

Relatório Técnico RT-ATCP-02

# Limpeza ultra-sônica: *overview* e estado da arte

**ATCP Engenharia Física**

[www.atcp.com.br](http://www.atcp.com.br) / [ha@atcp.com.br](mailto:ha@atcp.com.br)

São Carlos - Brasil

Autor: Antônio Henrique Alves Pereira (Pereira A.H.A.)

[Revisado e publicado online em cinco de abril de 2010]

## INTRODUÇÃO

A necessidade de sistemas de limpeza para a remoção de contaminantes está presente em diversos seguimentos, desde os industriais passando pelos serviços até o hospitalar, seja para a manutenção de equipamentos e dispositivos, para a preparação da superfície de produtos para reuso ou para processos de limpeza durante os processos de manufatura. Os principais tipos de limpeza podem ser divididos em 08 grupos [1]:

- Alcalina
- Por solventes
- Por emulsões
- Por banho de sais fundidos.
- Ultra-sônica
- Ácida
- Mecânica
- Por decapagem

A escolha do sistema de limpeza é usualmente determinada pelas seguintes variáveis [2]:

- Natureza do contaminante
- Natureza do objeto a ser limpo
- Grau de limpeza necessário
- Geometria dos objetos a serem limpos.
- Quantidade e frequência
- Necessidade de processos automatizados
- Restrições ambientais e normas
- Custos e orçamento disponível

Uma discussão pormenorizada de todos os aspectos dos processos industriais de limpeza pode ser encontrada no ASM Handbook, Volume 5 - Surface Engineering [1].

Dos sistemas citados, a limpeza por banho de sais fundidos e por solventes tem sofrido destacado declínio nas últimas décadas nos países desenvolvidos, devido às crescentes restrições ao uso de substâncias tóxicas e agressivas ao meio ambiente. A principal alternativa ao uso destes processos tem sido a limpeza ácida, alcalina e por emulsões, em conjunto com a limpeza mecânica e ultra-sônica. Além de serem menos agressivas ao meio ambiente e à saúde, estes processos facilitam a implantação de sistemas automatizados [2].

No Brasil, até a década de 90, os sistemas de limpeza mais sofisticados (ultra-sônicos e automatizados) eram importados e utilizados, em sua grande maioria, por empresas multinacionais que os compravam em seus países de origem. Os sistemas mais simples eram desenvolvidos e utilizados por pequenas e médias empresas, sendo muitas vezes similares as primeiras versões analógicas importadas. Com a aceleração da globalização na década de 90 e com as restrições ecológicas, surgiu uma grande demanda entre as pequenas e médias empresas por sistemas de limpeza mais eficientes, que colaborassem com o aumento da competitividade de seus produtos e que fossem ecologicamente corretos, tais como os sistemas ultra-sônicos e automatizados e para aplicações médicas e hospitalares. Esse novo nicho de mercado já vem sendo explorado no Brasil com sucesso por diversas empresas brasileiras e estrangeiras.

## VISÃO GERAL

A tecnologia de limpeza ultra-sônica faz uso da cavitação e da transferência de momento, fenômenos induzidos pela propagação de ondas acústicas de alta intensidade, com frequência acima do limite audível humano ( $\approx 18$  kHz) em meios líquidos [3-4]. É o mais eficiente dos métodos de limpeza não abrasivos e que não utilizam dissolução química do substrato [4]. Associada a outros métodos como a limpeza alcalina, ácida e por emulsões, a limpeza ultra-sônica é capaz de remover os contaminantes mais complexos sem comprometer a integridade ou danificar a superfície que está sendo limpa, sendo particularmente eficiente na limpeza de objetos com cavidades, furos e reentrâncias [2]. Atualmente é extensivamente utilizada na indústria metal-mecânica, automotiva, aeronáutica e óptica, para a remoção de resíduos metálicos e graxos de processos de usinagem, manutenção e manipulação [4,5].

Na Fig. 1 temos um sistema industrial de limpeza ultra-sônica típico. São três tanques em série: O primeiro realiza a limpeza mais grosseira (com ultra-som de 25 kHz), o segundo remove as partículas microscópicas que resistiram à ação do primeiro (com ultra-som de 40 kHz), e o terceiro enxágua, evitando uma eventual secagem de resquícios das soluções dos tanques anteriores (o que comprometeria a eficiência do processo). Neste sistema, as fontes de ultra-som são acopladas ao fundo dos tanques e excitadas por um gerador. A automatização desta configuração não é complexa, bastando um robô com dois graus de liberdade para realizar o deslocamento dos cestos de peças ao longo dos três tanques.

