Co, 2% V, 49% Fe)	9	0.20

SOURCE: McGeough (1988).

Para conseguir a máxima amplificação e uma boa eficiência o magnetoestrutor deve, no entanto, ser projetado para operar na ressonância, na qual a frequência natural é igual àquela do campo magnético. A frequência de ressonância  $f_r$  se torna:

$$f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{P}} \quad (4)$$

Uma vez que o material do magnetoestrutor converte a energia magnética para a mecânica, um alto coeficiente de acoplamento magnetomecânico  $K_m$  é essencial.

$$K_m = \sqrt{\frac{E_w}{E_m}} \quad (5)$$

De modo que para materiais magnetoestritores, mostrados na Tabela 1,  $E_w$  é a energia mecânica e  $E_m$  é a energia magnética.

O alongamento obtido na frequência de ressonância  $f_r$ , usando um magnetoestrutor de comprimento  $l = 0,5\lambda$  é usualmente 0,001 a 0,1  $\mu\text{m}$ , o que é muito pequeno para aplicações prática em mecânica. A amplitude de vibração é aumentada pela fixação em um amplificador (amplificador acústico) na extremidade do magnetoestrutor. Maiores amplitudes, tipicamente entre 40 e 50  $\mu\text{m}$  são mais adequados para aplicações práticas. Dependendo a amplitude final requerida, a amplificação pode ser alcançada por um ou mais amplificadores acústicos (Figura 13).

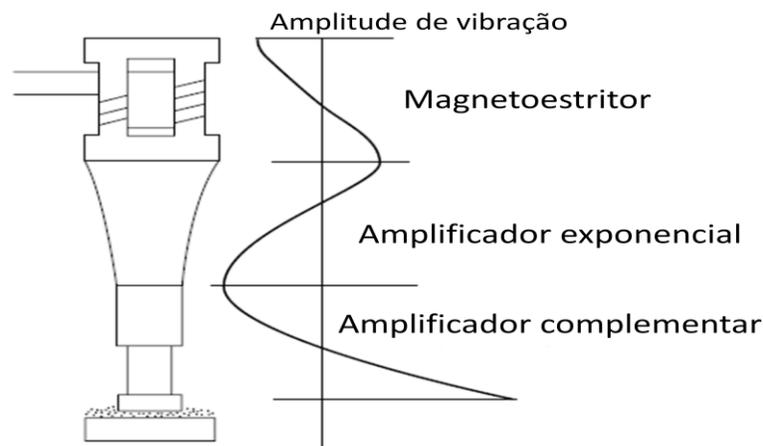


Figura 13 – Amplificador acústico de dois estágios para usinagem por ultrassom.

Para que se obtenha a máxima amplitude de vibração (ressonância) o comprimento do amplificador acústico deve ser múltiplo metade do comprimento de onda do som,  $\lambda$ , no material do amplificador. A escolha da forma do amplificador acústico controla a amplitude final. Cinco amplificadores acústicos (cilíndrico, em degraus, exponencial, cosseno hiperbólico e cônico) foram estudados por Youssed (1976). Os tipos exponenciais e em degraus são os mais frequentemente. Bronze-alumínio e bronze marítimo são de baixo custo e alta resistência à fadiga com 185 e 150 MN/m<sup>2</sup>, respectivamente. As principais desvantagens dos transdutores magnetoestrictivos são as altas perdas encontradas, a baixa eficiência (55%), o conseqüente aquecimento e a necessidade de refrigeração. Altas eficiências (90-95%) são possíveis pelo uso de transformadores piezoelétricos mas modernas máquinas de usinagem por ultrassom.

A ponta da ferramenta deve ter resistência a desgaste e suportar elevadas forças de fadiga. Para usinagem de vidro e de carbeto de tungstênio, cobre e aço cromo-prata são os mais recomendados. Aço prata e cromo-níquel são usados para materiais sinterizados. Durante a usinagem por ultrassom as ferramentas são avançadas e pressionadas contra a peça por uma carga estática, a qual deve ser maior do que a resistência na interface de corte com o material. Diferentes mecanismos de avanço podem ser encontrados, usando pneumática, controle intermitentes e motores de passo ou solenóides, molas compactas, diferentes mecanismos de contrapesos, etc.

A lama abrasiva é normalmente composta de 50% vol de abrasivo fino (100-800 mesh) de carbeto de boro (B<sub>4</sub>C), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ou carbeto de silício (SiC) em 50% vol de água. A lama circula entre a ferramenta oscilante e a peça. Sob o efeito da força estática de avanço e da vibração ultrasônica, as partículas abrasivas são marteladas contra a superfície da peça removendo mecanicamente minúsculas partículas. A lama é bombeada através de um bico próximo à interface peça-ferramenta a uma vazão de 25l/min.

À medida que o processo de remoção progride, a lama se torna menos efetiva, devido ao desgaste e quebra das partículas. A expectativa de vida está entre 150 e 200 horas de trabalho (Metals Handbook, 1989). A lama é continuamente bombeada para a região de corte a fim de assegurar a limpeza da região de corte dos resíduos de material removido e manter a refrigeração do local. O desempenho do processo de usinagem por

ultrassom depende muito da maneira como a lama é bombeada para região de corte. A Figura 14 mostra diferentes maneira de se fazer.

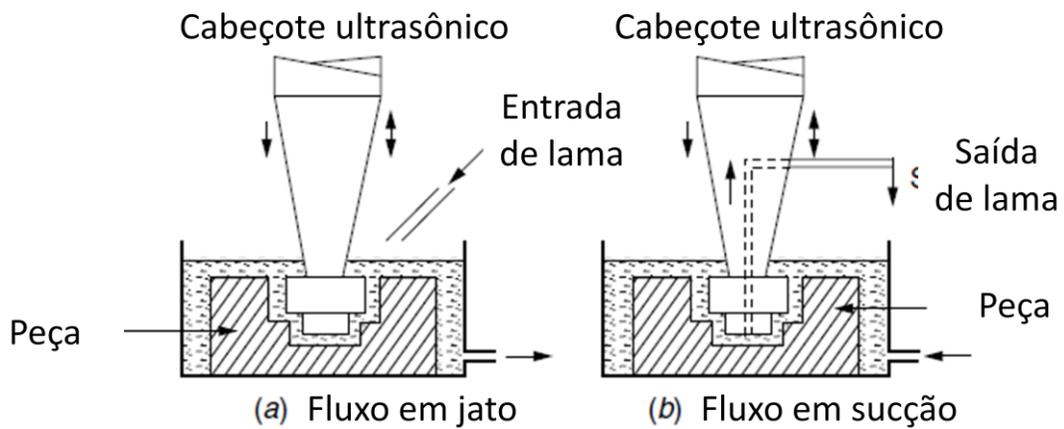


Figura 14 – Exemplos de diferentes maneiras de aplicação de lama em usinagem por ultrassom.

A Figura 15 mostra o processo completo de remoção de material por ultrassom, o qual envolve três diferentes ações:

- Abrasão mecânica pelo martelamento direto dos grãos abrasivos presos entre a ferramenta oscilante e superfície da peça adjacente;
- O micro desgaste gerado pelo impacto livre das partículas que voam através do espaço onde ocorre a usinagem e atingem a peça em locais aleatórios;
- A erosão da superfície de trabalho pela cavitação do fluxo da pasta;

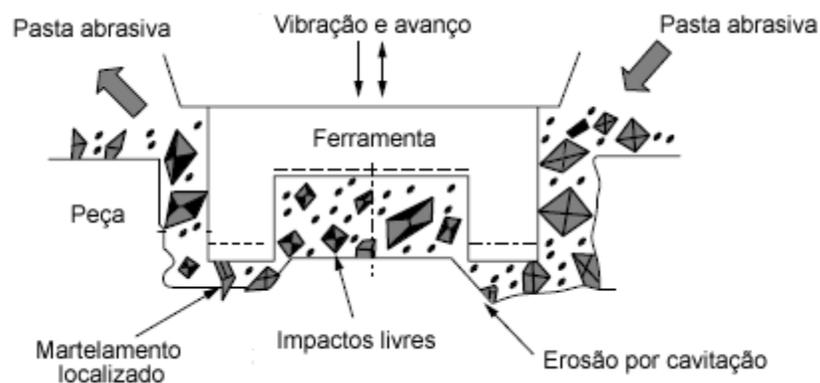


Figura 15 – Mecanismo de remoção do material na USM (adaptado de Thoe, 1995)

A contribuição relativa do efeito da cavitação é menos de 5% do total do material removido. O mecanismo dominante envolvido no USM em todos os materiais é o martelamento direto. Materiais macios e elásticos como aço leve são freqüentemente deformados plasticamente primeiro e depois removidos em uma taxa mais baixa.

Para o caso de materiais duros e frágeis, como vidro, a taxa de remoção é alta e o papel desempenhado pelo impacto livre pode ser facilmente observado. Quando se usina materiais porosos como grafite, o mecanismo de erosão é introduzido. A taxa de remoção em usinagem por ultrassom depende, primeiramente, da frequência de vibração, pressão estática, tamanho da área sendo usinada e do abrasivo e material da peça. A taxa de remoção e a usinabilidade por ultrassom depende do critério de fragilidade, o que é uma medida da capacidade de ruptura do material por cisalhamento. De acordo com a Tabela 2 o vidro tem uma usinabilidade maior do que um metal com dureza similar.

Tabela 2 – Usinabilidade relativa por ultrassom para alguns materiais.

Work material	Relative removal rate, %
Glass	100
Brass	66
Tungsten	4.8
Titanium	4.0
Steel	3.9
Chrome steel	1.4

Adicionalmente, devido á baixa fragilidade do aço, o qual é dúctil, este é usado como ferramenta. A Figura 15 resume os mais importantes parâmetros que afetam o desempenho do processo de usinagem por ultrassom, os quais são principalmente relativos à ferramenta, material da peça, abrasivos, condições de corte, e máquina-ferramenta (Jain and Jain, 2001)

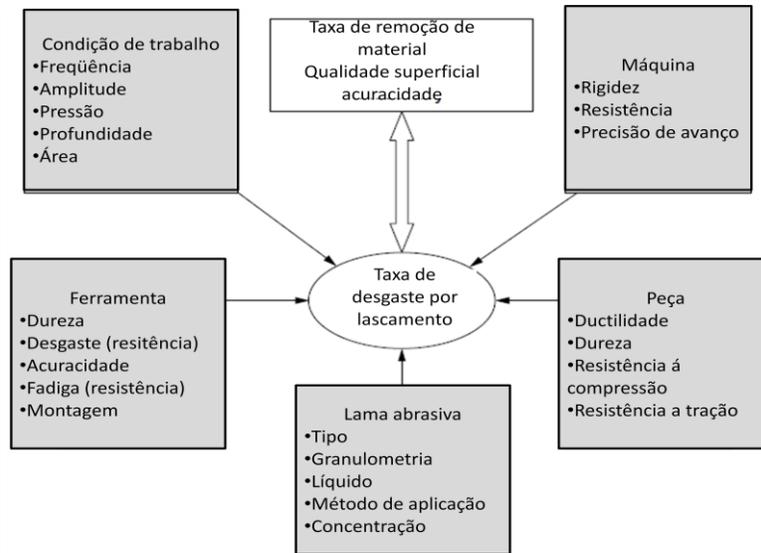


Figura 15 – Fatores que afetam o desempenho do processo de usinagem por ultrassom.

Em usinagem por ultrassom a taxa de remoção de material pode ser descrita usando-se a seguinte equação:

$$MRR = 5,9F \left( \frac{S}{H_0} \right) R^{0,5} Y^{0,5} \quad (6)$$

Onde  $F$  = frequência de oscilação

$S$  = pressão estática na ferramenta ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$H_0$  = resistência da superfície à fratura, dureza Brinell (BHN)

$R$  = raio médio dos abrasivos (mm)

$Y$  = amplitude de vibração (mm)

## 2.2 - Capabilidade do processo

Geralmente a acuracidade de peças usinadas sofre dos seguintes fatores de distúrbio, que podem causar sobremedida, conicidade e desvios de circularidade.

- Desgaste lateral da ferramenta
- Desgaste abrasivo
- Avanço incurado do suporte da ferramenta
- Erro de forma da ferramenta

- Fornecimento inconstante e desigual da lama abrasiva na região de oscilação da ferramenta

A acuracidade do processo é medida pela sobremedida produzida durante a fabricação de furos. Esta medida leva em conta a diferença entre a medida na entrada e na saída dos furos. A folga lateral entre a ferramenta e o furo é necessária para permitir a circulação da lama abrasiva durante a oscilação da ferramenta. Portanto, a granulometria do abrasivo representa o principal fator que afeta a sobremedida dos furos. A folga lateral pode ser considerada como sendo entre 2 a 4 vezes o tamanho médio de grão abrasivo quando usinando vidro e carbeto de tungstênio. É entre 3 a 4 vezes o tamanho médio de grão abrasivo de B<sub>4</sub>C (mesh 280-600). Contudo, a sobremedida depende também de outros parâmetros, como material da peça e o sistema de avanço da ferramenta. Em geral, o processo de USM alcança níveis de acuracidade de até  $\pm 0.05$  mm. A sobremedida de furos é, em geral, maior na entrada do furo do que na saída devido ao acúmulo do efeito abrasivo, resultando em cerca de 0,2° para um furo de 200 de diâmetro com profundidade de 10 mm em grafite, por exemplo. A conicidade pode ser reduzida por:

- Injeção direta de lama abrasiva na região de corte;
- Uso de ferramentas com conicidade negativa;
- Uso de alta pressão estática produzindo abrasivos desgastados finos, os quais reduzem o desgaste da ferramenta;
- Uso de ferramentas mais resistentes ao desgaste;
- Uso de ferramenta com menor diâmetro no primeiro corte e uma ferramenta do diâmetro mais adequado para cortar mais rapidamente, reduzindo a conicidade.

O erro de circularidade da peça aparece quando há vibração lateral da ferramenta. Tal vibração surge devido ao erro de perpendicularidade entre a face da ferramenta e sua linha de centro e a parte acústica da ferramenta fica desalinhada. Valores típicos de desvios de circularidade ficam na faixa de 40-140  $\mu\text{m}$ , e 20-60  $\mu\text{m}$ , proximadamente para vidro e grafite, respectivamente.

O acabamento superficial está intimamente ligado à taxa de remoção. A Tabela 3 mostra a relação entre tamanho de grão abrasivo e o número mesh. Quanto maior o tamanho de grão (menor número mesh) mais rápido será o corte, porém, maior será a

rugosidade resultante. Quanto maior as marcas formadas na superfície usinada, devido ao desgaste imposto pelos grão abrasivos, mais rugosa será a superfície resultante na peça. Pode ser esperado um acabamento superficial de 0.38 a 0.25  $\mu\text{m Ra}$ , usando abrasivos do número de grão 240. No entanto, outros parâmetros como acabamento superficial da ferramenta, amplitude de vibração e material sendo usinado também afetam o acabamento superficial. A amplitude de oscilação da ferramenta tem pouca influência sobre o acabamento superficial.

Tabela 3 – Relação entre o tamanho do grão abrasivo e o número mesh com a rugosidade superficial típica resultante em Ra.

No. do grão	Tamanho do grão, mm	Rugosidade, $\mu\text{m}$
180	0.086	0.55
240	0.050	0.51
320	0.040	0.45
400	0.030	0.40
600	0.014	0.28
800	0.009	0.21

Superfícies com menor rugosidade podem ser obtidas quando a viscosidade da lama abrasiva é reduzida. Danos causados por cavitação ocorrem quando as partículas da ferramenta penetram na peça. Sob tais circunstâncias é mais difícil repor adequadamente a lama nas regiões mais profundas da cavidade, o que resultam em superfícies mais rugosas.

