

# Métodos avançados de usinagem: feixe de elétrons e ultra-som

O homem primitivo só contava com as próprias mãos para cortar os materiais. Depois, descobriu que podia fazer ferramentas de ossos, gravetos ou pedras. Com essas ferramentas rústicas, produzia suas roupas, utensílios de cozinha, abrigos e armas.

Com a descoberta dos metais, o bronze e o ferro passaram a ser usados na confecção de ferramentas manuais e, por um período que durou aproximadamente um milhão de anos, os instrumentos feitos com esses materiais possibilitaram ao homem exercer um gradativo domínio sobre os fenômenos da natureza.

Até o século XVII, as ferramentas continuaram a ser operadas à mão, ou por dispositivos mecânicos rudimentares. Tais métodos tornaram possível a construção de navios, edificações, móveis e utensílios diversos para uso cotidiano.

A compreensão de que a água, o vapor e, mais tarde, a eletricidade podiam ser usados como fontes de energia, possibilitou a produção de máquinas-ferramenta operadas por essas forças, levando ao desenvolvimento da indústria das máquinas-ferramenta nos séculos XVIII e XIX.

No século XX, como você já sabe, o desenvolvimento tecnológico provocou uma revolução nos meios e modos de produção estabelecidos, possibilitando o acesso a novas fontes de energia que, por sua vez, tornaram viáveis novas aplicações industriais.

Nesta virada de século, os desafios impostos pelas novas necessidades de produção continuam a ser vencidos a passos largos. Processos tecnológicos alternativos vêm sendo desenvolvidos, na busca permanente de maior qualidade, maior produtividade e menor custo. Alguns desses processos você já viu em aulas anteriores deste módulo, como o corte a laser, o corte plasma e o corte por jato de água.

Esta aula e a próxima serão dedicadas ao estudo de outros quatro métodos avançados de usinagem, de uso ainda pouco difundido entre nós. Nesta aula serão abordadas a usinagem por feixe de elétrons e a usinagem por ultra-som. Na aula seguinte, serão apresentados os métodos de usinagem química e usinagem eletroquímica.

Ao terminar o estudo dessas aulas, você terá uma visão geral dos princípios de funcionamento desses novos métodos e dos procedimentos operacionais dos equipamentos desenvolvidos para utilizar sua potencialidade.

## Métodos tradicionais X métodos avançados

## Nossa aula

Nos processos tradicionais, o arranque de material se dá por cisalhamento ou abrasão. Esses métodos apresentam limitações para usinagem de materiais duros e de peças com formas complexas.

Por outro lado, os novos processos de usinagem baseiam-se muito mais em princípios eletrofísicos do que nas propriedades mecânicas dos materiais.

Segundo esses novos métodos, a usinabilidade dos materiais depende, predominantemente, de características como:

- ponto de fusão;
- condutibilidade térmica;
- resistividade elétrica;
- peso atômico.

A miniaturização de peças e componentes e a exatidão requerida para atender às necessidades atuais são outros fatores que funcionam como obstáculo aos métodos convencionais de usinagem, mas não constituem problema para os métodos avançados, que possibilitam a remoção de material molécula por molécula e até mesmo átomo a átomo.

Alguns desses novos métodos baseiam-se em teorias já conhecidas há algum tempo. Porém, sua utilização só se tornou possível graças ao desenvolvimento de suportes tecnológicos adequados. É o caso, por exemplo, da usinagem por feixe de elétrons, que só se tornou viável a partir do momento em que se conseguiu maior domínio sobre a produção de câmaras de vácuo, como você verá a seguir.

## Usinagem por feixe de elétrons

Este método baseia-se no princípio de que o bombardeamento de elétrons gera energia, ou seja, quando os elétrons são acelerados e concentrados em um feixe, uma intensa energia cinética é produzida.

Quando o feixe assim concentrado choca-se contra uma superfície bem definida, o impacto faz com que a energia cinética transforme-se em energia térmica, alcançando altíssimas temperaturas, capazes de fundir praticamente todos os tipos de materiais conhecidos.