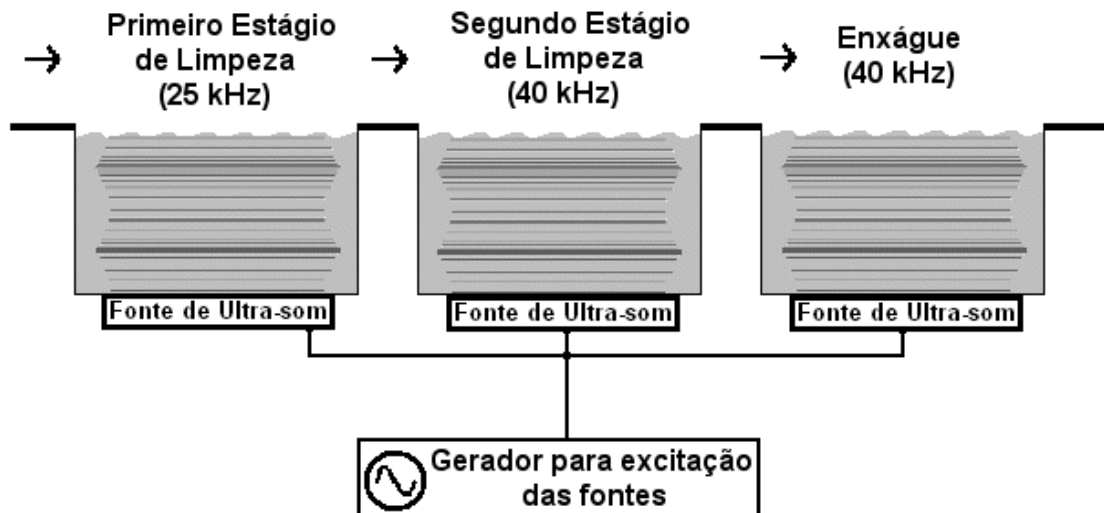


Figura 1 - Sistema industrial de limpeza ultra-sônica típico, com dois tanques para limpeza (de 25 e 40 kHz respectivamente) e um para enxágua.

Na Tabela I temos um comparativo entre os principais processos de limpeza utilizados na indústria metal-mecânica [1]. Sem dúvida, a limpeza ultra-sônica é o estado da arte em eficiência e reprodutibilidade, e não deixa a desejar nos quesitos praticidade e custo de operação, mas é a tecnologia mais cara.

A despeito dos altos custos, a demanda por sistemas ultra-sônicos está em franca expansão, motivada principalmente pelas já mencionadas restrições ambientais às outras tecnologias. Os maiores fabricantes mundiais são as multinacionais Crest, Branson e Amsonic. No Brasil se destacam a [CTA do Brasil](#) e a Unique, além de diversos fabricantes de equipamentos de pequeno porte para laboratórios e clínicas (equipamentos com apenas um tanque de até 5 litros).

Tabela I - Comparação entre os principais processos de limpeza utilizados na indústria metal-mecânica [1]. A escala das notas vai de 1 a 10. Quanto melhor o desempenho relativo, maior a nota.

	Manual	Imersão	Emulsão	Spray	Spray + Imer. Automatizada	Ultra-sônica
<b>Praticidade</b>	2	7	7	5	9	7
<b>Grau de limpeza</b>	4	3	5	7	7	10
<b>Reprodutibilidade</b>	3	6	6	8	9	9
<b>Custo do equipamento</b>	7	8	7	5	4	1
<b>Custo de operação</b>	5	8	8	7	6	6

### ASPECTOS MACROSCÓPICOS DA LIMPEZA

Limpeza, de uma forma geral, é a remoção permanente de um contaminante de um substrato, que pode ser a superfície de um objeto qualquer. **Para a realização da limpeza, é preciso realizar trabalho para afastar os contaminantes, rompendo ligações químicas e vencendo a força de atração elétrica e de Van der Waals, e garantir que este afastamento seja permanente, evitando que a força atrativa**

**elétrica re-deposite os contaminantes** [6]. Portanto, a limpeza de um substrato não é uma tarefa simples, principalmente se: O grau de limpeza requerido for elevado, os contaminantes forem quimicamente inertes, o objeto a ser limpo possuir reentrâncias e cavidades ou não poder sofrer abrasão química ou mecânica.

Nos sistemas de limpeza por ultra-som, quem realiza o trabalho de remover os contaminantes e de mantê-los afastados do substrato (normalmente com ajuda química) são dois fenômenos da propagação de sons de alta intensidade: A cavitação e a transferência de momento. As manifestações macroscópicas destes fenômenos no processo de limpeza são as seguintes [2,5,7]:

- Dispersão e aumento da dissolução de filmes sólidos e líquidos
- Erosão
- Fadiga e ruptura de contaminantes folheados
- Remoção de bolhas de ar de pequenas cavidades e reentrâncias

A cavitação é o efeito principal em sistemas que operam com frequências de até 100 kHz, e a transferência de momento, em sistemas que operam com frequências próximas a 1 MHz (conhecidos como sistemas Megasônicos).

### Dispersão e aumento da dissolução de filmes sólidos e líquidos

Na Fig. 2 temos a condição inicial e evoluída de um substrato submerso em um banho químico estático. Como a ação do banho ocorre somente na interface, via dissolução, à medida que o banho reage com os contaminantes forma-se uma camada saturada, que leva à redução da velocidade de dissolução ou até mesmo à estagnação do processo, tornando indispensável à ação mecânica. Quando o objeto a ser limpo possui uma geometria complexa, com cavidades e reentrâncias, muitas vezes a agitação mecânica gerada por borbulhas de ar, hélices ou agitadores, não é suficiente, tornando obrigatório o uso do ultra-som.