### **2.3 – Aplicações do processo**

O processos de usinagem por ultrassom deve ser aplicado em cavidades rasas em materiais duros e frágeis contendo área superficial menor do que 1000  $\text{mm}^2$ . Uma modificação do processo original é mostrada na Figura 16 onde a ponta de uma ferramenta é rotacionada contra a superfície da peça como em furação convencional. O processo é chamado de usinagem rotacional por ultrassom. Cruz et al em 1995 usou o processo para usinar materiais não-metálicos com vidros, alumina, cerâmicas, ferrita, quartzo, zirconia, rubi, safira, óxido de berílio e alguns materiais compósitos. Este processo assegurou altas taxas de remoção, baixa pressão sobre peças delicadas, melhoria

da qualidade de furos profundos, menores danos na saída dos furos e fácil remoção do núcleo no caso de operações de trepanação.

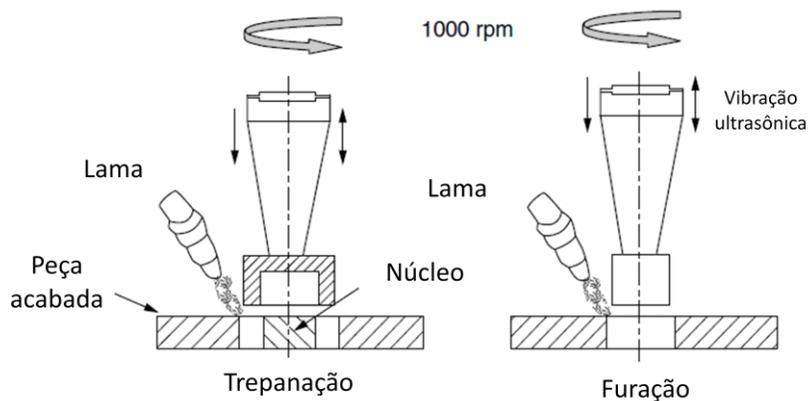


Figura 16 – Exemplo de usinagem rotacional por ultrassom

O processo também permite a furação de pequeno diâmetro sem interrupções, como em furação convencional para limpeza da broca. A velocidade de duração depende do diâmetro do furo e da profundidade da cavidade. Furos pequenos requerem maior tempo, pois à medida que o furo se aprofunda a renovação de lama na região de corte fica mais difícil. Geralmente, a relação profundidade-diâmetro na faixa de 2,5 pode ser atingida.

Furação por ultrassom de cavidades e de contornos se torna mais difícil quando a profundidade atinge cerca de 5 a 7 mm, ou quando a seção ativa da ferramenta se torna mais importante. Sob tais condições, a remoção de abrasivos na interface se torna difícil prejudicando a usinagem como um todo. Adicionalmente, a fabricação de ferramentas de formatos complexos se torna difícil. A fabricação de contornos por ultrassom (Figura 17) usa uma ferramenta de forma simples que é movida segundo o contorno desejado.

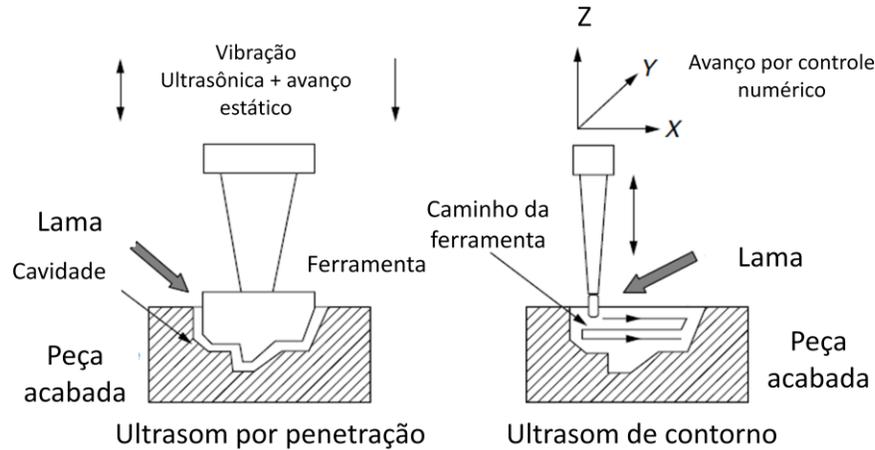


Figura 17 – Usinagem por ultrassom de penetração e de contorno.

A Figura 18 mostra formas tridimensionais obtidas por ultrassom de penetração nas quais a ferramenta a forma da ferramenta é uma réplica negativa da peça.

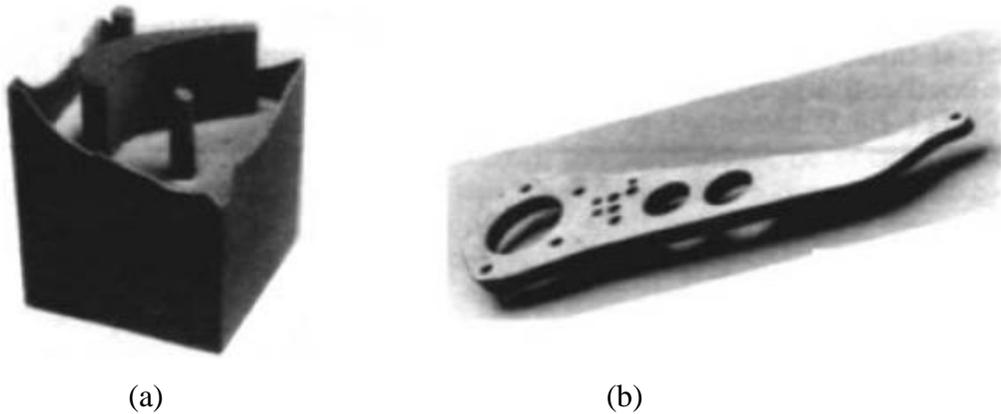


Figura 17 – (a) Pá de turbina em SiC obtida por penetração e (b) Alavanca de aceleração com furos obtida por ultrassom de contorno (Benkirane et al. 1995).

Gilmore (1995) usou usinagem por ultrassom para produzir eletrodos de grafite para aplicação em processos de eletroerosão (processo não-convencional mostrado à frente). Velocidades típicas de ultrassom em grafite foram na ordem de 0,4 a 1,4 cm/min e a rugosidade superficial entre 0,2 e 1,5  $\mu\text{m}$  Ra para uma precisão de  $\pm 10\mu\text{m}$ . Pequenas forças de usinagem permitem a fabricação de eletrodos frágeis para eletroerosão.

O polimento por ultrassom ocorre pela vibração de uma ferramenta de material frágil, como grafite ou vidro contra a peça a frequências de ultrassom e a uma

relativamente baixa amplitude. As partículas finas de abrasivo, na lama, eliminam os picos mais altos, removendo, tipicamente 0,012 mm de material, ou menos. Usando esta técnica rugosidades da ordem de 0,1  $\mu\text{m}$  podem ser obtidas (Gimore, 1995).

Micromachining por ultrassom é um método que utiliza a vibração da peça. De acordo com Egashira e Masuzana (1999) vibrando a peça consegue-se maior liberdade para o sistema por não necessitar de um transdutor, ferramenta, cones etc. Adicionalmente, o sistema como um todo se torna mais simples do que o convencional, Figura 18.

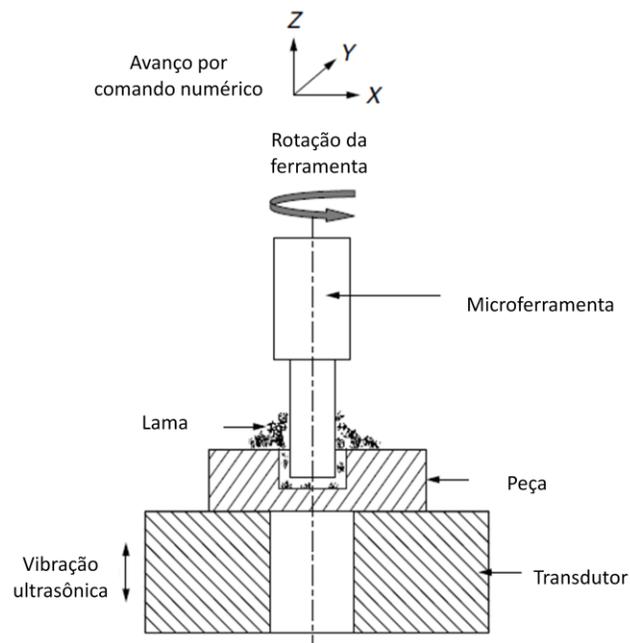


Figura 18 – Microusinagem por ultrassom.

Usando tal método furos de 5 mm de diâmetro foram feitos em quartzo, vidro e silício usando ferramentas de carbetos de tungstênio.

Outras aplicações para usinagem por ultrassom incluem corte de peças em semicondutores com altas taxas de remoção comparadas com processos convencionais, gravação de formas em vidro, aços endurecidos e carbetos, cortes de diamantes e pedras preciosas.

### **3. USINAGEM COM JATO DE ÁGUA**

O elemento principal na usinagem a jato de água (Water Jet Machining – WJM) é um jato de água, que viaja a velocidades de até 900 m/s (aproximadamente Mach 3). Quando o fluxo atinge a superfície da peça, a força erosiva da água remove rapidamente o material. A água, nesse caso, atua como uma serra e corta um sulco estreito no material da peça.

Em alguns casos, um polímero de cadeia longa é adicionado ao jato de água como forma de torná-lo mais coerente na saída. Além de água, outros fluídos podem ser usados, como álcool, glicerina e óleos vegetais, principalmente no processamento de carnes, produtos cozidos e comidas congeladas. A Figura 3.1 mostra um exemplo de corte para diferentes materiais ao mesmo tempo.



Figura 3.1 – Usinagem com jato de água cortando diferentes materiais.

A WJM é usada para usinar papel, metal, pano, couro, borracha, plásticos, alimento e cerâmica. É um processo versátil e econômico de corte, que pode ser usado como uma alternativa aos métodos de usinagem tradicionais. Por esse método, elimina-se

completamente problemas relacionados a zonas afetadas por calor, emissões tóxicas, endurecimento do material e tensões térmicas. É também o tipo de limpeza mais flexível e eficaz para uma série de necessidades industriais.

### **3.1 - Sistema de usinagem**

A Figura 3.2 mostra os elementos de um sistema de WJM e as principais partes que o compõem

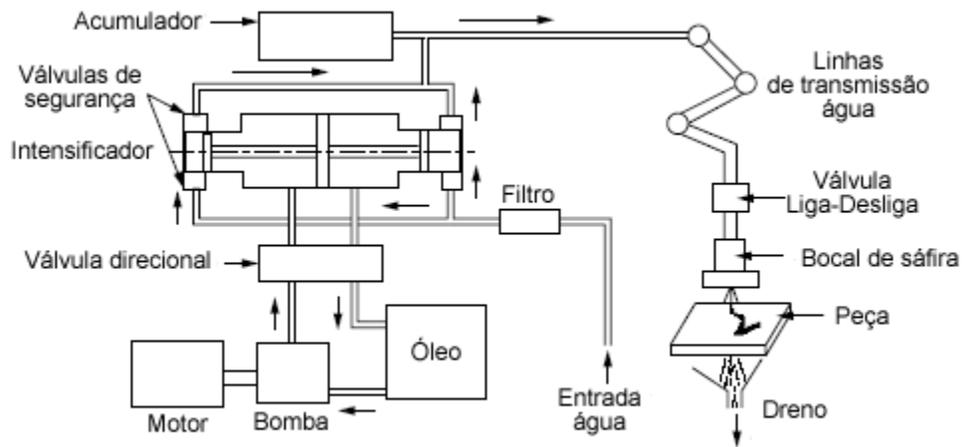


Figura 3.2 – Sistema de usinagem a jato de água

A bomba hidráulica funciona com um motor elétrico de 30 kW, fornecendo óleo a pressões que chegam a 117 Bar. Esse óleo a alta pressão é usado para aumentar a pressão da água no “intensificador”. A bomba pode ser usada tanto para operações de corte como de limpeza com jato d’água. Igualmente permite estações únicas ou múltiplas de corte, de forma a aumentar a produtividade.

O intensificador tem o papel de receber a água com baixa pressão (tipicamente 4 Bar) e expeli-la, usando um acumulador, com pressões que chegam a 3800 Bar. O intensificador converte a energia do fluido hidráulico de baixa pressão em pressão ultra elevada da água. Isso ocorre por meio de um pistão recíproco na seção do atuador central contando com válvulas direcionais em ambos os lados.

O acumulador tem a função de manter um fluxo contínuo de água a alta pressão e eliminar flutuações de pressão, típicas de uma bomba alternativa, como a de pistão. Seu funcionamento se dá baseado na compressibilidade da água (12% quando em 3800 Bar)

que é usada para manter pressão de descarga e velocidade do jato uniformes, quando a bomba muda de direção.

As linhas de transmissão de alta pressão transportam a água em direção ao cabeçote de corte. Diâmetros típicos para esses tubos são entre 6 e 14 mm. A ação de corte é controlada tanto manualmente ou através de uma válvula de controle remoto especialmente desenvolvida para tal propósito.

O bocal proporciona um fluxo de jato de água coerente de forma a otimizar o corte de materiais macios de baixa densidade, que são consideráveis não usináveis por métodos tradicionais. Os bocais normalmente são feitos de safira sintética.

Dreno: funciona como um reservatório de coleta dos resíduos provenientes da usinagem. Também funciona como redutor do nível de ruído associado com a redução da velocidade da água a níveis subsônicos.

#### Vantagens e limitações

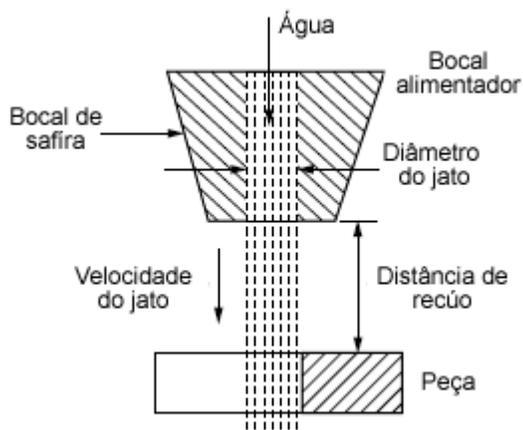
As principais vantagens da usinagem a jato de água são:

- Capacidade de corte multidirecional
- Nenhum calor é produzido
- Cortes podem ser iniciados em qualquer lugar, sem a necessidade de pré-furo.
- A peça é pouquíssimo molhada
- Não há deflexão no resto da peça
- A rebarba produzida é mínima
- A ferramenta não desgasta e conseqüentemente não necessita ser afiada
- O processo é ambientalmente seguro
- Os problemas de contaminação de poeira e eliminação de resíduos que são freqüentes em outros métodos de limpeza, não existem nesse método.
- Pode haver mais de uma usinagem ocorrendo ao mesmo tempo na mesma peça.
- A fixação do material é simples, o que reduz o tempo de ciclo e o custo.
- Retificação e polimento não são necessários
- É ideal para materiais reflexivos a laser, tais como cobre e alumínio.

- Permite um corte mais macio de material macio
- Corta completamente material muito grosso (383 mm de titânio e 307 mm de Inconel)

As principais desvantagens do método estão relacionadas a:

- Não é apropriado para produção em massa devido a elevados requerimentos de manutenção.