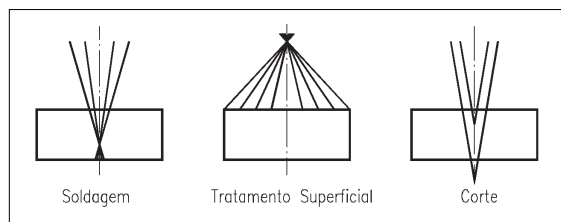
O mecanismo pelo qual os feixes concentrados penetram na peça ainda não é completamente conhecido. Entretanto, sabe-se que a energia altamente concentrada do feixe de elétrons vaporiza instantaneamente o material no ponto de impacto. O material derretido ao redor do ponto de impacto é rapidamente ejetado pela pressão do vapor sendo, dessa forma, removido do material.

Este processo foi inicialmente utilizado por volta dos anos 50, na área de soldagem, quando as primeiras construções nucleares passaram a exigir a soldagem isenta de oxidação, de materiais reativos como o titânio e o zircônio.

O desenvolvimento das câmaras de vácuo trouxe a solução para o problema anterior e ainda permitiu um maior aproveitamento do potencial de energia dos elétrons acelerados. Isso porque, numa câmara de vácuo é possível concentrar a energia que seria dispersada pelo atrito dos elétrons com as moléculas de ar, de modo que se produza uma grande convergência do feixe, com redução das zonas termicamente afetadas. O vácuo, além de evitar a dispersão do feixe, possibilita obtenção de elevadas densidades de energia e maior capacidade de penetração no material a ser usinado.

A convergência do feixe pode ser ajustada por meio de lentes magnéticas. Dependendo do modo como o feixe é aplicado sobre a peça, pode ser usado para outras finalidades, além da soldagem, como o tratamento térmico, o corte de materiais e a microusinagem.

A figura a seguir mostra como a localização do ponto de foco possibilita a obtenção de diferentes aplicações do feixe.



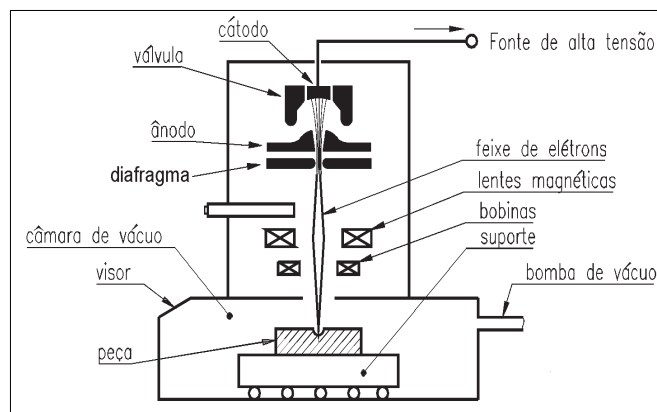
As aplicações que mais nos interessam, nesta aula, são o corte, a furação e a microusinagem.

### Equipamento básico para produção do feixe de elétrons

O pioneiro na utilização de feixes de elétrons foi Steigerwald, que projetou uma máquina protótipo em 1947. As modernas máquinas de feixe de elétrons funcionam pelos mesmos princípios, até hoje.

Analise a figura a seguir. Ela mostra uma representação esquemática de uma máquina industrial para produção de feixes de elétrons. Os componentes básicos, presentes em todas as máquinas, são: canhão emissor de elétrons, lentes de focalização e sistema de ajuste de foco. Estes componentes estão alojados numa **câmara de vácuo**, que atinge até  $10^{-4}$  Torr.

**Torr:**  
unidade de medida de pressão.  
Equivale a 1/760 da atmosfera normal.  
O nome é uma homenagem ao italiano Torricelli, que desenvolveu os estudos pioneiros nessa área.



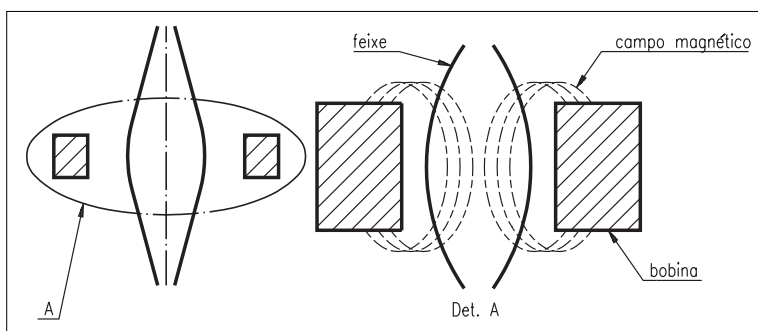
O **canhão emissor de elétrons**, que sempre trabalha em alto vácuo ( $10^{-4}$  Torr), é o dispositivo que gera os elétrons. É composto, basicamente, de um mecanismo de emissão e aceleração dos elétrons, constituído pelo **cátodo** e pelo **ânodo**.