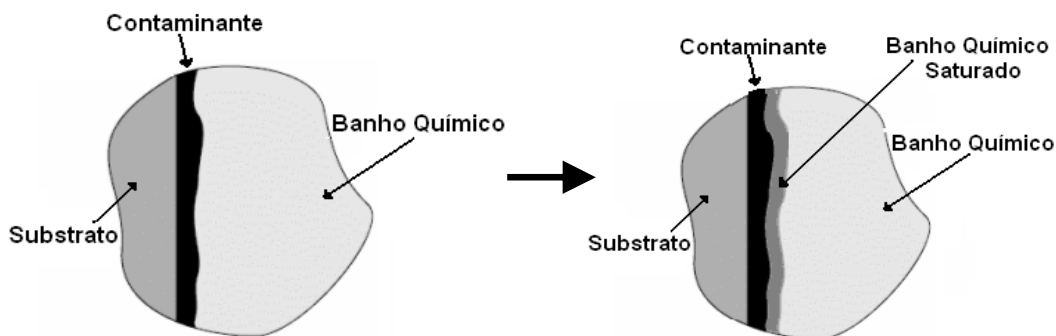


Figura 2 - Condição inicial e evoluída de um sistema de limpeza onde o substrato a ser limpo e o banho químico se encontram estáticos.

Com a presença de um campo ultra-sônico de alta intensidade no meio líquido, ocorre o fenômeno da cavitação, que resumidamente poderíamos descrever como o surgimento de bolhas de vapor que colapsam gerando grandes diferenciais pontuais de pressão e temperatura. Na Fig. 3 temos uma representação pictórica da atuação da cavitação na dispersão da camada de banho saturado e na remoção mecânica do contaminante.

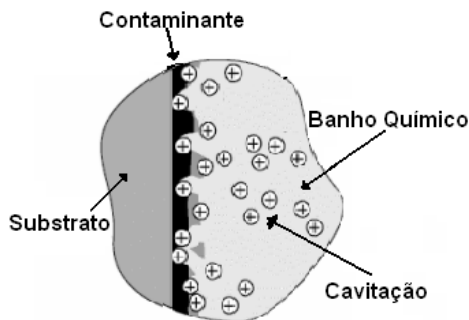


Figura 3 - Inibição da camada saturada e remoção mecânica do contaminante pela cavitação.

### Erosão

Dentre a infinidade de tipos de contaminantes, temos os quimicamente inertes, que são os mais difíceis de serem removidos devido à obrigatoriedade de se utilizar vigorosa ação mecânica. Para estas aplicações os sistemas de limpeza por ultra-som são particularmente convenientes pela erosão gerada pela cavitação, dispensando o contato direto do objeto a ser limpo com escovas ou outros agentes físicos externos. Vide Fig.4.

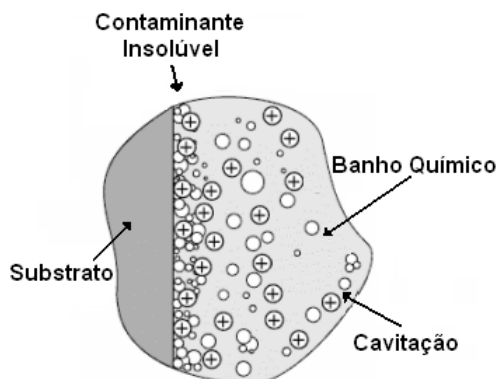


Figura 4 - Substrato com contaminantes inertes ao banho químico sendo removidos pela cavitação.

Além da cavitação, outro fenômeno da propagação de campos ultra-sônicos intensos que vem sendo explorado é a transferência de momento, que se torna importante em frequências superiores a 1 MHz. Nestes sistemas os contaminantes são removidos pela força de cisalhamento gerada por um jato acústico (Vide Fig.5). Vale-se desse fenômeno também os nebulizadores ultra-sônicos.

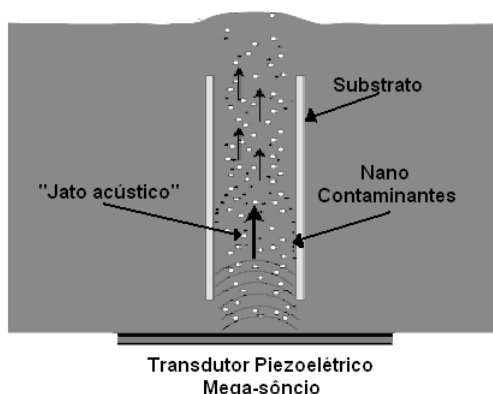


Figura 5 - Remoção dos contaminantes do substrato via erosão gerada por jato acústico.

### Remoção de contaminantes folheados e de bolhas de ar

Ao se propagarem, as ondas ultra-sônicas geram a expansão e contração de bolhas de ar que eventualmente estejam presas em orifícios e cavidades, muitas vezes impedindo a limpeza completa do objeto por dificultarem o acesso do banho químico. Estes ciclos levam contaminantes folheados à fadiga e facilitando a remoção de bolhas presas por tensões superficiais (durante a expansão o volume aumenta, e conseqüentemente, a força de empuxo no sentido de remover a bolha), vide Fig. 6. Os fenômenos da cavitação e da transferência de momento serão detalhados e explanados posteriormente.