#### **4. USINAGEM A JATO ABRASIVO**

Na usinagem a jato abrasivo (Abrasive Jet Machining – AJM) um fluxo de grãos abrasivos de  $Al_2O_3$  ou SiC carregados por um gás ou ar de alta pressão e alta velocidade é focalizado na superfície de trabalho. O material da peça é removido pela ação mecânica da abrasão proveniente do impacto das partículas abrasivas em alta velocidade. A aplicação melhor realizada pela usinagem AJM é a usinagem de furos em materiais muito duros. É tipicamente usada para cortar, limpar, rebarbar, e cortar vidros, cerâmicas, e metais duros (ferrosos e não ferrosos).

#### Sistema de usinagem

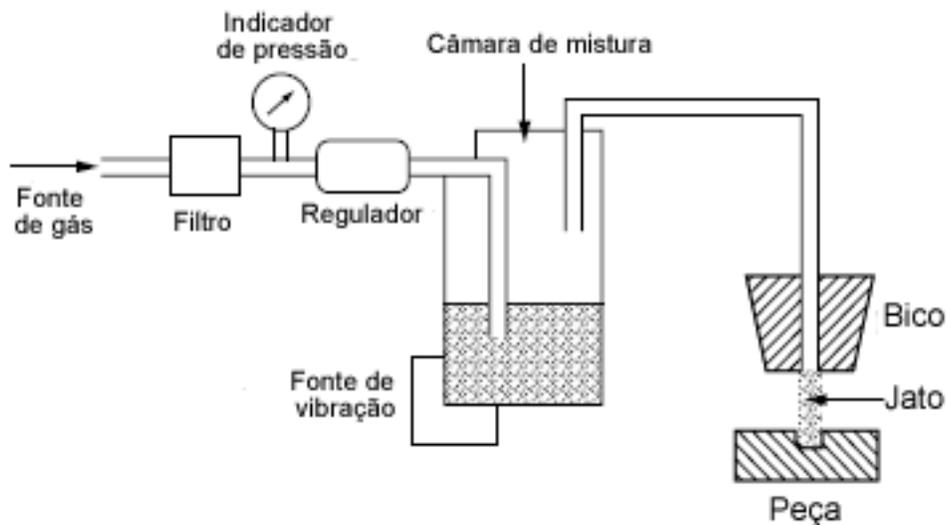


Figura 12 – Sistema de usinagem a jato abrasivo

Nesse sistema de usinagem, como mostrado na figura 12, é usado gás (nitrogênio,  $CO_2$ , ou ar) sob uma pressão de 2 a 8  $Kg/cm^2$ . Oxigênio nunca deve ser usado, uma vez que pode causar uma reação química violenta com o cavaco da peça ou com o abrasivo. Após a filtragem, o gás passa por uma câmara de mistura que contém partículas abrasivas e vibra a 50 Hz. Da câmara de mistura, o gás, junto com as partículas abrasivas (10-40  $\mu m$ ), passa através de um bocal de carbeto de tungstênio de 0.45 mm de diâmetro, com velocidades de 150 a 300 m/s.

Pó de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e carbeto de silicone são usados em limpeza pesada, corte e rebarbamento. Carbeto de magnésio é recomendado para o uso na limpeza

mais leves e gravura, enquanto bicarbonato de sódio é usado na limpeza suave e no corte de materiais macios.

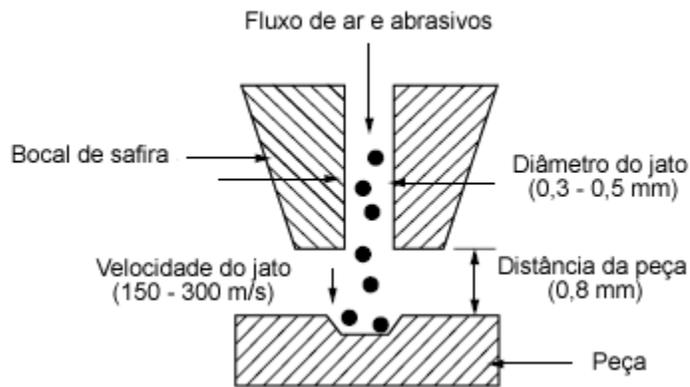


Figura 13 – Mecanismo de remoção de material na usinagem a jato abrasivo

O mecanismo de remoção de material se dá como mostrado na figura. Partículas de abrasivo provenientes do bocal seguem caminhos paralelos durante uma curta distância e então o jato abrasivo se torna cônico. Quando os cantos afiados das partículas abrasivas atingem um material duro e frágil em velocidades elevadas, surgem pequenas fraturas no material, das quais pequenas partículas se desprendem. Tais partículas são carregadas pela ação do gás ou do ar.

#### Capabilidade do processo

A taxa de remoção do material, a acurácia do corte, a rugosidade da superfície resultante, e o desgaste do bocal são influenciados pelo tamanho e distância do bocal; composição, resistência, tamanho e forma dos abrasivos; e composição, pressão e velocidade do gás. Grãos maiores produzem taxas de remoção de material também maiores.

A taxa de remoção de material típica do processo é 16,4 mm<sup>3</sup>/min no corte de vidro. Taxas de corte para metais variam entre 1,6 e 4,1 mm<sup>3</sup>/min. Para cerâmicas mais duras, as taxas de corte são aproximadamente 50% maiores que para as taxas para vidro. Tolerâncias típicas do processo são de +/- 0,13 mm a +/-0,05 mm usando uma boa

fixação e um bom controle de movimento. Rugosidades da superfícias de 0,2 e 1,5  $\mu\text{m}$  podem ser obtidas usando partículas de 10 e 50  $\mu\text{m}$  respectivamente

#### Vantagens e limitações

Algumas vantagens da usinagem a jato abrasivo incluem:

- Devido ao processo ser “frio”, o processo pode ser usado com sucesso na usinagem de materiais quebradiços e sensíveis a calor, como vidro, quartzo, safira e cerâmicas.
- O processo pode ser usado para usinar superligas e materiais refratários
- A usinagem não reativa com nenhum material de peça.
- Trocas de ferramenta na são requeridas
- Peças complicadas com cantos vivos podem ser usinadas
- Os materiais usinados não sofrem endurecimento
- Não é necessário um furo inicial, como no caso da eletroerosão a fio

As principais limitações do processo se referem a:

- A taxa de remoção é lenta
- A dispersão do corte não pode ser evitada (baixa exatidão +/- 0,1 mm)
- O efeito de afunilamento pode ocorrer especialmente na furação de metais
- O abrasivo pode se acumular na superfície de trabalho
- Sistemas de coleta dos grãos devem ser providenciados
- Materiais macios não podem ser usinados por esse processo
- Pó de sílica ocasiona riscos de saúde
- O ar do ambiente de usinagem deve ser filtrado de forma a remover umidade e óleo

#### **5. USINAGEM A JATO DE ÁGUA ABRASIVO**

O processo de usinagem por jato de água abrasivo é usado no corte de plástico, comida, tapetes automotivos e em indústrias têxteis. Materiais mais duros, como vidro, plástico, cerâmica, concreto e alguns compósitos também podem ser cortados com a adição de abrasivos ao jato de água no que usualmente é chamado usinagem de jato de água abrasivo (UJAA). A adição de abrasivos ao jato de água aumenta a taxa de remoção e produz velocidades de corte entre 51 e 460 mm/min. Geralmente, a usinagem por jato de água abrasivo corta 10 vezes mais rápido que os métodos convencionais de usinagem de materiais compósitos. O jato de água abrasivo é centenas, se não milhares, de vezes mais poderoso que o jato de água pura.

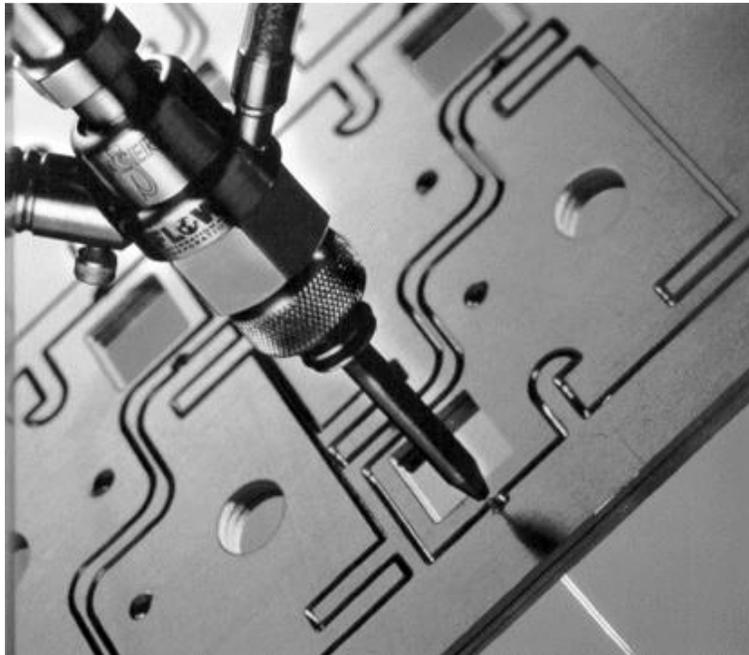


Figura 14 – Usinagem a jato de água abrasivo

Na UJAA, uma baixa pressão de 4.2 bar é usada para acelerar um grande volume da mistura de água (70%) com abrasivo (30%) a velocidades de até 30 m/s. Carbetos de silicone, corundum e glass beads com tamanhos de grão entre 10 e 150  $\mu\text{m}$  são freqüentemente usados como material abrasivo. Usando tal método, rebarbas de 0.35 mm de altura e 0.02 mm de largura em componentes de aço retificados são removidas pela ação erosiva dos abrasivos carregados pela água. A introdução de ar comprimido no jato de água melhora a ação de rebarbação.

### Sistema de usinagem

No IJAA, o fluxo do jato de água acelera as partículas abrasivas de forma a remover material da peça. Depois que o jato de água pura é criado, abrasivos são adicionados usando métodos de injeção ou suspensão mostrados na figura. Os parâmetros importantes com relação ao abrasivo são a estrutura do material e sua dureza, o comportamento do material, forma do grão, tamanho do grão e distribuição.

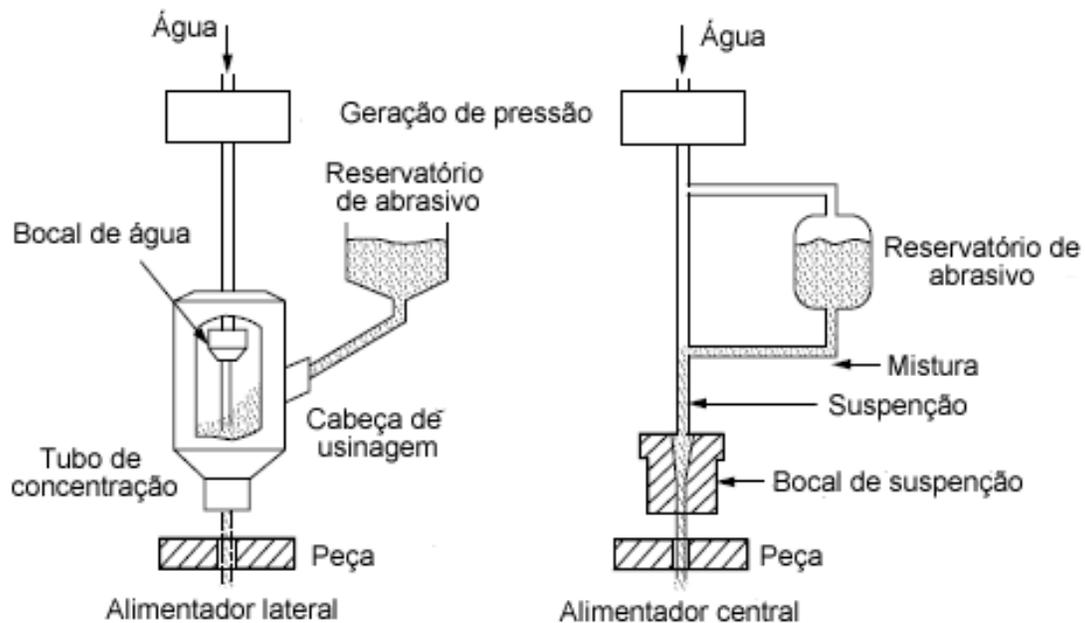


Figura 15 – Jatos de injeção e suspensão respectivamente.

O sistema básico de usinagem incorpora os seguintes elementos.

- Fornecimento de água
- Alimentador de abrasivo
- Intensificadores
- Filtros
- Câmara de mistura

### Capabilidades do processo

As variáveis típicas do processo incluem pressão, diâmetro do bocal, distância entre o bocal e a peça, tipo de abrasivo, granulometria, e taxa de avanço da peça. Um jato de água abrasivo corta através de placas de 356.6 mm de espessura de concreto ou 76.6 mm de espessura de aço ferramenta em um passe único. A rugosidade da superfície produzida fica entre 3.8 e 6.4  $\mu\text{m}$ , enquanto tolerâncias de  $\pm 0.13$  podem ser obtidas. Repetibilidade de  $\pm 0.4$  mm. Areia de fundição é frequentemente usada no corte de portais e escadas. Entretanto, garnet, que é o material abrasivo mais comum, é 30% mais efetivo que areia.

Na usinagem de vidros, velocidade de corte de 16.4  $\text{mm}^3/\text{min}$  são alcançadas, sendo que essa velocidade pode ser de 4 a 6 vezes maior em metais. A rugosidade superficial depende do material da ferramenta, granulometria, e tipo de abrasivo. Um material com uma elevada taxa de remoção produz elevado grau de rugosidade. Por esse motivo, grãos finos são usados na usinagem de metais moles de forma a obter a mesma rugosidade que grãos mais grossos em materiais mais duros. O decréscimo da rugosidade superficial em tamanhos de grão menores está relacionada a redução da profundidade de corte e não deformação do cavaco na seção transversal. Outro comportamento está relacionado ao número de grãos por unidade do líquido veículo. Quanto maior o número de grãos, mais grãos caem por unidades de área da superfície.

O líquido veículo consiste de água com aditivos anticorrosivos com densidade bem maior que a do ar. Isso contribui para uma elevada aceleração dos grãos com uma conseqüente maior velocidade dos grãos no contato com a superfície e maior taxa de remoção de metal. O veículo também se espalha pela superfície preenchendo cavidades e formando um filme que impede a ação de impacto dos grãos. Irregularidades no topo da superfície são as primeiras a serem afetadas, sendo que sua qualidade superficial acaba sendo melhor.

## **6. USINAGEM QUÍMICA**

A usinagem química é a dissolução química controlada do material de uma peça pelo contato com um reagente forte. Revestimentos especiais chamados máscaras protegem áreas nas quais o metal não deve ser removido. O processo é usado para produzir contornos e remover pouco material de peça.

Durante a usinagem química, a profundidade do ataque é controlada pelo tempo de imersão. Como forma de prevenir usinagens não desejadas, os produtos químicos que agem na superfície que está sendo usinada devem ser frescos. Os produtos químicos usados são muito corrosivos e devem ser manipulados com adequada precaução. Ambos o vapor e o efluente devem ser adequadamente controlados de forma a proteger o ambiente. Agitação da peça e do fluido é usual, entretanto, um fluxo excessivo na solução pode resultar em canalização, sulcos e cumes. A inclinação da peça pode prevenir a canalização de bolhas de gás. A escala de temperaturas típica dos reagentes é de 37°C a 85°C. Ataque mais rápidos ocorrem em elevadas temperaturas, mas devem ser controlados dentro de +/- 5 °C da temperatura desejada a fim de se alcançar uma usinagem uniforme.