O cátodo, que é montado dentro de uma válvula conhecida por “Wehnelt”, é feito de um filamento de tungstênio, e quando aquecido até  $2.500^{\circ}\text{C}$  ou  $3.000^{\circ}\text{C}$ , liberta elétrons.

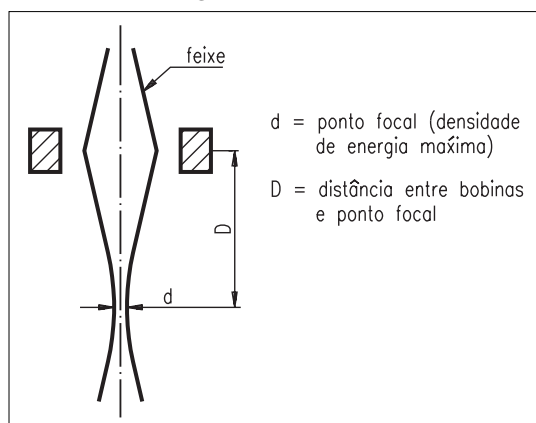
A alimentação do canhão é feita por um transformador especial de alta-tensão, que produz uma grande diferença de potencial (ddp) entre o cátodo e o ânodo, da ordem de 150kV, suficiente para acelerar os elétrons em direção à peça a ser usinada. Os elétrons assim acelerados chegam a atingir de 0,2 a 0,7 da velocidade da luz.

Os elétrons acelerados são direcionados para o ânodo e o atravessam saindo por um orifício na extremidade. Na saída do ânodo, os elétrons acelerados passam pelo diafragma que serve para fazer convergir o feixe. Mesmo no vácuo, o feixe tende a dispersar-se. Para evitar essa dispersão, ele é conduzido através de um conjunto de lentes magnéticas.

O **sistema de controle para ajuste de foco**, que permite manter a direção do feixe para a peça usinada, é constituído por um conjunto de bobinas de **deflexão**, por dentro das quais passa o feixe de elétrons. Por essas bobinas passa uma corrente elétrica, que gera um campo magnético. Este campo magnético interfere no feixe, para permitir o ajuste de foco, nas posições **x** e **y**.



A uma distância determinada das bobinas, obtém-se o menor diâmetro de feixe (**ponto focal**). Nesse ponto tem-se a **densidade de energia máxima**, pois toda a energia do feixe está concentrada na menor área possível. Passando o ponto focal, o feixe tende a divergir novamente.



**Wehnelt:**  
palavra alemã que quer dizer válvula. Cátodo revestido de óxido de metais alcalinos (cálcio, estrôncio e bário), usado para melhorar a emissão de elétrons a temperaturas moderadas.

**Deflexão:**  
mudança de direção do movimento de um raio para um lado (esquerdo ou direito).

## Remoção de material por feixe de elétrons

As taxas de remoção de material na usinagem por feixe de elétrons são usualmente avaliadas de acordo com o número de pulsos requeridos para evaporar uma certa quantidade de material.

O uso de contadores de elétrons para registrar o número de pulsos permite pronto ajuste do tempo de usinagem, para produzir a profundidade de corte requerida.

Por enquanto, algumas aplicações da usinagem por feixe de elétrons ainda se encontram em fase experimental, não representando uma alternativa competitiva do ponto de vista técnico ou econômico, quando comparadas a outros processos. Mesmo assim, a indústria aeroespacial, a aeronáutica e a eletrônica são exemplos de áreas que já vêm utilizando este processo com resultados positivos na produção de múltiplos microfuros, litografia em semicondutores e microusinagem de peças complexas.



Mas certamente as dificuldades atuais serão superadas em decorrência do permanente esforço de pesquisa e desenvolvimento voltado para esta área. Portanto, fique atento: não perca a oportunidade de conhecer melhor este assunto e se aprofundar nele, acompanhando os eventos que divulgam tecnologias de ponta. Enquanto isso, aproveite para conhecer os princípios básicos de outro processo avançado de usinagem.