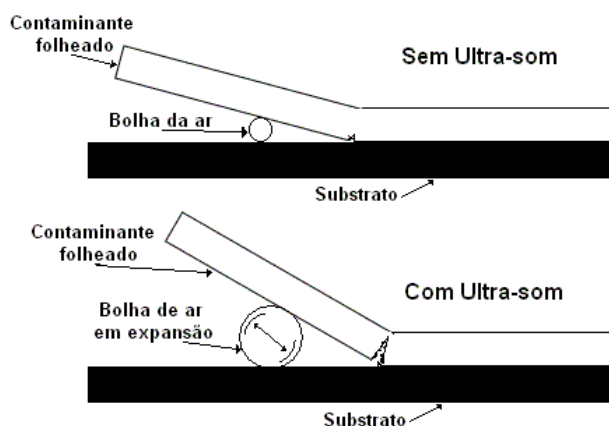


Figura 6 - Descamação de contaminantes folheados com a expansão de bolhas de ar.

### FONTES ACÚSTICAS PARA SISTEMAS DE LIMPEZA ULTRA-SÔNICOS

Existem dois tipos de fontes acústicas que são utilizadas nos sistemas de limpeza ultra-sônicos, as piezoelétricas e a magnetostrictivas. As piezoelétricas se valem da capacidade de alguns materiais de se deformarem quando submetidos a um campo elétrico, principalmente das [cerâmicas de Titanato Zirconato de Chumbo \(PZT\)](#), as magnetostrictivas se valem da capacidade de alguns materiais de se deformarem quando submetidos a um campo magnético, principalmente de ligas especiais de níquel. Estes materiais constituem o elemento ativo dos transdutores ultra-sônicos, que submetidos a campos elétricos/magnéticos variáveis geram campos acústicos que podem facilmente atingir  $2 \text{ kW/cm}^2$ .

Os transdutores magnetostrictivos (vide Fig.7) são mais robustos e não perdem eficiência com o tempo como os piezoelétricos, mas em contrapartida, não conseguem operar em frequências acima de 20 kHz e são muito caros devido aos custos das ligas metálicas e ao tipo de gerador (para alta potência/frequência e baixa impedância).



Figura 7 - Foto de um par de transdutores magnetostrictivos. Podemos observar as bobinas enroladas no núcleo de níquel para aplicar o campo magnético (Blue Wave Ultrasonics).

Os transdutores piezoelétricos, apesar de perderem eficiência com o uso devido despolarização das cerâmicas, possuem diversas vantagens que os tornam mais atrativos, como o baixo custo (relativo) e a facilidade de fabricação e de excitação. Apoiados nestes pontos fortes, estes transdutores se tornaram a tecnologia mais difundida, restando aos magnetostrictivos apenas uma parcela muito pequena do mercado em aplicações de baixa frequência (15 kHz). Existem diversos tipos de transdutores piezoelétricos, o mais difundido deles é o tipo Langevin (TPL), que consiste basicamente em um par de cerâmicas e em um par de massas metálicas unidas por um parafuso, como mostrado na Fig.8.



Figura 8 – Exemplo de transdutor piezoelétrico tipo Langevin (Crest Ultrasonics).

Além do tipo Langevin, temos também os “unimorphs” e os tubulares. Os “unimorphs”, largamente utilizados em equipamentos de baixo custo, consistem em um disco cerâmico acoplado a uma membrana metálica (vide Fig. 9) sendo certamente os transdutores mais simples e baratos. Já os tubulares (vide Fig.10), são utilizados em equipamentos de grande porte e volume e requerem alta tecnologia para fabricação tanto do transdutor em si, quanto do gerador para excitação elétrica.

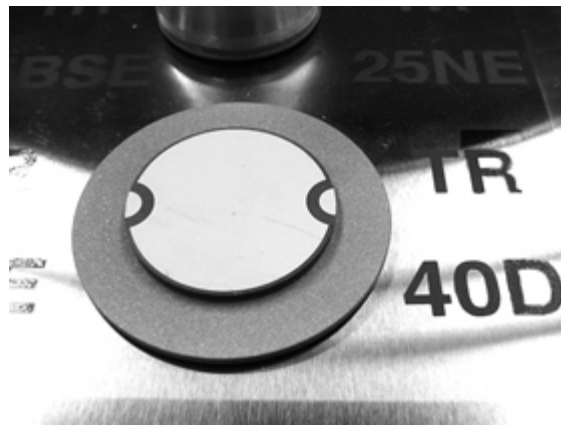


Figura 9 – Exemplo de transdutor piezoelétrico tipo “unimorph”(CTA do Brasil).

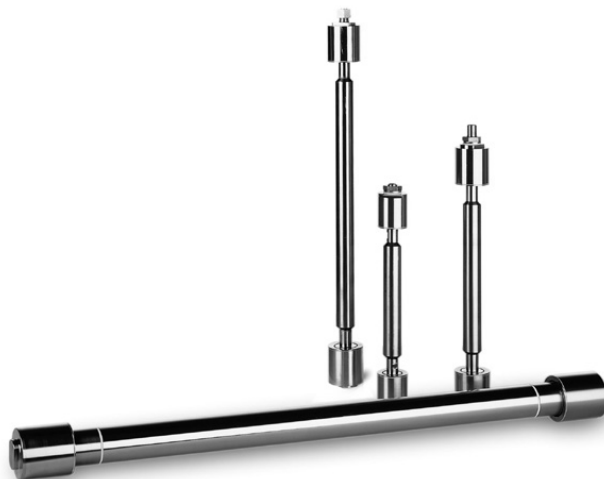


Figura 10 – Exemplos de transdutor piezoelétrico tubular fabricados em titânio (Martin WalterUltraschalltechnik).