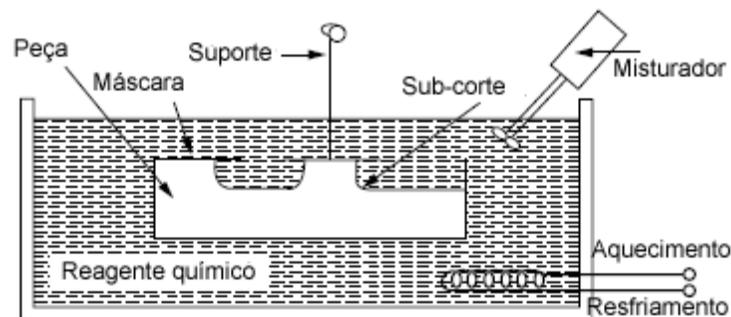


Figura 16 – Processo de usinagem química

Quando a máscara é usada, a ação da usinagem age tanto internamente a abertura da máscara e quanto lateralmente abaixo da máscara criando o efeito de gravura mostrado na figura. O chamado fator de gravura é a relação entre a largura de remoção abaixo da máscara e profundidade da gravura. Um típico fator de gravura 1:1 ocorre à profundidade de corte de 1.27 mm. Cortes mais profundos podem reduzir essa proporção para 1:3.

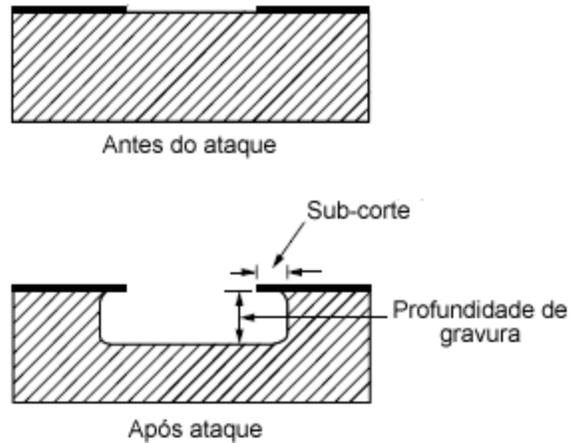


Figura 17 – Processo de gravura

A usinagem química não elimina irregularidades de superfície, riscos ou waviness. Etapas sucessivas de remoção de máscara e imersão, como mostradas na figura 18, podem provocar degraus de corte. Cortes afilados podem igualmente ser produzidos sem mascarar a superfície, através do controle de profundidade de corte e taxa de imersão ou número de imersões.

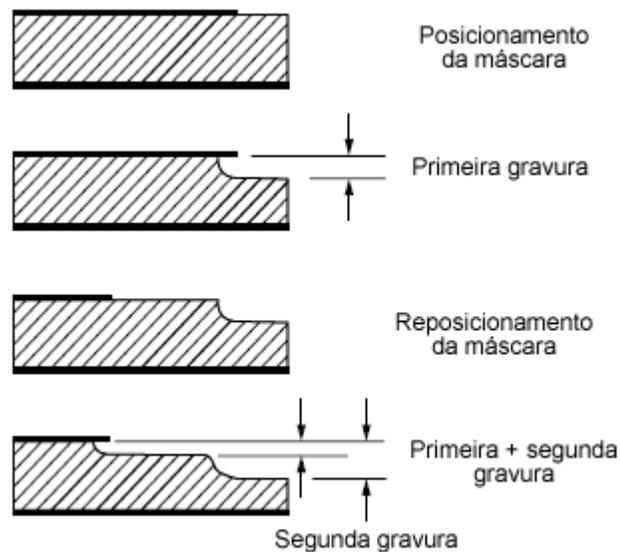


Figura 18 – Sucessivas gravuras na usinagem química

Sistema de usinagem

O processo de usinagem química consiste das seguintes etapas:

- Remoção das tensões residuais, de forma a evitar deformações posteriores;
- Preparação e pré-limpeza da superfície da peça. Isso proporciona uma boa adesão do material de cobertura e garante a abstenção de contaminantes que podem interferir com o processo de usinagem
- Preparação da cobertura normalmente usando uma máscara, que é quimicamente impregnável e aderente o suficiente de forma a suportar a abrasão química durante o ataque químico
- Aplicação da máscara, a qual é guiada por modelos que expõem as áreas que irão receber o tratamento químico. O tipo de máscara selecionada depende do tamanho da peça, do número de peças a serem feitas, e da resolução de detalhes desejada. Máscaras silk-screen são preferíveis em cortes rasos que requerem tolerâncias dimensionais estreitas.
- Aplicação do reagente, processo no qual a temperatura e agitação do reagente devem ser controlados
- Lavagem do reagente
- Remoção da máscara

#### Capabilidade do processo

Os parâmetros do processo da usinagem química incluem o tipo da solução do reagente, a concentração, as propriedades, proporção da mistura, temperatura de funcionamento, e nível de circulação. O processo é afetado igualmente pela máscara e por sua aplicação. Estes parâmetros terão impactos diretos na peça com relação a:

- Fator de gravura
- Gravura e taxa de usinagem
- Tolerância
- Acabamento superficial

A taxa de remoção do material depende da uniformidade química e metalúrgica da peça e da uniformidade da temperatura da solução.

Na usinagem química, o metal é dissolvido pela ação do reagente. Superfícies usinadas pela usinagem química não possuem um padrão regular. Baseado no tamanho de grão, orientação, tratamento térmico e tensões previamente induzidas, todo material tem um acabamento superficial básico que é o resultado final da usinagem química. Enquanto imperfeições superficiais não serão eliminadas pela usinagem química, qualquer irregularidade de superfície, waviness, dentes e riscos serão levemente alterados e reproduzidos na superfície da peça.

A taxa de usinagem afeta a rugosidade superficial e conseqüentemente a tolerância produzida. Geralmente, gravuras leves irão produzir um acabamento superficial similar ao acabamento original da peça. A figura mostra rugosidades superficiais típicas para diferentes materiais.

A rugosidade superficial também é influenciada pela rugosidade inicial da peça.

#### Vantagens e limitações

O processo apresenta as seguintes vantagens:

- Redução de peso em peças de contorno complexo, as quais são difíceis de serem usinadas por método convencionais
- Remoção simultânea de material em todas as superfícies, aumentando produtividade
- Nenhuma rebarba é formada
- Tensões não são introduzidas na peça, o que minimiza distorções na geometria e torna possível a usinagem de peças delicadas
- O custo capital do equipamento, usado na usinagem de componentes grandes, é relativamente pequeno
- Mudanças de design podem ser implementadas rapidamente
- Exige menor preparo do operador
- Baixo custo de ferramentas
- Boa qualidade superficial em conjunto com a ausência de rebarbas elimina a necessidade de operações de acabamento
- Várias peças com detalhes delicados podem ser usinadas ao mesmo tempo

- Acabamentos decorativos e áreas extremamente finas podem ser obtidos
- Baixa porcentagem de rejeitos (3%)

O processo de usinagem química apresenta as seguintes limitações:

- Apenas cortes rasos são praticáveis. Menos de 12.27 mm para folhas e placas, 3.83 mm em extrusões, e 6.39 mm em forjamentos.
- Manuseio e disposição de produtos químicos podem ser problemático
- Imperfeições superficiais são reproduzidas nas peças usinadas
- Superfícies metalúrgicas homogêneas são necessárias para obter os melhores resultados
- Cortes profundos e estreitos são difíceis de reproduzir
- Áreas soldadas frequentemente sofrem a ação do ataque a velocidades diferentes do metal base
- Remoção de material em apenas um lado pode resultar em distorções consideráveis
- A inexistência de tensões residuais nas superfícies quimicamente usinadas pode produzir resistência a fadiga desfavorável se comparado com processos que induzem tensões residuais de compressão.

## **7. USINAGEM ELETROQUÍMICA**

A usinagem eletroquímica (ECM) é um processo moderno de usinagem que se baseia na remoção de átomos da peça através de uma dissolução eletroquímica de acordo com os princípios de Faraday (1833).

A eletrólise ocorre quando uma corrente elétrica passa entre dois eletrodos imersos em uma do eletrólito. O sistema composto pelo eletrodo e o eletrólito é chamado de célula eletrolítica. As reações químicas, que ocorrem nos eletrodos, são chamadas de reações anódicas ou catódicas. A quantidade de metal dissolvida (removida pela usinagem) ou depositada é calculada pelas leis da eletrólise de Faraday, que define que:

1 A quantidade de massa dissolvida (removida pela usinagem) é diretamente proporcional a quantidade de eletricidade

$$m \propto It$$

2 A quantidade de diferentes substâncias dissolvidas pela mesma quantidade de eletricidade é proporcional a massa química equivalente das substâncias.

$$m \propto E$$

E portanto:

$$\epsilon = \frac{A}{Z}$$

Onde

I = Corrente Eletrolítica, A

t = Tempo de usinagem, min

E = Massa química equivalente, g

A = Massa atômica

Z = Valência da peça

A ECM utiliza uma corrente contínua de alta densidade de 0.5 a 5 A/mm<sup>2</sup> com baixa tensão de 10 a 30 V. A corrente de usinagem passa através da solução eletrolítica que preenche o espaço entre a peça anódica e a ferramenta catódica pré formatada. O eletrólito é forçado a fluir através do espaço entre os eletrodos em uma velocidade elevada, geralmente mais de 5 m/s, para intensificar transferência da massa e de carga

através da subcamada perto do ânodo. O eletrólito remove os produtos da dissolução, tais como hidróxidos do metal, calor, e bolhas de gás, geradas no espaço entre os eletrodos. A figura 4.1 ilustra a reação da dissolução do ferro em uma solução da água com cloreto de sódio (NaCl) como eletrólito. O resultado da dissociação do eletrólito e da dissolução do NaCl conduz a:

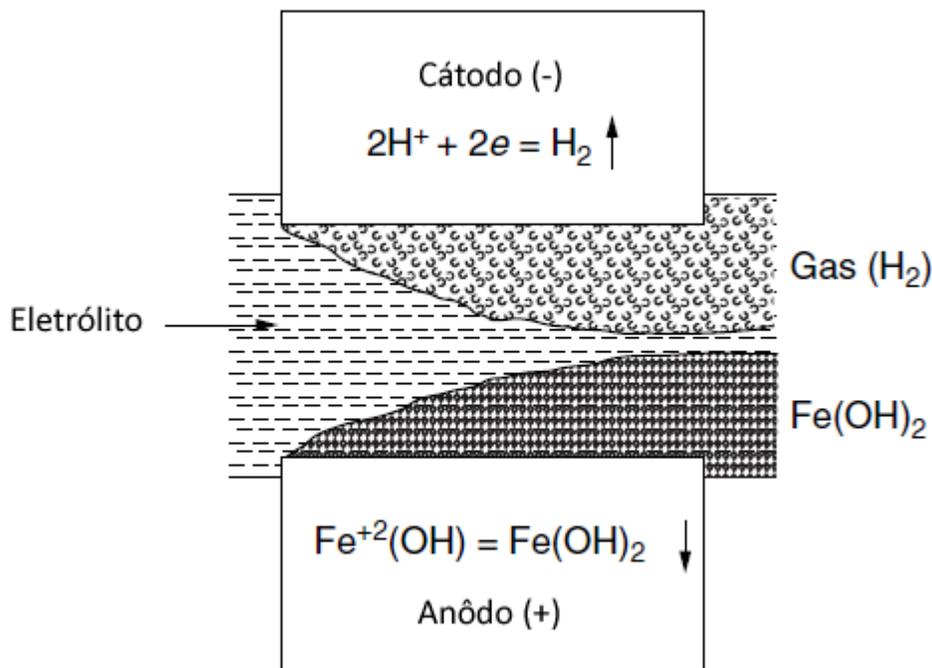
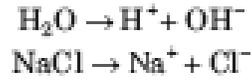


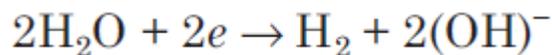
Figura 19 – Processo de usinagem eletroquímica

Os ânions  $\text{OH}^-$  e  $\text{Cl}^-$  carregados negativamente se movem em direção ao ânodo, e os cátions  $\text{H}^+$  e  $\text{Na}^+$  carregados positivamente se movem em direção ao cátodo.

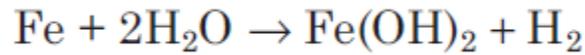
No ânodo, o Fe muda para  $\text{Fe}^{++}$  perdendo dois elétrons.



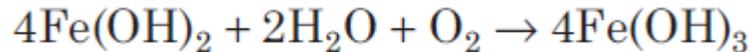
No cátodo, a reação envolve a geração de gás hidrogênio e íons de hidróxido.



O resultado dessas reações eletroquímicas é que os íons de ferro combinam com os outros íons precipitando na forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$



O hidróxido de ferro também pode reagir com água e oxigênio de forma a gerar hidróxido de ferro,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$



Com essa combinação metal-eletrólito, a eletrólise envolveu a dissolução do ferro, do anodo, e a geração de hidrogênio, no cátodo.

Sistema de usinagem

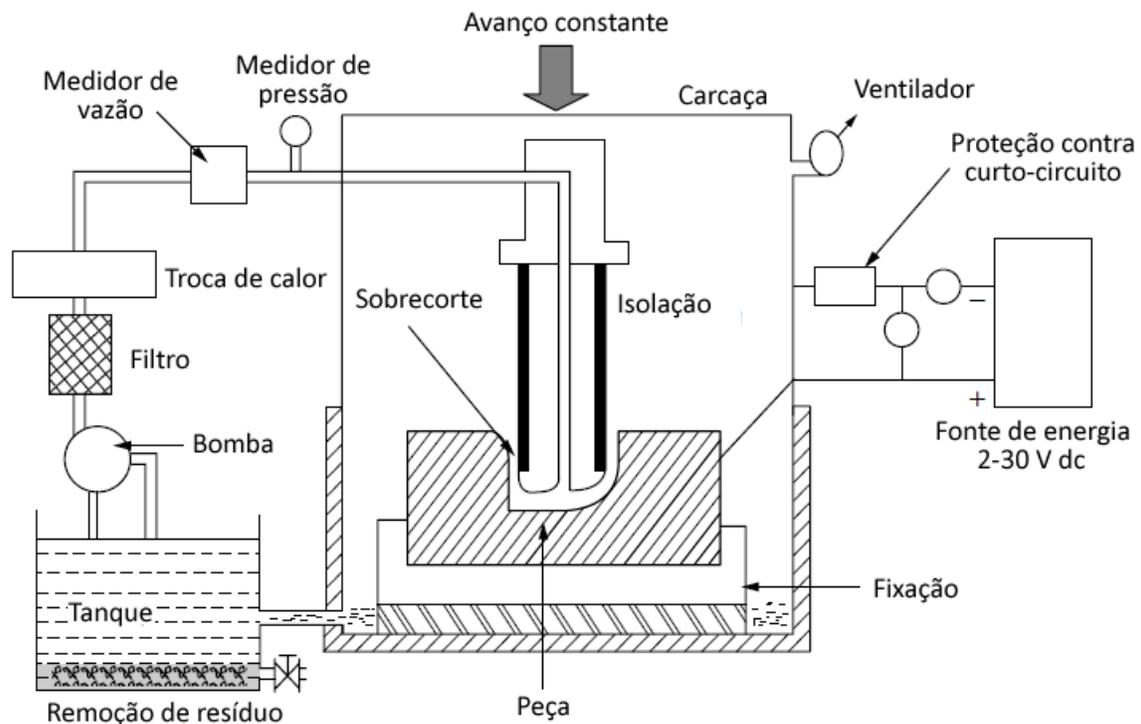


Figura 20 – Sistema de usinagem eletroquímica

A figura mostra os principais componentes de uma máquina de ECM: o sistema de controle de avanço, o sistema fornecedor de eletrólito, a fonte de energia, e o sistema de fixação da peça. Como mostrado na figura, o sistema de controle é responsável pelo

avanço da ferramenta a uma velocidade constante durante uma usinagem usual. A fonte de energia supre a máquina com uma tensão constante (contínua ou pulsada). A unidade fornecedora de eletrólito fornece eletrólitos a uma dada taxa, pressão e temperatura. Facilidades como filtragem do eletrólito, controle de temperatura, e remoção de resíduo também estão inclusas. Máquinas ECM são capazes de realizar uma grande variedade de operações. Máquinas automáticas e semi automáticas são usadas em usinagens de larga escala, como por exemplo, rebarbação na indústria automotiva. Máquinas ECM, em contraste com máquinas ferramentas convencionais, são projetadas para suportar o ataque da corrosão, utilizando para isso materiais não metálicos. Para máquinas que necessitam de maior força ou rigidez, metais com coberturas não metálicas são recomendados.