**Hertz (Hz):** unidade de medida de frequência. Um Hz corresponde a um ciclo por segundo. O **kHz** (quilohertz) é um múltiplo do Hz e equivale a 1000 ciclos por segundo.

## Usinagem por ultra-som

A usinagem por ultra-som é um processo que permite executar penetrações de formas variadas em materiais duros, frágeis e quebradiços como o vidro, a cerâmica e o diamante, que dificilmente seriam obtidas pelos processos convencionais.

Na usinagem por ultra-som, uma ferramenta é posta para vibrar sobre uma peça mergulhada em um meio líquido com pó abrasivo em suspensão, numa frequência que pode variar de 20 kHz a 100 kHz.

### Fique por dentro

As frequências de sons audíveis pelo ouvido humano estão na faixa de 20Hz a 20kHz.

Os sons com frequência abaixo de 20 Hz são chamados **infra-sons**.

Os sons com frequência acima de 20kHz são chamados **ultra-sons**.

O “martelamento” produzido pelas vibrações é capaz de erodir o material, formando uma cavidade com a forma negativa da ferramenta. Não há contato entre a ferramenta e a peça. A usinagem é feita pelos grãos finos e duros do material abrasivo, que atacam a superfície da peça.

A ferramenta não precisa ser muito dura, podendo ser feita de material fácil de usinar, uma vez que não entra em contato com a peça.

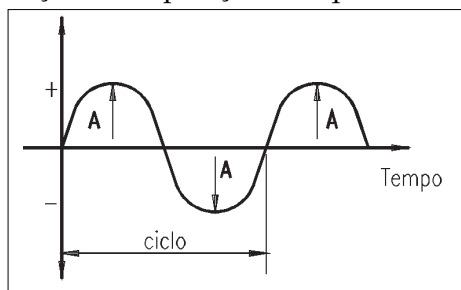
Uma variação desse processo de usinagem é obtida com o uso de uma ferramenta rotativa, que aumenta a capacidade de remoção do material erodido. Quando conjugado com uma mesa do tipo CNC, o equipamento com ferramenta rotativa possibilita a obtenção de figuras complexas, por contorneamento.

O processo de usinagem por ultra-som aproveita a **energia de vibração mecânica**, comunicada aos grãos de abrasivo, que vibram na mesma direção do **sonotrodo**.

O **sonotrodo** é constituído por uma barra metálica, na qual se ativam as vibrações ultra-sonoras, no sentido do seu eixo. Na ponta do sonotrodo é fixada a ferramenta, com a forma inversa da que se deseja dar à peça a ser usinada.

As vibrações mecânicas só se propagam através de um meio material, nunca no vazio. Essas vibrações transmitem-se por excitação das moléculas, que oscilam ao redor de sua posição de repouso.

Um ponto em oscilação, partindo de uma posição extrema e voltando a esta posição, completa um **ciclo** e tem uma **amplitude** ( $A$ ) determinada. O número de ciclos efetuados por unidade de tempo, ou **frequência** das oscilações, é uma característica essencial das vibrações. A amplitude é dada pelo máximo afastamento do ponto em relação a sua posição de equilíbrio.



O conjunto de vibrações locais e sua propagação formam uma onda de vibrações. As ondas se propagam através dos materiais a uma velocidade constante. Esta velocidade depende da natureza do material e do tipo de onda considerado. Para as aplicações industriais, as **ondas longitudinais** são as mais utilizadas.

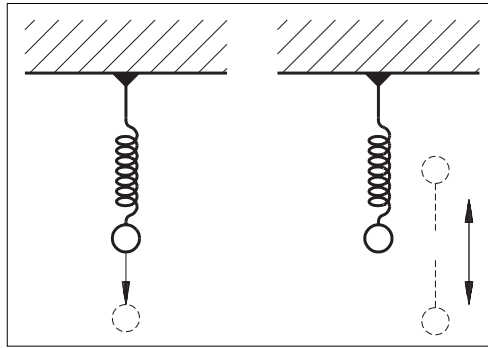
#### Dica

Para saber mais sobre ondas mecânicas, consulte a Aula **21** do módulo **Ensaio de Materiais**, que trata de ensaio por ultra-som.