### Estado da Arte dos Sistemas de Limpeza Ultra-sônicos

A distribuição de tamanho de partículas que um determinado Sistema de Limpeza Ultra-sônico consegue remover com eficiência de um substrato, peça ou objeto, é uma função da frequência do campo ultra-sônico. Com o objetivo de estender a distribuição de tamanho de partículas e também de diminuir os efeitos negativos da formação de ondas estacionárias nos tanques de limpeza, iniciou-se o desenvolvimento, a partir da década de 50, de sistemas capazes de operar em múltiplas frequências. Hoje, estes sistemas multi-frequenciais são o “estado da arte” dos sistemas industriais de limpeza por ultra-som, e possuem como núcleo transdutores piezoelétricos tipo Langevin (TPL).

#### Sistemas multi-frequenciais

Podemos dividir os sistemas com múltiplas frequências disponíveis no mercado em dois grupos:

**1-Sistemas com dois ou mais conjuntos de transdutores/geradores mono-frequenciais:** São sistemas que possuem dois ou mais conjuntos de transdutores e geradores mono-frequenciais acoplados ao mesmo tanque de limpeza. O primeiro destes sistemas foi desenvolvido na década de 50. A partir da década de 70 foram desenvolvidos sistemas comerciais de 25 e 40 kHz pela Branson Cleaning Equipments, Blackstone e Zenith [8,9]. A principal desvantagem deste grupo é a necessidade de se dispor de transdutores e geradores em dobro. Este grupo detém apenas uma pequena fatia do mercado de sistemas multi-frequenciais.

**2-Sistemas com transdutores e geradores capazes de operar em uma banda de frequência ao redor da frequência principal e das frequências harmônicas:** Com a popularização dos computadores e as restrições ambientais ao uso de solventes, surgiu uma demanda significativa nos países desenvolvidos e do leste asiático por sistemas de limpeza ultra-sônicos capazes de atender os requisitos de limpeza e velocidade de produção da indústria microeletrônica e de semicondutores. Em resposta a esta nova demanda do mercado, saíram na frente duas empresas americanas: Crest e CAE-Ney-Blackstone. Estas empresas lançaram equipamentos com múltiplas frequências na faixa de 40 a 170 kHz, capazes de remover eficientemente uma ampla faixa de distribuição de partículas (desde alguns microns até partículas sub-microscópicas). Os equipamentos lançados por estas empresas deram origem a um segundo grupo de sistemas de limpeza com múltiplas frequências: O “grupo dos sistemas com transdutores e geradores capazes de operar em uma banda de frequência ao redor da frequência principal e das frequências harmônicas” [10,11]. Neste grupo, os transdutores são capazes de operar em harmônicas e são excitados por geradores, que além de múltiplas frequências, conseguem gerar uma varredura (“sweep”) ao redor das frequências centrais de cada modo, o que colabora com a homogeneidade da densidade de potência e com a diminuição das ondas estacionárias. As frequências em que estes sistemas apresentam o melhor desempenho são a fundamental (primeira harmônica), normalmente 40 kHz, e a terceira harmônica, em torno dos 120 kHz. Estes sistemas detém a maior parte do mercado de sistemas multi-frequenciais.

#### Sistemas mono-frequenciais de 25 ou 40 kHz

Os sistemas de 25 kHz são ótimos para limpezas pesadas (grande quantidade de contaminante/contaminantes particulados) e os sistemas de 40 kHz para limpezas mais delicadas ou para o refinamento da limpeza a 25 kHz. Normalmente estes sistemas são associados em equipamentos com múltiplos estágios/tanques de limpeza (vide Fig.1).

Os tradicionais sistemas de limpeza mono-frequenciais de 25 ou 40 kHz, apesar de há muito tempo não serem o estado da arte, detém a maior parcela do mercado de sistemas de limpeza por ultra-som, devido à excelente razão custo/benefício e à eficiência na realização de limpezas não críticas. Estes sistemas são largamente utilizados na indústria metal-mecânica, automotiva, aeronáutica e óptica, para a remoção de resíduos metálicos e graxos de processos de usinagem, manutenção e manipulação, além das aplicações na área de saúde, para a limpeza de aparatos cirúrgicos. No Brasil, a demanda é majoritária por estes sistemas de 25 e 40 kHz por questões econômicas e de oferta limitada de alternativas mais avançadas. Apesar de não terem recebido grandes contribuições tecnológicas, no sentido de unificar suas características em um único bi-frequencial na faixa de 20 a 50 kHz, ocorreram evoluções, como por exemplo, o advento dos transdutores tubulares e dos geradores com varredura (“sweep”), que melhoraram a distribuição de densidade de potência e reduziram a formação de ondas estacionárias.