#### Capabilidade do processo

As tolerâncias dimensionais típicas da ECM são +/- 0.13 mm em aberturas frontais e +/- 0.25 mm para aberturas laterais. Um controle apropriado dos parâmetros de usinagem levam a uma tolerância estreita de +/- 0.025 mm. É difícil usinar raios internos menores que 0.8 mm, e raios externos menores que 0.5 mm. Profundidades de corte de 0.5 mm, conicidade de 0.001 mm/mm, e raios de canto de 2.5 mm são possíveis e dependem da configuração do cátodo ferramenta usado.

## **8. USINAGEM POR ELETROEROSÃO**

O princípio da usinagem por eletroerosão (EDM, do inglês Electrical Discharge Machining) é baseado na erosão dos metais por meio de descargas elétricas. É de amplo conhecimento que dois condutores com diferença de potencial adequado podem provocar um arco voltaico quando unidos. Se o ponto de contato entre os dois condutores for bem examinado, então será encontrada uma pequena porção de material erodida, deixando uma pequena cratera. Deve-se perceber que o princípio de funcionamento do processo também é seu limitante: apenas materiais condutores de eletricidade podem ser eletro-erodidos.

Apesar de esse fenômeno ser conhecido desde a descoberta da eletricidade, um processo baseado nesse princípio só foi desenvolvido em 1940, para a recuperação de peças com ferramentas quebradas em seu interior (machos, brocas, alargadores).

Durante a Segunda Guerra Mundial, a necessidade de acelerar a produção industrial e a escassez de mão-de-obra impulsionaram a pesquisa de novas tecnologias, visando tornar possível o aumento da produção com um mínimo de desperdício. Esse esforço marcou o início, entre outras realizações, da era da eletro-erosão.

Esse processo apresenta duas variações principais: a eletro-erosão por penetração e a eletro-erosão a fio.

#### Eletroerosão por penetração

O sistema básico da EDM por penetração consiste de uma ferramenta modelada (eletrodo) e o material a ser usinado conectados a uma fonte CC e mergulhados em fluido dielétrico (Figura 21).

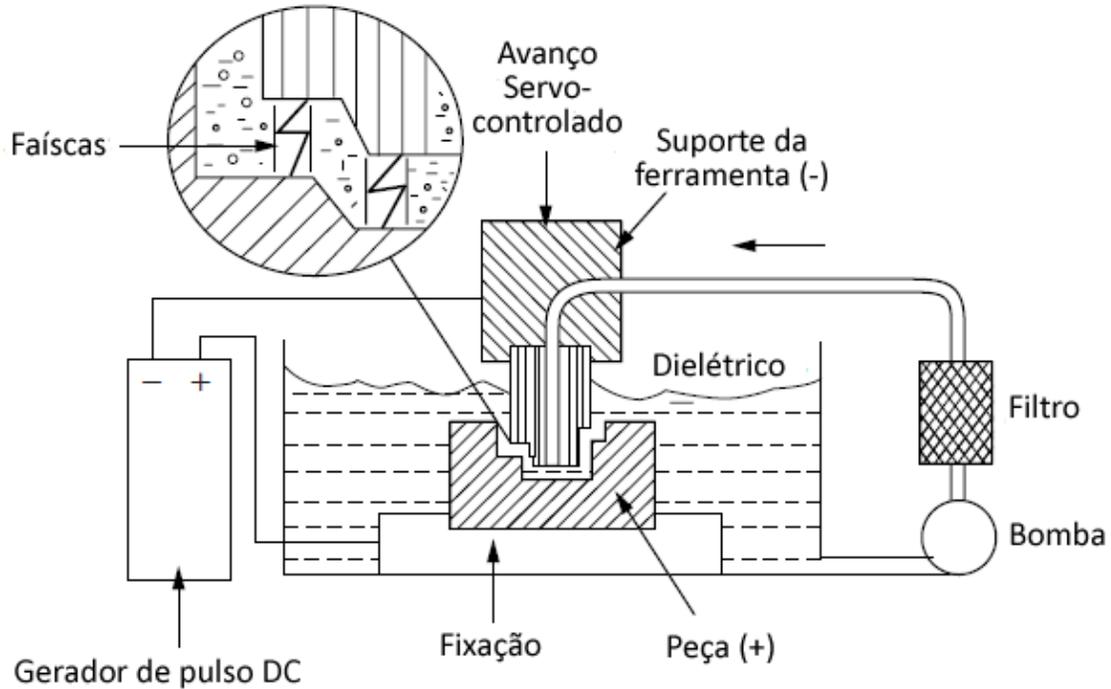


Figura 21 – Sistema usinagem por eletroerosão por penetração

Quando a diferença de potencial entre a peça e o eletrodo é suficientemente alta, o dielétrico se rompe (ioniza) e uma descarga atravessa o fluido, removendo uma pequena quantidade de material da superfície da peça (Figura). A região onde ocorre a descarga é aquecida a temperaturas extremamente altas (2.500 a 50.000 °C), de tal forma que minúsculas porções são repentinamente fundidas e removidas. Em algumas situações, o material pode ser até mesmo evaporado. O fluxo de dielétrico leva essas pequenas partículas (cavacos) embora. Como o local que acabou de sofrer a remoção de material está agora separado da ferramenta por uma distância maior, a probabilidade de ocorrer uma nova descarga ali é menor até que as outras regiões tenham o mesmo nível ou níveis menores. Apesar das descargas removerem material em pontos bem localizados, elas ocorrem centenas ou milhares de vezes por segundo até que ocorra a erosão de toda a superfície na área do gap.

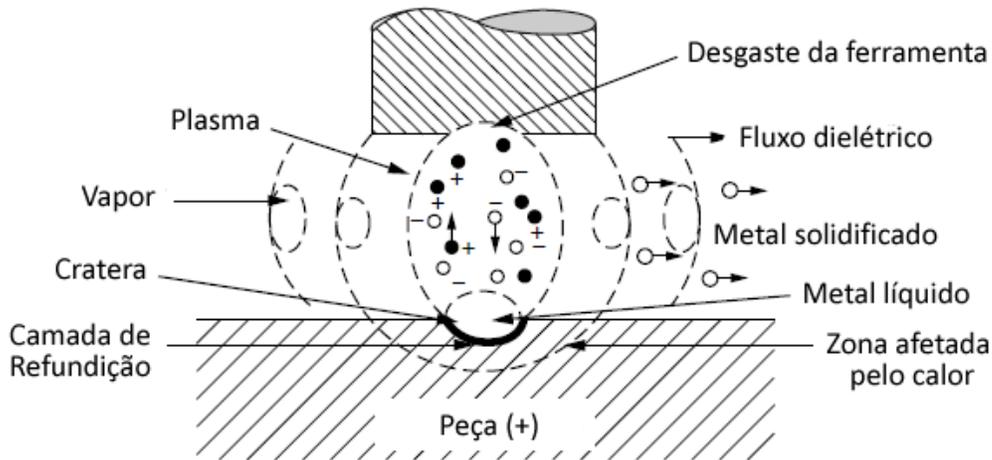


Figura 22 – Processo de eletroerosão

A descarga ocorre em taxas entre 200 e 500 kHz com tensões entre 50 e 380 V e correntes na faixa de 0,1 a 500 A. O volume de material removido por descarga está em torno de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  mm<sup>3</sup>. As formas de onda de tensão e corrente são mostradas na Figura .

O processo de EDM pode ser usado em qualquer tipo de material condutor de eletricidade. O ponto de fusão e o calor latente fusão são propriedades físicas importantes que determinam o volume de material removido por descarga. Quando essas propriedades aumentam, a taxa de remoção diminui. A taxa de remoção do material pode ser estimada pela fórmula empírica a seguir:

$$TRM = \frac{4 \cdot 10^4 \cdot I}{T_m^{1,23}}$$

Onde: TRM = Taxa de remoção do material (mm<sup>3</sup>/min)

I = Corrente (A)

T<sub>m</sub> = Temperatura de fusão do material da peça (°C)

As descargas que causam a erosão na peça também a causam na ferramenta, criando uma pequena cavidade na superfície do eletrodo. O desgaste da ferramenta é usualmente medido como uma relação entre o material removido da peça e o material

removido da ferramenta. Essa relação varia entre 0,5 e 100, dependendo da combinação entre o material do eletrodo e o material da peça. Com ajustes convenientes da máquina, é possível controlar a erosão, de modo que se obtenha até 99,5% de erosão na peça e 0,5% no eletrodo.

A peça é fixada em um tanque contendo o fluido dielétrico e seus movimentos muitas vezes são controlados por comando numérico. A distância entre a ferramenta e a peça (gap) é crítica. Essa distância corresponde a quanto a cavidade usinada ultrapassa a medida da ferramenta em cada lado (overcut), como mostrado na Figura. Assim, a taxa de avanço da ferramenta é controlada por um servomecanismo que mantém um gap constante automaticamente.

Devido ao fato do processo não envolver energia mecânica, a dureza, resistência e a ductilidade do material da peça não influem necessariamente na TRM. Por isso, a EDM pode ser utilizada depois de a peça passar por tratamentos térmicos e químicos de endurecimento

#### Eletroerosão a fio

O uso da eletroerosão a fio é o maior desenvolvimento recente do processo de EDM. A maior parte deste tipo de máquina possui comando numérico e há máquinas com sete eixos, o que permite a confecção de peças com perfis extremamente complicados. O fio empregado como eletrodo normalmente é de cobre ou bronze, com diâmetros da ordem de 0,05 a 0,25 mm, e é continuamente enrolado entre duas polias a uma velocidade de aproximadamente 0,15 a 9 m/min. O dielétrico, normalmente de água deionizada, é freqüentemente injetado na zona de usinagem, coaxialmente com o fio. Devido a esta contínua alimentação de fio, uma nova porção de eletrodo é sempre apresentada para erodir uma nova porção do material (Figura). Atualmente há a possibilidade de uma realimentação automática em caso de quebra do fio. Neste processo as correntes variam entre 2 e 3 A. A velocidade de corte neste caso é dada em termos da área de corte da seção por unidade de tempo.

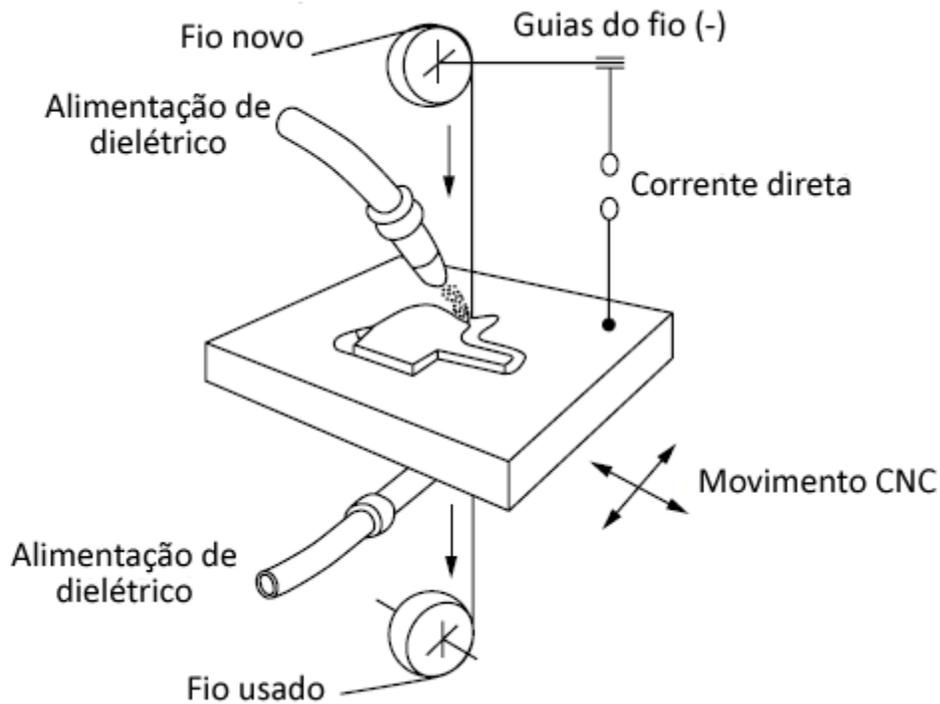


Figura 23 – Sistema de usinagem por eletroerosão a fio

Para a confecção de cantos vivos internos ou raios bem pequenos são empregados fios de tungstênio e molibdênio de diâmetros de 50  $\mu\text{m}$  e até menores. Outros tipos de fio como cobre com cobertura de zinco são usados para aumentar a corrente e, conseqüentemente, a velocidade de usinagem. A definição de folga, nesse caso, é mostrada na Figura e está na faixa de 0,02 a 0,05 mm, o que permite que, em algumas situações, seja possível a obtenção de punção e matriz simultaneamente do mesmo material.

O processo de EDM a fio encontra muitas aplicações como, por exemplo, a confecção de ferramentas de conformação, estampos e até mesmo eletrodos para a EDM de penetração.

#### Capabilidade do processo

O processo de EDM normalmente confere à peça uma superfície brilhante formada por pequenas crateras com relação diâmetro-profundidade entre 5 e 50. Em

baixas potências, essas crateras são da ordem  $25 \cdot 10^{-4}$  mm de profundidade e diâmetros de  $125 \cdot 10^{-4}$  mm. Quando grandes potências são usadas, o tamanho das crateras pode aumentar mais que 30 vezes, formando diâmetros de 60  $\mu\text{m}$  e profundidades de 12  $\mu\text{m}$ .

A formação dessas crateras é devido principalmente a ação das descargas, mas o tipo do dielétrico e do material do eletrodo também interferem.

A rugosidade superficial tende a diminuir com o aumento da frequência de pulsos de descarga e com a redução da corrente, assim como o overcut (Figura). Os acabamentos superficiais típicos encontram-se entre 1,6 e 3,2  $\mu\text{m}$ , embora exista registros menores que 0,05  $\mu\text{m}$ . As tolerâncias normais são da ordem de  $\pm 25 \mu\text{m}$ , mas com escolhas e ajustes corretos pode-se chegar a  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

## 9. USINAGEM POR FEIXE LASER

Os métodos de usinagem modernos são estabelecidos para fabricar peças de materiais difíceis de usinar tais quais ligas resistentes termicamente e de elevada dureza; vários tipos de carbeto e materiais compósitos com fibras de reforço, stellites e cerâmicas. A usinagem convencional de tais materiais produz elevadas forças de corte que, em alguns casos particulares, podem não ser sustentáveis pela peça. A usinagem por feixe laser (Laser Beam Machining – LBM) é uma boa solução uma vez que está associada a outras propriedades do material, tais quais condutividade térmica e calor específico, assim como temperaturas de fusão e ebulição.