### Geração dos ultra-sons

A maior parte dos corpos materiais possui certas propriedades elásticas. Isto quer dizer que, se uma parte do corpo é forçada além de sua posição natural, a reação do corpo tende a trazer esta parte de volta para o seu lugar. Produz-se, assim, um movimento de oscilação comparável ao de um pêndulo de mola.

**Ondas longitudinais:** as partículas vibram na mesma direção da propagação da onda, ou seja, oscilam em torno de sua posição de repouso, em uma direção paralela à direção de propagação.



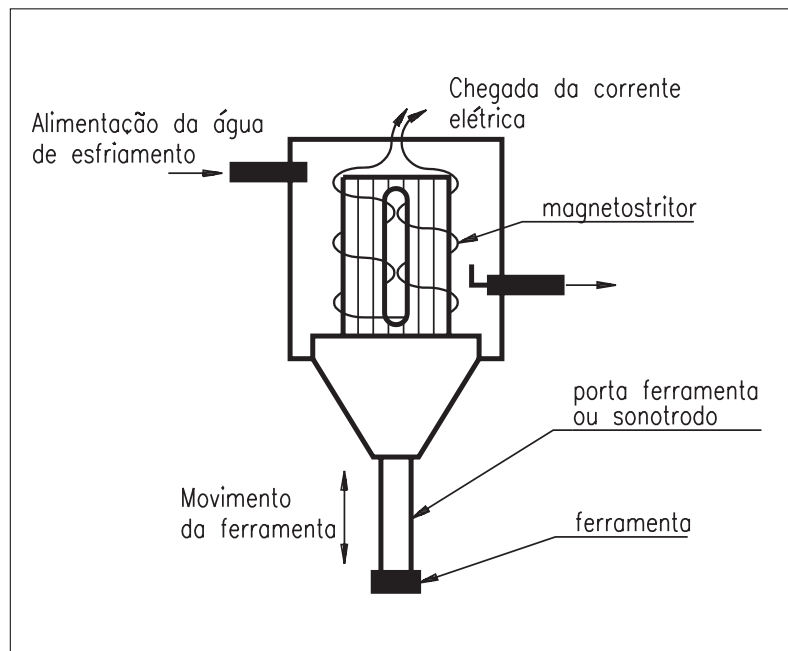
Cada corpo tem uma frequência própria de vibração. A produção dos ultrasons utiliza essa capacidade de vibração que os corpos apresentam.

**Efeito Joule (Mag):** diminuição das dimensões de um sólido quando submetido a um campo magnético. O efeito é muito pequeno e tem algumas aplicações práticas importantes como no sonar, em fonógrafos etc.

Uma das formas possíveis de produzir ultra-som vale-se do **efeito Joule magnético**, também conhecido como **magnetostricção**.

Na máquina de ultra-som para usinagem, a parte mais importante da cabeça ultra-sonora, que funciona segundo o princípio da magnetostricção, é constituída por uma haste em liga de níquel, que é envolvida por uma bobina, percorrida por uma corrente de alta frequência. O campo magnético gerado pela passagem da corrente através da bobina provoca a vibração da haste metálica, no sentido do eixo.

Esta haste encontra-se em um banho de óleo, que é resfriado por uma serpentina em cobre, na qual circula água.



**Ressonância:** é a igualdade entre a frequência de uma fonte e a frequência própria de vibração de um corpo. Nesse caso, a fonte cede, progressivamente, energia ao corpo, que passa a oscilar numa amplitude cada vez maior.

O efeito assim obtido é muito pequeno, mas pode ser aumentado desde que se consiga produzir a vibração em **ressonância** com as vibrações próprias da barra.

### Fique por dentro

Você sabe por que os soldados são proibidos de marchar sobre uma ponte? A resposta tem a ver com o fenômeno da ressonância.

A marcha consiste numa passada ritmada sobre uma estrutura, no caso a ponte, que tem uma frequência própria de oscilação. Se houver uma coincidência entre a frequência de vibração das passadas e a frequência própria de vibração da ponte, ou seja, se as vibrações entrarem em ressonância, a amplitude da vibração pode aumentar exageradamente, causando danos à ponte e pondo em risco a integridade dos soldados!