**Expectativas e Perspectivas Tecnológicas para os Sistemas de Limpeza por Ultra-som**

Hoje, a maior expectativa dos usuários de sistemas de limpeza por ultra-som é por equipamentos com uma melhor relação custo/benefício, desejo que pode ser atendido com as seguintes inovações:

- Desenvolvimento de um método normatizado para avaliar e padronizar a qualidade dos equipamentos de limpeza
- Redução do nível de ruído acústico gerado pelos equipamentos de limpeza.
- Compactação dos atuais sistemas de limpeza mantendo-se o desempenho e a produtividade

Desenvolvimento de produtos químicos que acelerem e facilitem o processo de limpeza por ultra-som

**A importância das cerâmicas piezoelétricas para os equipamentos de limpeza por ultra-som**

As [cerâmicas piezoelétricas](#) constituem o “coração” dos sistemas modernos de limpeza por ultra-som. São elas as responsáveis pela conversão da energia elétrica suprida pelo gerador no ultra-som que irá promover a cavitação e a limpeza. Conseqüentemente, o uso de cerâmicas de qualidade é primordial para que o sistema de limpeza também seja de qualidade.

Além das cerâmicas também é importante o controle de qualidade rigoroso na fabricação e sintonia dos transdutores (com a eletrônica) utilizando um impedâncímetro ou um [analisador de transdutores](#).

**COMPLEMENTO: MECANISMOS MICROSCÓPICOS DA LIMPEZA ULTRA-SÔNICA**

O primeiro contato com um sistema de limpeza por ultra-som é sempre intrigante. Diz-se no gabinete do equipamento que a frequência de operação é 25 kHz ou 40 kHz, uma frequência não audível, mas mesmo assim ouve-se um chiado que lembra o de uma fritura (este chiado chega a atingir a intensidade de 90 decibéis em equipamentos de médio e grande porte). Ao observar atentamente o líquido nota-se a presença de formações filamentosas de pequenas bolhas que se agitam incessantemente. Ao submergir as pontas dos dedos no banho ultra-sônico sentem-se pequenas pontadas na pele e observa-se um interessante desprender de gordura que turva a porção de água ao redor. Para finalizar, pode-se mergulhar uma folha de papel alumínio no banho para se observar a misteriosa perfuração e desmanche que ocorre em poucos minutos. Tudo isso com o líquido em temperatura ambiente. Um nebulizador ultra-sônico também costuma despertar bastante curiosidade, o que vem a ser aquela espécie de vapor frio? Como é gerado?

Este complemento é dedicado à compreensão dos fenômenos da cavitação e transferência de momento, responsáveis pelo funcionamento dos sistemas de limpeza por ultra-som.

**Cavitação**

A cavitação induzida por diferenciais de pressão tornou-se um fenômeno conhecido no final do século 19, quando a marinha britânica se deparou com o problema da perda de potência e corrosão das pás propulsoras dos cada vez mais potentes navios. Os primeiros estudos sobre a cavitação (realizados visando solucionar o problema dos propulsores) foram realizados por Lord Rayleigh, que criou o modelo hoje conhecido como “Rayleigh Cavity” [12]. De uma forma geral, o fenômeno da cavitação se refere à formação de cavidades vazias ou preenchidas com gases/vapores em um meio líquido, sendo que esta definição inclui os fenômenos da ebulição e efervescência. Na presença de som (que gera um diferencial de pressão alternado) temos a cavitação acústica em que ocorre não só a formação e expansão como também o colapso de cavidades [13]. É a cavitação acústica o fenômeno explorado pelos sistemas de limpeza ultra-sônicos.

**Cavitação acústica**

Em um líquido absolutamente puro, livre de gases diluídos e inhomogeneidades, a pressão negativa necessária para induzir a formação de cavidades é elevadíssima, da ordem da tensão de ruptura (“*tensile strength*”) do líquido, algo em torno de -270 bar no caso da água (1 bar  $\approx$  0,98 atmosfera). Mas em líquidos ordinários, alguns bares de pressão negativa (facilmente proporcionados por transdutores piezoelétricos) são suficientes para gerar cavidades a partir de micro bolhas, gases dissolvidos e não homogeneidades [12]. Quando induzimos a propagação de uma onda mecânica (como por exemplo, ultra-som) em um meio líquido, este é submetido a um diferencial de pressão alternado que gera ciclos de expansão e compressão de acordo com a frequência e amplitude da onda. Nos ciclos de expansão (diferencial de pressão negativo), micro-bolhas, gases dissolvidos e não homogeneidades podem dar origem a cavidades que passam a oscilar em tamanho, de acordo com a frequência das compressões e

rarefações que se sucedem, e que crescem por difusão retificada. Ao atingirem um tamanho crítico, onde estas cavidades entram em ressonância com a frequência da onda mecânica, pode ocorrer um rápido crescimento do volume que leva a cavidade a boiar, a implosão da cavidade ou a estabilização das oscilações, dependendo de seu preenchimento (gases e/ou vapores) e dos parâmetros do líquido e da excitação mecânica.

O fenômeno da cavitação acústica é chamado de eferescência induzida quando as cavidades bóiam, cavitação estável quando ocorre a estabilização das oscilações das cavidades, e de cavitação transiente quando ocorre a implosão das cavidades. É a cavitação transiente o principal fenômeno explorado nos processos de limpeza por ultra-som. A cavitação estável colabora com o processo de limpeza agitando o meio líquido e a eferescência com a desgaseificação (que aumenta a intensidade da cavitação transiente).