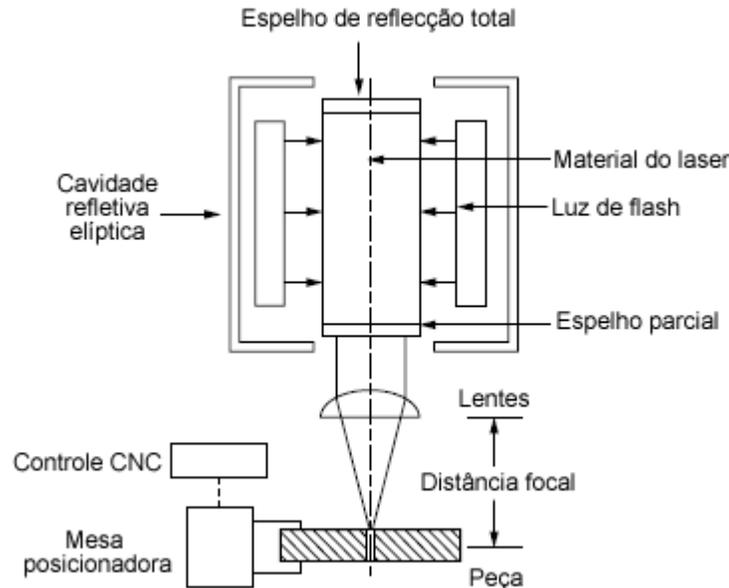


Figura 24 – Sistema de usinagem por feixe de laser

Laser é a abreviação de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação. Um feixe de luz coerente, altamente colimado e monocromático é gerado e focalizado em um ponto pequeno. Altas densidades de potência ( $10^6$  W/mm<sup>2</sup>) são então obtidas. Uma grande variedade de lasers está disponível no mercado incluindo os de estado-sólido, íon e moleculares, em modos de operação contínuo e pulsado, como mostrado na tabela. Os

lasers são largamente usados em muitas aplicações industriais incluindo chapeamento, tratamento térmico, revestimento, fabricação de ligas, soldagem e usinagem.

Tipo de laser		Tamanho de onda, nm	Performance típica
Sólido	Ruby	694	Pulsado, 5 W
	Nd-YAG	1064	Pulsado, CW, 1–800 W
	Nd-glass	1064	Pulsado, CW, 2 mW
Semi-condutor	GaAs	800–900	Pulsado, CW, 2–10 mW
Molecular	CO <sub>2</sub>	10.6 $\mu$ m	Pulsado, CW, <15 kW
Íon	Ar <sup>+</sup>	330–530	Pulsado, CW, 1 W–5 kW
	Excimer	200–500	Pulsado
Gás neutro	He-Ne	633	CW, 20 mW

Tabela 3 – Tipos de laser

### Sistema de usinagem

Como mostrado na figura, a luz não refletida é absorvida, o que causa o aquecimento da superfície da peça. Com uma quantidade de calor suficiente, a peça começa a derreter e evaporar.

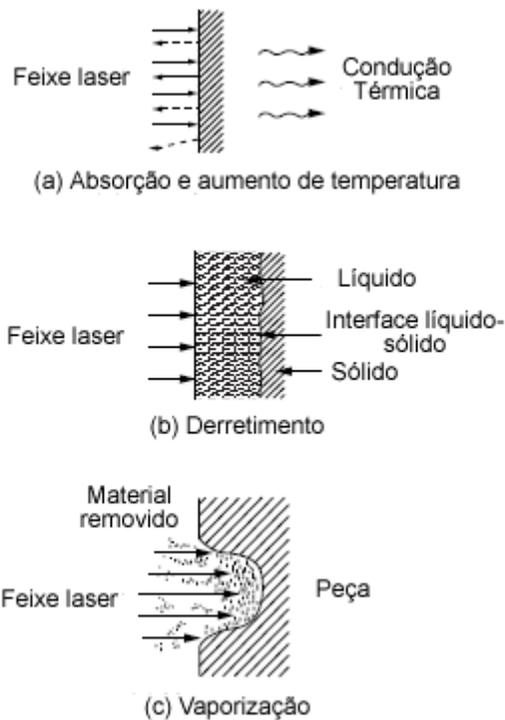


Figura 25 – Processo de usinagem por feixe de laser

A modelagem física da usinagem por feixe de laser é muito complexa devido principalmente às perdas por dispersão e reflexão ocorridas na superfície usinada. Adicionalmente, a difusão do calor no material causa mudança de fase, derretimento e/ou vaporização. Dependendo da densidade da potência aplicada e o tempo de interação do feixe, o mecanismo progride de absorção de calor e condução para derretimento e vaporização. Feixes laser de alta intensidade não são recomendáveis uma vez que eles formam um plume plasma perto ou na superfície do material, com uma conseqüente redução da eficiência do processo devido a absorção e perdas de dispersão.

A usinagem por feixe laser ocorre quanto a densidade da potência do feixe é maior que as perdas por condução, convecção, e radiação, sendo que a radiação deve penetrar e ser absorvida pelo material. A densidade da potência do feixe é dada por:

$$P_d = \frac{4L_p}{\pi F_l^2 \alpha^2 \Delta T}$$

O tamanho do diâmetro do ponto de foco  $d_s$ , é:

$$d_s = F_l \alpha$$

A taxa de usinagem (mm/min) pode ser descrita por:

$$\phi = \frac{C_l L_p}{E_v A_b h}$$

$$A_b = \frac{\pi}{4} (F_l \alpha)^2$$

$$\phi = \frac{4C_l L_p}{\pi E_v (F_l \alpha)^2 h}$$

A taxa de remoção volumétrica (VRR) (mm<sup>3</sup>/min) pode ser calculada como:

$$VRR = \frac{C_l L_p}{E_v h}$$

Onde:

$P_d$  = Densidade da potência, W/cm<sup>2</sup>

$L_p$  = Potência do laser, W

$F_l$  = Distância focal da lente, cm

$\Delta T$  = Duração do pulso laser, s

$\alpha$  = Divergência do feixe, rad

$C_l$  = Constante dependente do material e da eficiência da conversão

$E_v$  = Energia de vaporização do material, W/mm<sup>3</sup>

$A_b$  = Área do feixe laser no ponto de foco, mm<sup>2</sup>

$h$  = Espessura do material, mm

$d_s$  = Tamanho do diâmetro do furo, mm

Na LBM o material da peça é removido através de diversos efeitos, que incluem reflexão, absorção, condução da luz e o conseqüente derretimento e vaporização. O comportamento do material da peça com respeito a esses efeitos determina a taxa de remoção de material. A refletibilidade depende do tamanho da onda, das propriedades do material, do acabamento da superfície desejado e do nível de oxidação e temperatura da superfície.

Dado um tamanho de forma de onda, quanto maior a refletibilidade do material, menor a taxa de remoção e vice-versa. A maioria dos metais reflete aproximadamente 90% da radiação incidente com densidades de potência baixas. O nível de refletibilidade pode ser substancialmente reduzido, melhorando a usinabilidade do material, através da modificação das condições da superfície. A luz não refletida é então absorvida, o que eleva os elétrons a um estado de energia maior.

Vantagens e limitações

- Algumas vantagens que podem ser destacadas na usinagem a feixe laser incluem:
- Não existe desgaste da ferramenta e quebra
- Furos podem ser posicionados com acurácia através de um sistema laser óptico para o alinhamento
- Furos bem pequenos com um grande prolongamento podem ser produzidos
- Uma grande variedade de materiais duros e difíceis de usinar podem ser usinados
- A usinagem é extremamente rápida e tempos de setup são economicamente viáveis
- Furos podem ser feitos em ângulos de entrada difíceis
- Devido à flexibilidade, o processo pode ser facilmente automatizado assim como operações on-the-fly para materiais de fino calibre, que requerem apenas um tiro para produzir um furo
- O custo da operação é baixo

As principais limitações incluem

- Alto custo do equipamento
- Tapers são normalmente encontrados na furação direta
- Um furo que não transpassa todo o material, que necessita de profundidade precisa é difícil de ser usinado com um laser
- A grossura do material que pode ser usinado é restrita a 50 mm
- Materiais aderentes, que são encontrados principalmente no fim dos furos necessitam ser removidos

## 10. USINAGEM A FEIXE DE ELÉTRONS

A usinagem a feixe de elétrons (Electron Beam Machining – EBM) foi usada inicialmente em aplicações de soldagem na indústria nuclear e aeroespacial. Atualmente é também usada na manufatura de semicondutores assim como em áreas de micro-usinagem.

### Sistema de usinagem

Os componentes principais de uma instalação EBM, mostrados na Fig são confinados em uma câmara a vácuo, evacuada a aproximadamente  $10^{-4}$  torr. O filamento cátodo de tungstênio é aquecido a 2500-3000°C de forma a emitir elétrons. Um medição desse efeito é a corrente emitida, cuja magnitude varia entre 20 e 100 mA. A densidade da corrente correspondente fica entre 5 e 15 A/cm<sup>2</sup>. A corrente da emissão depende do material e temperatura do cátodo e de uma tensão alta que usualmente é aproximadamente 150kV. Tal alta tensão acelera um fluxo de elétrons na direção da peça. Depois da aceleração, elétrons, focados pelo campo, viajam através de um furo no anodo. O fluxo de elétrons é então refocado por um sistema de lentes eletrônico ou magnético, o que faz com que o fluxo sob controle seja direcionado para a peça. Os elétrons mantêm a velocidade ( $228 \times 10^3$  Km/s) proporcionada pela tensão de aceleração até atingirem a peça, sobre uma área bem definida, tipicamente 0.25 mm de diâmetro.

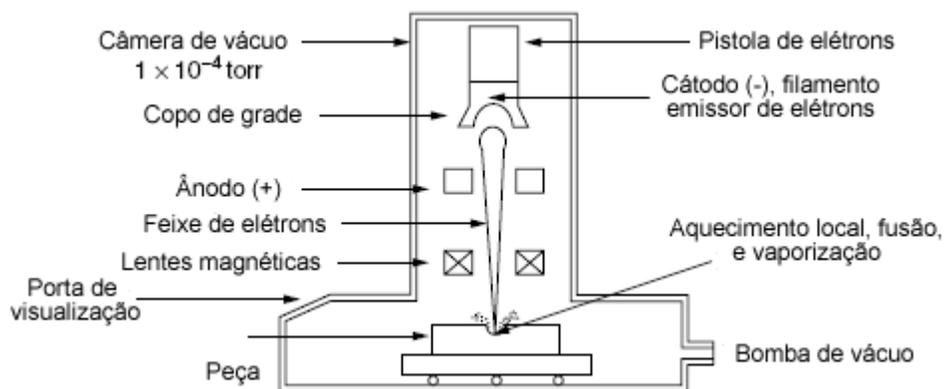


Figura 26 – Sistema de usinagem a feixe de elétrons

A energia cinética dos elétrons é então rapidamente transformada em calor, causando um correspondente aumento da temperatura na peça, acima do seu ponto de ebulição, o que causa remoção de material por evaporação. Com densidades de potência de 1.55 MW/mm<sup>2</sup> no processo de EBM, virtualmente qualquer material de engenharia pode ser usinado.

O modo como o feixe focado penetra a peça não é completamente entendido, dada a complexidade do mecanismo envolvido. Entretanto, acredita-se que a superfície do material é derretida pela combinação de pressão dos elétrons e tensão superficial. O líquido derretido é rapidamente ejetado e vaporiza o que causa taxas de remoção de material de aproximadamente 10 mm<sup>3</sup>/min. Um feixe pulsado de elétrons a 104 Hz reduz a temperatura da peça fora da região sendo usinada. Um recente atrativo da EBM foi a comparativamente alta relação profundidade por largura (100:1) que tornou viável aplicações de furação extremamente finas. A não existência de contato mecânico e a facilidade de integração a um controle automático aumentam a capacidade do processo, mas a necessidade de se trabalhar no vácuo aumenta o tempo de ciclo.

O número de pulsos requerido para remover um furo de profundidade  $g$  pode ser descrito como

$$n_e = \frac{g}{g_e}$$

O tempo de usinagem  $t_m$  é dado por

$$t_m = \frac{n_e}{f_p}$$
$$f_p = \frac{1}{t_p + t_i}$$

A taxa de furação (mm/min) pode ser calculada por

$$\Psi = \frac{gf_p}{n_e}$$

O número de pulsos ne pode ser descrito como uma função da tensão de aceleração  $V_a$  e da corrente de emissão  $I_e$ :

$$n_e = \frac{1}{KI_e V_a}$$

Portanto, a taxa de furação e a taxa de remoção volumétrica tornam-se:

$$\Psi = Kgf_b I_e V_a$$

$$VRR = \frac{\pi}{4} Kd_b^2 gf_b I_e V_a$$

No caso de um furo de profundidade  $g$  e largura  $L$ , o tempo para a furação seria:

$$t_m = \frac{\eta_e \cdot L}{f_b \cdot d_b}$$

A taxa de furação (mm/min) torna-se:

$$\eta = Kd_b f_p I_e V_a$$

A taxa de remoção volumétrica pode ser calculada por:

$$VRR = Kd_b^2 gf_p I_e V_a$$

Onde:

$g_e$  = Profundidade do furo removido por pulso, mm

$g$  = Profundidade do furo requerido, mm

$F_p$  = Frequência de pulsos, s-1

$T_p$  = Tempo de pulso,  $\mu$ s

$T_i$  = Intervalo do pulso,  $\mu$ s

$d_b$  = Diâmetro de contato do feixe com a peça, mm

$V_a$  = Tensão de aceleração do feixe, kV

$I_e$  = Corrente de emissão do feixe, mA

$K$  = Constante

$L$  = Largura do furo, mm

A profundidade da penetração depende do diâmetro do feixe, da densidade da potência, e da tensão de aceleração. Adicionalmente, a profundidade do material erodido por pulso depende da densidade do material da peça, assim como do diâmetro do feixe. Praticamente, o número de pulsos que produzem uma dada profundidade de furo normalmente diminui com um aumento da tensão de aceleração. Para um conjunto de condições de processo fixas, o número de pulsos requerido aumenta hiperbolicamente de acordo com que a profundidade do furo aumenta. Em termos práticos, essa conclusão significa que quando uma certa profundidade é alcançada, qualquer EBM realizado de forma a aumentar o furo iria requerer um grande aumento do número de pulsos. O tempo de usinagem, na EBM, requerido para usinar um furo depende do número de pulsos requeridos para erodir certa profundidade e da frequência do pulso.

#### Capabilidade do processo

O processo de EBM atinge profundidades de corte de até 6.4 mm<sup>2</sup>, sendo que é possível cortes estreitos (0.025 mm em espessura de 0.025 mm de metal). Ângulos de furo de 20° a 90° podem ser realizados. A taxa de remoção de material chega a 40 mm<sup>3</sup>/s enquanto a taxa de penetração é de 0,25 mm/s. As tolerâncias encontradas são de aproximadamente +/- 10% da profundidade de corte. A rugosidade superficial está na casa de 1µm.

#### Vantagens e limitações

Dentre as vantagens do processo de EBM pode-se destacar:

- Furação possível em altas taxas (até 4000 furos por segundo)
- Não há dificuldade quanto a ângulos agudos
- Os parâmetros de furação podem ser facilmente trocados durante a usinagem
- Não há limitação quanto a dureza, ductibilidade e refletividade da superfície do material
- Não ocorre distorção mecânica na peça, uma vez que não há contato.