### Características do equipamento

Uma máquina de ultra-som para usinagem é constituída, basicamente, pelos seguintes componentes:

- **um gerador** de corrente de baixa frequência;
- **um conversor eletroacústico** que consiste de um transdutor eletroacústico, isto é, um dispositivo que transforma as oscilações elétricas em ondas ultrasonoras;
- **um amplificador**, feito geralmente de titânio, que tem por função transmitir e aumentar as amplitudes das vibrações do transdutor sobre o qual está fixado;
- **uma ferramenta de usinagem**, facilmente intercambiável, que pode ser oca ou maciça.



O conjunto é montado sobre uma guia de precisão, que se desloca verticalmente, sem jogo nem atrito, e é equilibrado por um sistema de contrapeso.

O equipamento inclui um dispositivo de regulação de pressão sobre a peça a ser usinada, montado na parte exterior da máquina.

Nas máquinas mais antigas, um relógio comparador de leitura direta permitia controlar permanentemente a profundidade de penetração da ferramenta. Atualmente, esse controle é feito por sistemas eletrônicos.



A peça a ser usinada é fixada sobre o tanque de abrasivo que pode ser adaptado a uma mesa de coordenadas, com movimentos comandados por um micrômetro. Este conjunto é centralizado sob a ferramenta.

Como abrasivo pode-se utilizar o carvão de boro, de silício, óxido de alumina ou diamante em pó, com tamanhos de grãos variando entre 0,5 mm e 0,002 mm.

O material abrasivo deve ser, no mínimo, tão duro quanto a peça usinada. Mesmo assim, parte do próprio abrasivo acaba sendo erodida durante a usinagem, de modo que a área de usinagem deve ser continuamente alimentada por um suprimento adicional de grãos. Este procedimento contribui para resfriar a suspensão durante a usinagem e facilita a remoção do material erodido.

### Considerações sobre a usinagem por ultra-som

A usinagem por ultra-som permite cortes limpos, porque as vibrações ultrassônicas produzem a fusão do material e, ao mesmo tempo, soldam as pontas das fibras cortadas.

Embora furos, ranhuras e formas irregulares possam ser usinadas por ultra-som em qualquer material, pesquisadores sugerem que o processo seja aplicado, preferencialmente, em materiais duros e quebradiços, envolvendo áreas de superfícies inferiores a 1000 mm<sup>2</sup>, onde devem ser produzidas cavidades rasas e cortes.

Em outras palavras, a usinagem por ultra-som, assim como outros métodos de usinagem, também tem suas limitações e representa um vasto campo a ser pesquisado e aperfeiçoado.

Depois de tanta novidade, é conveniente dar uma parada, refletir um pouco sobre o que foi aprendido e fazer os exercícios a seguir, para ajudar na compreensão e fixação dos assuntos estudados.

**Pare! Estude!  
Responda!**

Marque com X a resposta correta.

#### Exercício 1

Na usinagem por feixe de elétrons, os elétrons acelerados possuem:

- a) ( ) energia térmica que se converte em energia cinética;
- b) ( ) energia cinética que se converte em energia térmica;
- c) ( ) energia elétrica que se converte em energia térmica;
- d) ( ) energia térmica que se converte em energia elétrica.

#### Exercício 2

O feixe de elétrons é gerado numa câmara de vácuo para evitar:

- a) ( ) a perda de energia dos elétrons no choque com as moléculas de ar;
- b) ( ) a atração dos elétrons para os orbitais livres dos átomos de oxigênio do ar;
- c) ( ) a concentração do feixe de elétrons;
- d) ( ) o resfriamento do filamento de tungstênio gerador de elétrons.

**Exercício 3**

Na usinagem por feixe de elétrons, o ponto focal é o ponto:

- a) ( ) onde o feixe de elétrons atinge o material a ser usinado;
- b) ( ) de maior densidade de energia;
- c) ( ) de maior dispersão de energia;
- d) ( ) onde se encontra o maior número de elétrons.

**Exercício 4**

Na usinagem por ultra-som, o corte do material se dá pela ação:

- a) ( ) da ferramenta fixada no sonotrodo;
- b) ( ) do transdutor eletroacústico;
- c) ( ) do amplificador de ressonância;
- d) ( ) do material abrasivo.

**Exercício 5**

Na usinagem por ultra-som, a ressonância

- a) ( ) produz um ruído desagradável;
- b) ( ) aumenta a frequência das oscilações do gerador;
- c) ( ) aumenta a amplitude da frequência de vibração do gerador de ultra-som;
- d) ( ) diminui a frequência das oscilações do gerador.