A cavitação transiente é subdividida em gasosa e vaporosa, na gasosa o principal preenchimento das cavidades são gases, que anteriormente estavam dissolvidos no líquido, e na vaporosa, vapor do líquido que constitui o banho. A implosão/colapso das cavidades gasosas é menos intensa devido ao efeito amortecedor dos gases, sendo a cavitação transiente vaporosa mais eficiente para os processos de limpeza. Na Fig. 10 temos uma representação da dinâmica de cavidades vaporosas apresentadas para diversas amplitudes de onda mecânica, onde as cavidades surgem, se desenvolvem via difusão retificada e colapsam. O desenvolvimento e colapso das cavidades podem ocorrer durante vários ciclos ou em um único ciclo, dependendo dos parâmetros da onda mecânica e do líquido. **Quanto menor a frequência da onda mecânica, mais tempo a cavidade tem para crescer em um ciclo de expansão e quanto mais intensa a onda mecânica maior a taxa de crescimento da cavidade.**

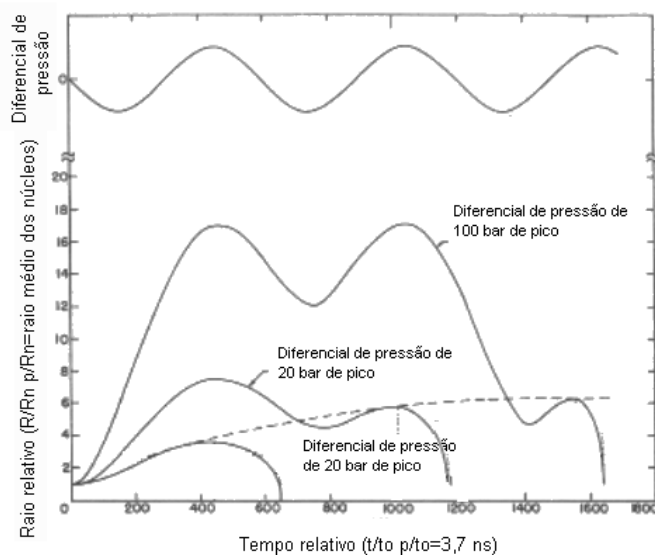


Figura 10 - Dinâmica (raio em função do tempo) de cavidades acústicas vaporosas formadas em um líquido real para diversas amplitudes de ultra-som.

Na Fig. 11 temos uma seqüência de fotos do desenvolvimento e colapso de uma cavidade vaporosa [15] com dinâmica aproximada da mostrada pela curva com diferencial de pressão de 20 bares apresentada na Fig. 10.

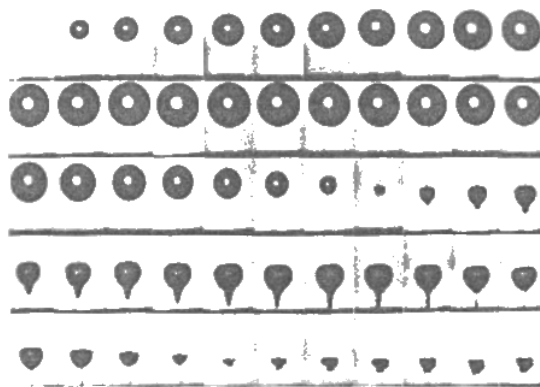


Figura 11- Fotos do desenvolvimento e colapso de uma cavidade vaporosa com dinâmica aproximada da curva com diferencial de pressão de 20 bares da Fig. 10.

Na Fig. 12 temos uma foto do momento em que a cavidade inicia seu processo de colapso, que não é uma simples redução do raio como previsto pelo modelo “*Rayleigh Cavity*”, mas sim um fenômeno não linear em que a superfície da cavidade se revolve.



Figura 12 - Foto do momento inicial do colapso de uma cavidade.

Existem estudos que estimam os picos de pressão e temperatura do preenchimento da cavidade, ao final do processo de colapso, em mais de 500 atmosferas e 5.000 °C [12].

#### **Cavitação, limpeza e influência da frequência do ultra-som.**

O diâmetro característico de uma cavidade ressonante, tendo como meio líquido água e sob condições normais de pressão e temperatura, é de aproximadamente 240  $\mu\text{m}$  para uma excitação de 25 kHz e de aproximadamente 150  $\mu\text{m}$  para 40 kHz. Estes diâmetros correspondem aos diâmetros de ressonância, nos quais a cavidade irá oscilar absorvendo energia da onda mecânica de excitação até colapsar, sendo que este colapso culmina em uma onda de choque e em um jato de alta energia de líquido e micro-bolhas (que serão os próximos núcleos formadores de cavidades gerando uma reação em cadeia). Esta onda de choque e o jato de líquido e micro-bolhas possuem entre 5 e 10 % do diâmetro de ressonância da cavidade (algo em torno de 10 à 20  $\mu\text{m}$  para frequências na faixa de 25-40 kHz) e costumam ser direcionados contra a superfície mais próxima, desempenhando o papel principal da cavitação no processo de limpeza por ultra-som [16].