- O processo é capaz de alcançar elevada acurácia e repetibilidade de 0.1 mm no posicionamento dos furos e 5% no diâmetro do furo.
- O processo produz o melhor acabamento superficial comparado com outros processos
- O custo é relativamente pequeno compara com outros processos usados para produzir furos pequenos

Dentre as limitações, cabe destacar:

- Elevado custo do equipamento
- Elevado tempo de produção dado o tempo necessário para se gerar um vácuo
- Presença de uma fina camada de
- Necessidade de material

## **11. USINAGEM A FEIXE DE PLASMA**

Quando a temperatura do gás é elevada a aproximadamente 2000oC, as moléculas do gás começam a se dissociar em átomos separados. Em temperaturas mais elevadas, 30.000oC, esses átomos tornam-se ionizados. O gás nesse estado é chamado plasma. Uma importante característica da usinagem a feixe de plasma (plasma beam manufacturing – PBM), é que esse método é o único que trabalha mais rápido em aço inoxidável do que em aços macios.

### Sistema de usinagem

Na usinagem a plasma um arco contínuo é gerado entre um cátodo de tungstênio quente e um ânodo de cobre refrigerado por água. Um gás é introduzido ao redor do cátodo e flui através do ânodo. A temperatura, no estreito orifício ao redor do cátodo, alcança 28000 oC, o que é suficiente para produzir um arco de plasma de temperatura elevada. Sob essas condições, o metal é rapidamente derretido e vaporizado. O fluxo de gás ionizado carrega os restos da usinagem na forma de um spray fino criando linhas de fluxo na superfície usinada. As características gerais do PBM são mostradas na tabela. As taxas de remoção de material, por esse método, são substancialmente maiores do que as taxas envolvidas na operação de torneamento. Os sistemas de usinagem a plasma são divididos em arco, jato, protegido e a ar.

### Arco de plasma

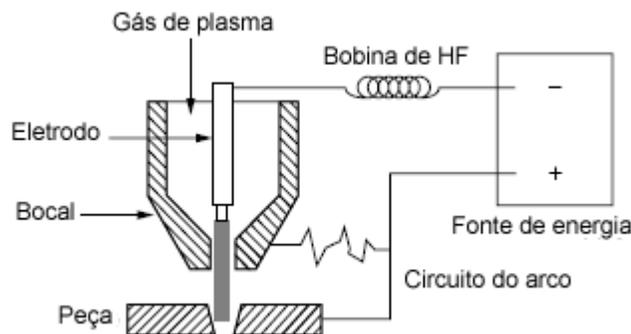


Figura 27 – Sistema de usinagem a arco de plasma

Como mostrado na figura, o arco é lançado da parte traseira do eletrodo da tocha de plasma a uma peça condutiva causando temperaturas que chegam a 33300oC. O efeito de arco duplo entre o bocal e a peça danifica tanto o eletrodo como a peça. Altas taxas de transferência de calor ocorrem durante o arco de plasma devido a transferência de todo o calor do ânodo para a peça. Devido a elevada eficiência dos sistemas de arco de plasma, eles são usados freqüentemente na usinagem de metais. O arco de plasma não depende de reações químicas entre o gás e o metal de trabalho. Devido a temperatura ser alta, o processo é bem sucedido em qualquer material eletricamente condutivo incluindo aqueles que são resistentes a corte oxi-gas.

#### Jato de plasma

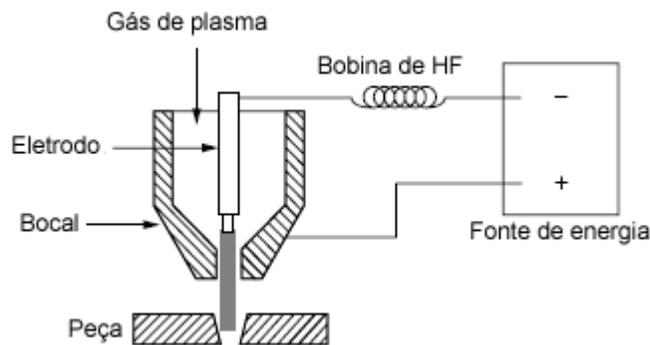


Figura 28 – Sistema de usinagem a jato de plasma

Nesse sistema, o arco não transferido é operado com a tocha de plasma. Apenas gás ionizado (plasma) é emitido na forma de jato gerando temperaturas que chegam a 16600 oC. Como a tocha em si é um ânodo, um grande parte do calor do ânodo é extraído pela refrigeração por água, e não é usado no processo de remoção de material. Materiais não condutores que são difíceis de serem usinados por método convencionais, são freqüentemente usinados com sucesso por sistemas de jato de plasma.

#### Plasma protegido

Plasma protegido por gás. Quando se usina materiais diferentes como alumínio, aço inoxidável, aços macios, gases de assistência podem ter que ser usados de forma a produzir cortes de qualidade aceitável. Em tal caso, uma proteção externa ao gás é adicionada, ao redor do bocal, de forma a reduzir o efeito da atmosfera no gás de usinagem (nitrogênio ou argônio). O gás de proteção depende do metal a ser usinado. Para aço inoxidável, alumínio e outros metais não ferrosos, o hidrogênio é freqüentemente usado com gás de proteção. O dióxido de carbono é popular para metais ferrosos e não ferrosos. Para metais macios, ar ou oxigênio podem ser também usados.

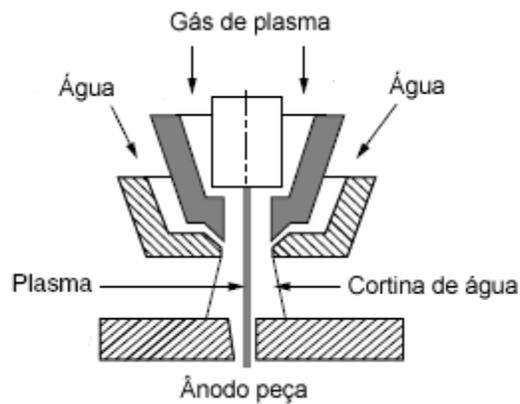


Figura 29 – Sistema de usinagem por plasma protegido por água

Plasma protegido por água. Como mostra a figura , nitrogênio é usado na usinagem enquanto o gás de proteção é substituído por água. A água forma uma capa radial ao redor da tocha de plasma. O efeito refrigerador da água reduz a largura da zona de corte e melhora a qualidade do corte. Entretanto, nenhuma melhora na taxa de corte pode ser observada.

Plasma a ar

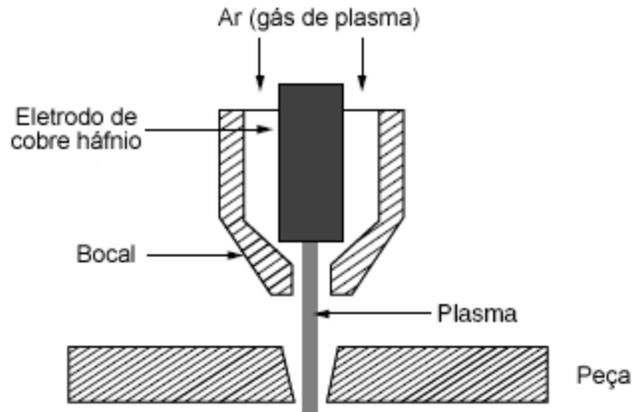


Figura 30 – Sistema de usinagem por plasma a ar

Ar comprimido pode ser usado como gás de usinagem ao invés de nitrogênio ou argônio. Quando o ar é sujeito a alta temperatura do arco elétrico, ele se quebra em seus gases constituintes. Como o oxigênio, no plasma resultante, é muito reativo especialmente com metais ferrosos, as velocidades de usinagem aumentam em 25%. A principal desvantagem de tal método é a superfície altamente oxidada, que é frequentemente obtida o caso de aço inoxidável e alumínio. Devido ao tungstênio se reativo com oxigênio, ligas de háfnio cobre (Hf-Cu) ou háfnio zircônio (Hf-Zr) também podem substituir eletrodos de tungstênio. Entretanto, a vida desses eletrodos se torna menor. Materiais condutores elétricos como ligas de aços inoxidável e níquel-cromo, alumínio e cobre podem ser usinadas por plasma a ar. Com o ar sendo usado para propósitos de usinagem e proteção, o custo de usinagem é aproximadamente metade do custo de um sistema protegido a gás ou a água. Quando a mistura de gás de 80% de nitrogênio com 20% de oxigênio é usada, a velocidade de usinagem de aços macios cresce em aproximadamente 25%

#### Capabilidade do processo

As arestas das peças cortadas pelo processo de PBM costumam ser arredondadas. A profundidade de metal fundido se estende a aproximadamente 0.18 mm além da superfície de corte, devido a elevada taxa de transferência de energia. A elevada velocidade de usinagem não permite que o calor penetre mais que alguns micrôns o que

produz pouca ou nenhuma distorção do corte. A área onde ocorre o corte tende a ser mais dura que a base do material. Devido ao rápido resfriamento, fissuras podem ocorrer na zona afetada pelo calor, de até 1.6 mm. Uma superfície limpa e lisa é produzida. Tolerâncias grandes de +/- 1.6 mm podem ser alcançadas.

#### Vantagens e limitações

As principais vantagens da tecnologia de plasma incluem

- Não requer análise ou manutenção química
- Não usa compostos como CFCs, solventes ou limpezas ácidas, que são perigosos ao ambiente
- Opera de forma limpa, freqüentemente eliminando a necessidade de um desengraxante de vapor, removedor de solvente, limpeza ultra-sônica ou de grãos.
- Elimina a necessidade de que o trabalhador seja exposto a compostos químicos perigosos
- Necessita de menos energia para ser operado

As principais limitações da tecnologia de plasma se referem a:

- Um grande gerador de energia é necessário (220 kW) para cortar através de uma placa de 12mm de espessura de aço macio na velocidade de 2.5 m/min.
- O processo também produz calor que pode inutilizar a peça e produzir gases tóxicos.

## 12. USINAGEM A FEIXE DE ÍONS

A usinagem a feixe de íons (Íon Beam Machining – IBM) é realizada em uma câmara de vácuo usando íons carregados atirados de uma fonte de íons em direção a peça por meio de uma tensão de aceleração. Entretanto, o mecanismo de remoção de matéria na IBM difere da EBM. Essa diferença está intimamente relacionada à ejeção dos átomos, por meio de outros átomos ionizados (íons) que bombardeiam o material da peça.

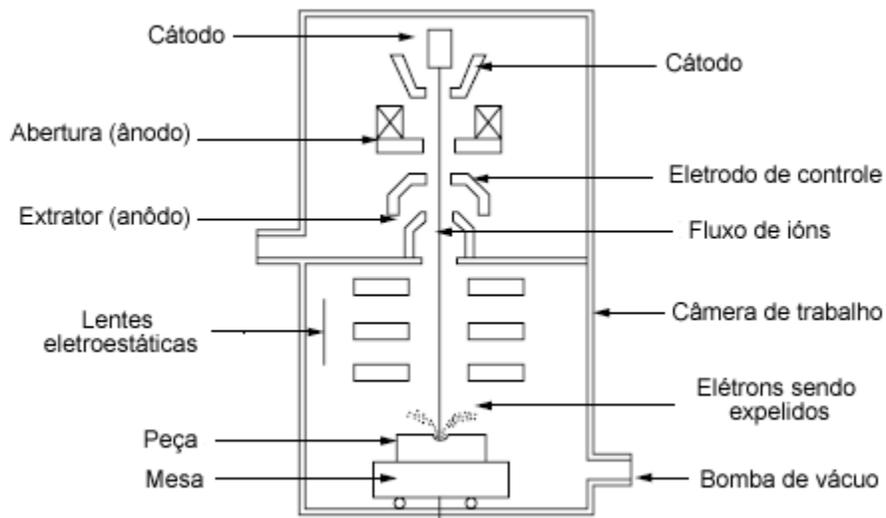


Figura 31 – Sistema de usinagem a feixe de íons

### Sistema de usinagem

O sistema de usinagem é composto por uma fonte de íons que produz um feixe de íons suficientemente intenso, com uma propagação aceitável de sua energia de forma a remover os átomos da superfície da peça pelo choque de íons. O filamento de tungstênio aquecido atua como cátodo, do qual os elétrons são acelerados por meio de uma alta tensão (1 kV) em direção ao ânodo. Durante a passagem desses elétrons do cátodo para o ânodo, ocorre uma interação com os átomos de argônio presentes na fonte do plasma, o que produz íons de argônio.

Um campo magnético é produzido entre o cátodo e o ânodo, o que provoca uma espiral de elétrons. O gás argônio presente aumenta o comprimento do trajeto dos

elétrons, o que por sua vez também, aumenta o processo de ionização do próprio argônio. Os íons produzidos são então extraídos do plasma para a peça, que é montada em uma mesa refrigerada por água com inclinação de 0° a 80°. As variáveis do processo, tais como tensão de aceleração, fluxo e ângulo de incidência são controláveis independentemente.

#### Capabilidade do processo

É possível alcançar dimensões pequenas de 10 a 100 nm usando IBM. A inclinação das paredes laterais da superfície usinada e seu acabamento superficial são determinadas pelo ângulo de incidência do feixe de íons. Níveis de acurácia de  $\pm 1\%$  e de repetibilidade de  $\pm 1\%$  podem ser alcançados. A textura da superfície produz uma forma de cone e cume na ordem de 1  $\mu\text{m}$  de tamanho. Entretanto, acabamentos superficiais com menos de 1  $\mu\text{m}$  podem ser obtidos.

### **13. PROCESSOS DE ADIÇÃO DE MATERIAL**

A prototipagem rápida é um grupo de tecnologias de manufatura moderna que são usados para produzir protótipos tridimensionais a partir de representações CAD. Tais métodos são similares aqueles nos quais são adicionadas camadas de material e cola para se formar objetos. Tais técnicas são também referenciadas como fabricação de sólidos de forma livre (solid free-form fabrication – SFF). A prototipagem rápida utiliza fenômenos físicos e químicos para progressivamente adicionar material, similarmente a forma como alguns processos não convencionais de remoção de material agem. A maioria dos processos de prototipagem rápida estão ainda em processo de desenvolvimento. Os objetos construídos podem variar de tamanhos microscópicos a edifícios inteiros, e materiais que incluem de papel e plástico a metal e cerâmicas. Aplicações incluem brinquedos, componentes aeroespaciais e médicos. Um dos fatores de sucesso da prototipagem rápida esta relacionada a habilidade de produzir redes complexas e peças parecidas de materiais que são difíceis de usinar por métodos convencionais. As principais vantagens da prototipagem rápida incluem:

- Construção de formatos geométricos tridimensionais complexos
- É automatizada baseado em modelos CAD
- Usa uma máquina de fabricação genérica, que não requer ferramental específico para peças diferentes
- Necessita de pouca ou nenhuma intervenção humana
- Produz protótipos acurados em pouco tempo com custo mínimo

As técnicas de prototipagem rápida são classificadas de acordo com o material usado.

- Técnicas baseadas em líquido
- Técnicas baseadas em pó
- Técnicas baseadas em sólido

Alguns desses métodos são baseados na solidificação de um polímero líquido pelo impacto de luz ou laser; na polimerização de pó de forma a criar um protótipo. Outros processos são baseados em derretimento, deposição, e resolidificação de materiais de plástico ou resina.

### Sinterização seletiva a laser

A sinterização seletiva a laser (Selective laser sintering – SLS) é um método de fabricação de forma livre baseado na sinterização de pós metálicos e não metálicos seletivamente em um objeto individual. Como mostra a figura, uma fina camada de pó fundível é depositada e aquecida de forma a alcançar valores menores mas próximos de seu ponto de fusão através de painéis de aquecimento por infravermelho localizados nas laterais da câmara. Então um feixe laser orientado por um modelo CAD tridimensional da peça a ser produzida, sinteriza e funde o padrão desejado da primeira camada do objeto no pó depositado. Em seguida, essa primeira camada descende, o rolo deposita outra camada de pó e o processo se repete. A SLS se baseia na força de apoio do pó ao redor do objeto fusionado. Conseqüentemente, não são necessárias colunas de apoio para nenhum componente. Uma grande variedade de materiais pode ser usada, incluindo polímeros, epóxi, ceras, metais e cerâmicas. Assim que o objeto é completamente formado o pistão o eleva. O pó excedente é simplesmente removido e um acabamento final manual é realizado. Apesar do acabamento superficial e acurácia não serem tão bons como os obtidos por outros métodos, como a estereolitografia, as propriedades do material podem se manter bem próximas as intrínsecas. Tal método tem sido usado na fabricação de objetos e ferramentas de metal e cerâmica.

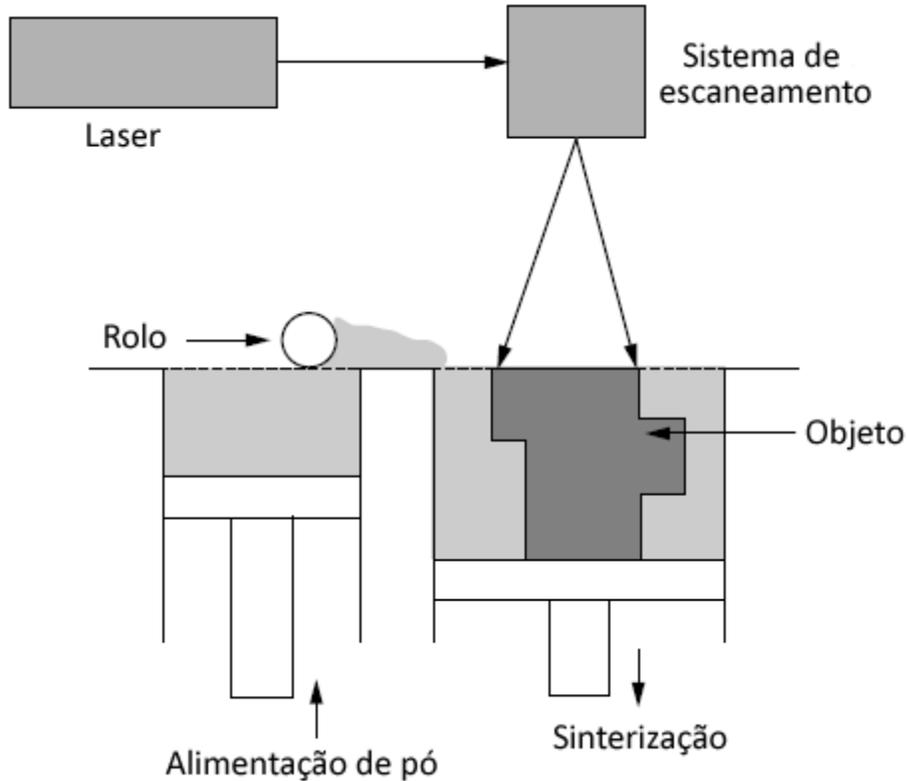


Figura 31 – Processo de sinterização seletiva a laser

### Vantagens e limitações

As principais vantagens da sinterização seletiva a laser incluem:

- Produz os componentes mais resistentes se comparado com outras técnicas de prototipagem rápida
- Uma grande variedade de materiais pode ser usada, incluindo metal, plástico, cerâmica, cera, nylon, elastômeros e policarbonatos.
- Um tempo de produção relativamente curto (aproximadamente 1 in/h) é possível
- Nenhum processo de pós sinterização é necessário.
- Nenhuma sustentação adicional é necessária durante o processo de fabricação.
- O pó restante pode ser reusado.

As principais limitações do processo incluem:

- Produz-se um acabamento superficial áspero, devido ao efeito escada

- O tempo necessário para se aquecer o pó e se resfriar o modelo depois que esse está completo é de aproximadamente 8 a 10 horas.
- Gases tóxicos são produzidos, especialmente quando materiais plásticos são fundidos.
- Os componentes produzidos são menos detalhados do que aqueles produzidos pela estereolitografia devido a elevada temperatura de processamento e o elevado encolhimento pós-processo.

### Impressão tridimensional

A impressão tridimensional combina características da sinterização seletiva a laser com outra técnica chamada manufatura de partículas balísticas. O pó do material é depositado em camadas sucessivas, assim como na SLS. O processo se inicia pelo depósito de uma camada de pó do material na parte superior da câmara de fabricação. Para tal, uma quantidade de pó medida é primeiro despejada de uma câmara fornecedora por um pistão movendo-se para cima incrementalmente. O rolo então distribui e comprime o pó na parte superior da câmara de fabricação. Uma cabeça jateadora multicanal subsequentemente deposita um líquido adesivo em um padrão bidimensional na camada de pó que se torna ligado nas áreas onde o adesivo é depositado para formar uma camada do objeto.

Uma vez que é camada é terminada, o pistão de fabricação se movimenta para baixo a espessura de uma camada, e o processo se repete até que o objeto inteiro seja formado dentro do molde de pó. Após a conclusão, o objeto é elevado e o pó extra é removido. Nenhum suporte externo é necessário durante a fabricação, uma vez que o molde de pó dá suporte as saliências. Após a construção da peça inteira, um tratamento térmico é aplicado, o qual polimeriza a 120°C por 2 horas. Em casos de peças cerâmicas, um aquecimento final de 1000 a 1500 oC ainda é necessário de forma a dar a peça força mecânica e refratária total.

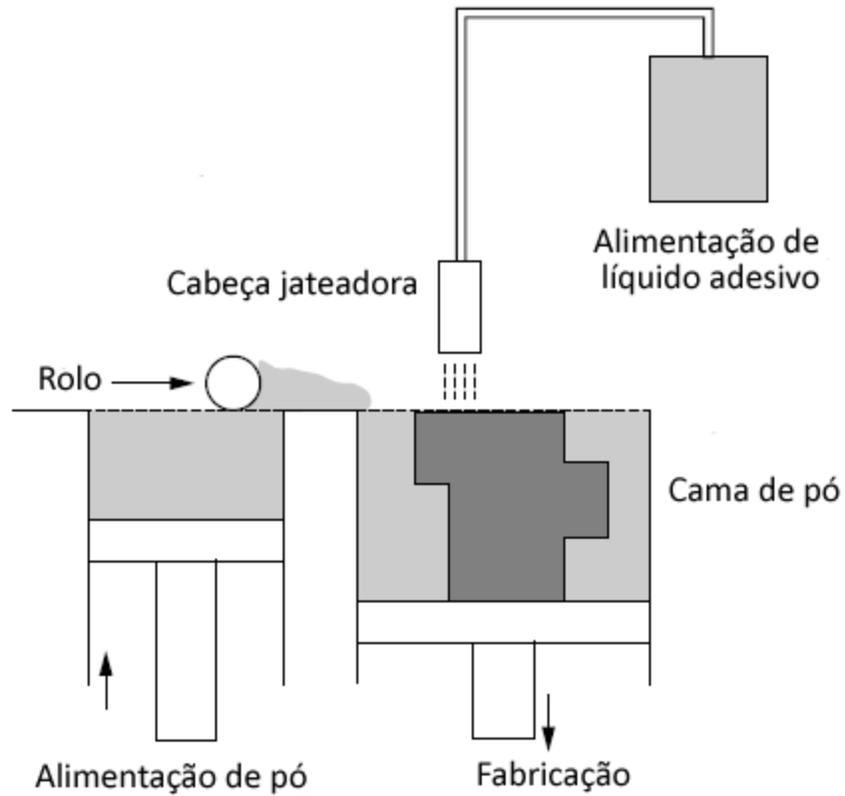


Figura 32 – Processo de impressão tridimensional

A impressão tridimensional oferece vantagens com relação à fabricação rápida e o baixo custo dos materiais. De fato, é provavelmente o método de prototipagem rápida mais rápido. Recentemente impressões coloridas também se tornaram possíveis. Entretanto, há limitações quanto à resolução, acabamento superficial fragilidade da peça e disponibilidade de materiais.

## 14. ALGUNS PROCESSOS ADICIONAIS

### Shot Peening

Jateamento (shot peening) é um processo de trabalho a frio que utiliza geralmente esferas de aço, vidro ou cerâmica, propelidas por jatos de ar contra a superfície das peças. O choque das esferas produz uma camada encruada e tensões residuais compressivas que se estendem até abaixo da superfície do material base, melhorando a resistência à fadiga da peça. O shot peening normalmente é aplicado a seco. Entretanto, é aceitável a aplicação de esferas de vidro via jato úmido.

Os diferentes tipos de shot peening são usados para conseguir diferentes intensidades de peening que são medidas pela deformação em milésimos de polegadas pelo padrão Almen, que é constituído de tiras de aço previamente preparadas, de diferentes espessuras, que devem ser submetidas ao peening, simulando os parâmetros de aplicação a serem utilizados na peça, de forma a adquirir a intensidade requerida.

O perfil típico de tensão residual obtido após tratamento por shot peening e suas variações com a profundidade estão mostrados na figura 33. Quatro importantes parâmetros são apresentados.

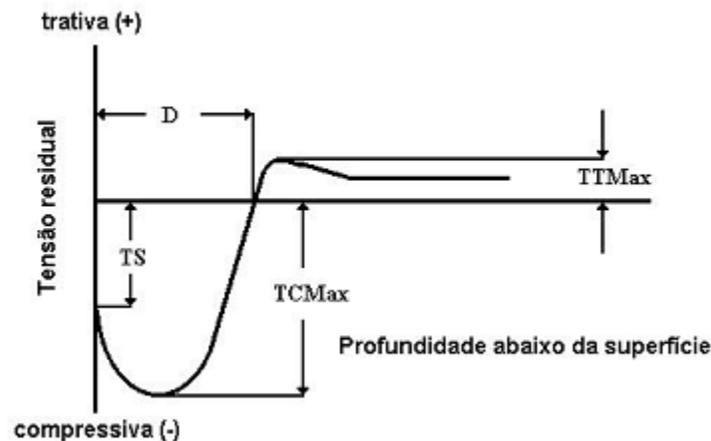


Figura 33 – Tensão residual e rofundidade

- TS- Tensão superficial que é a tensão medida na superfície;

- TCMax – Tensão compressiva máxima, que é o máximo valor medido das tensões compressivas induzidas e que normalmente são encontradas logo abaixo da superfície;
- TTMax – Tensão trativa máxima que é o máximo valor medido da tensão trativa induzida, esta tensão trativa no interior compensa a tensão compressiva na camada superficial, de forma que a peça permaneça em equilíbrio.
- D – Profundidade, é o ponto no qual a tensão compressiva cruza o eixo de tensão neutra e se torna trativa.

Peças que normalmente recebem tal processo incluem:

- Molas de válvulas
- Molas de suspensão
- Molas de alívio
- Barras de torção
- Engrenagens
- Hastes de conexão

O processo de Shot peening tem o potencial de melhorar o tempo de vida de aproximadamente qualquer peça de material metálico submetida a tensões repetidas.

Para trabalhar apropriadamente, entanto o processo requer um controle mais exato do que nos processos normais de limpeza a jato, principalmente com relação a velocidade media, taxa de fluxo do abrasivo, superfície de exposição da peça, e tamanho e forma do abrasivo. Devido à necessidade desse controle restrito, o equipamento utilizado no processo é normalmente automatizado, o que garante consistência e repetibilidade.



Figura 34 – Processo de Shot peening

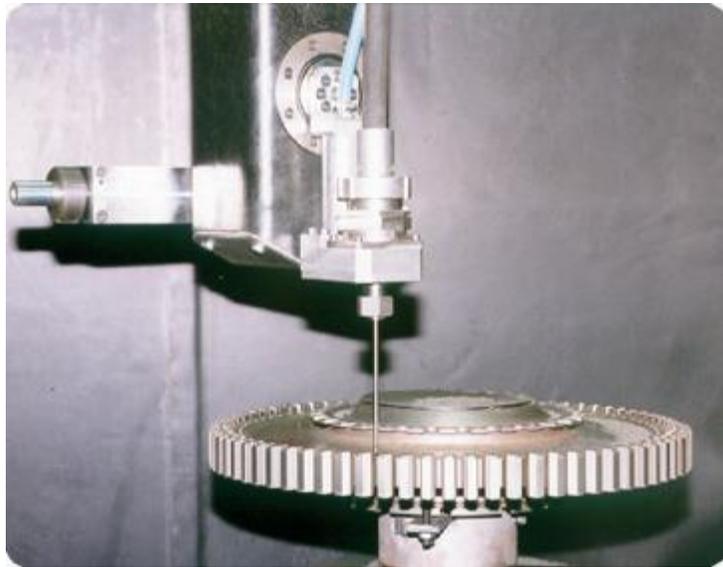


Figura 35 – Sistema de tratamento a Shot peening

## Soldagem a Laser

A soldagem a laser (Laser Beam Welding, LBW) é um processo de união baseado na fusão localizada da junta através de seu bombardeamento por um feixe de luz concentrada coerente e monocromática de alta intensidade. Este feixe de alta intensidade é suficiente para fundir e vaporizar parte do material da junta no ponto de entrada do feixe no material, causando um furo (keyhole) que penetra profundamente no metal de base. O processo de soldagem a laser apresenta praticamente os mesmo componentes do processo de usinagem a laser.

Para a produção do laser podem ser usadas fontes contínuas a dióxido de carbono, capazes de produzir laser de infravermelho e densidades de energia em torno de  $1 \times 10^{10} \text{W/m}^2$ , ou fontes pulsadas de YAG (Yttrium aluminum garnet) no estado sólido. As primeiras são usadas para a soldagem laser de elevada penetração, enquanto que os lasers de estado sólido são mais usados para a soldagem de ponto e de costura em juntas de pequena espessura, soldagem em microeletrônica e em outras aplicações que exijam um controle preciso da quantidade de energia fornecida à peça.

A soldagem a laser é um processo de alta velocidade, ideal para aplicações automatizadas, mas exigindo um perfeito ajuste das peças. O custo do equipamento de soldagem tende a ser elevado, em torno de US\$ 500.000, fazendo com que o processo seja tipicamente usado apenas em aplicações com um grande volume de soldas ou em aplicações críticas que necessitem de características especiais do cordão ou uma grande reprodutibilidade. O processo é mais utilizado na soldagem de peças de menor espessura com uma elevada velocidade de deslocamento. Por exemplo, um laser de CO<sub>2</sub> de 5kW de potência pode soldar chapas de 2,5mm de aço carbono ou inoxidável com velocidades acima de 65 mm/s. A soldagem LBW tem substituído, em alguns casos, a soldagem de resistência por pontos na fabricação da carroceria de veículos. A eficiência do equipamento LBW é baixa, de 8 a 15%, necessitando de grandes unidades de refrigeração para aplicações de alta potência.

Embora o equipamento seja muito sofisticado, ele é projetado para ser usado por operadores, não necessitando de soldadores altamente treinados. Vários equipamentos

LBW podem, com pequenas modificações, ser usados para operações de corte ou de tratamento térmico superficial.

**15. BIBLIOGRAFIA**

COELHO, R. T. (2008). Notas de aula (Processos não convencionais de usinagem).

EL-HOFY, H. A. G. (2005). *Advanced Machining Processes*. New York: McGraw-Hill Companies.

PEDROSA, P. D. S. (2007) *Variação do estado de tensões residuais introduzidas por Shot Peening em aço duplex durante ciclos de fadiga* (Tese de doutorado) UFRJ

PORTO, A. J. V. (1990). *Processos não convencionais de usinagem* (Apostila). São Carlos.

SILVA, E. J. (2008). Notas de aula (Processos não convencionais de usinagem).