**De acordo com o modelo de McQueen [17], quando o jato e a onda de choque atingem a superfície encontram uma camada viscosa que é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência do ultra-som (algo em torno de 2,8  $\mu\text{m}$  para 40 kHz – Vide Fig. 13) esta camada resguarda as partículas com diâmetros inferiores à sua espessura tornando-as acusticamente “invisíveis”.** Partículas com diâmetros superiores à espessura desta camada viscosa são removidas pelas forças de cisalhamento geradas pelo jato e pela onda de choque e as partículas sub-microscópicas “invisíveis” às forças de cisalhamento tem a remoção facilitada pela aceleração do processo de difusão dos contaminantes dissolvidos quimicamente através da camada viscosa, que na ausência de ultra-som teria uma espessura de 30  $\mu\text{m}$ , uma ordem de grandeza acima do que na presença do ultra-som. Temos, portanto, como extremos da dependência da limpeza da frequência, a remoção de contaminantes particulados e mais grosseiros com as frequências mais baixas e a remoção dos contaminantes microscópicos com as elevadas.

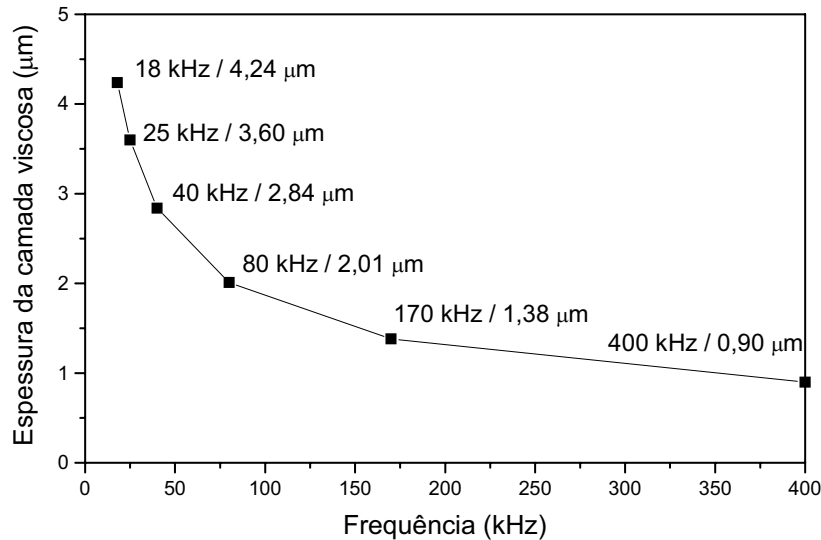


Figura 13 - Espessura da camada viscosa em função da frequência [18]

Na Fig. 14 temos a percentagem de partículas removidas em função do tamanho de partícula e da frequência do ultra-som utilizado para induzir a cavitação. Podemos observar que para as frequências mais comuns (25 e 40 kHz) a eficiência converge para tamanhos de partículas superiores a 4  $\mu\text{m}$  (o gráfico não mostra, mas para particulados com tamanho superior a 10  $\mu\text{m}$  o desempenho do ultra-som de 25 kHz supera a do 40 kHz), e que para tamanhos de partícula inferiores a 1  $\mu\text{m}$  a superioridade do sistema de 40 kHz é expressiva.

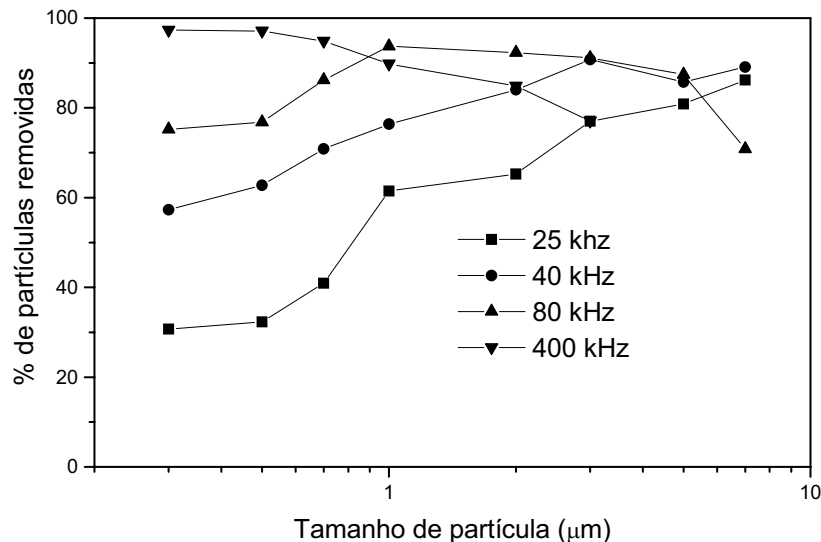


Figura 14 - Percentagem de partículas removidas em função do tamanho de partícula e da frequência do ultra-som [18].

Estas diferenças na eficiência dos sistemas de limpeza mono-frequenciais em função da frequência justificam a utilização de múltiplos tanques de limpeza (vide Fig. 1) em sistemas de médio e grande porte, e a escolha da frequência de equipamentos de pequeno porte em função da distribuição de tamanho de partícula média do contaminante a ser removido. Estas diferenças de eficiência são a principal motivação para o desenvolvimento de sistemas de limpeza multi-frequenciais.

#### Jato acústico (“acoustic streaming”)

Diversos fenômenos associados à acústica não linear, como por exemplo, os explorados pela sonoquímica para acelerar reações (aumento da transferência de massa e calor, catálise via cavitação, etc...) estão correlacionados ao jato acústico, que é basicamente o fluxo de fluido induzido por um campo

ultra-sônico de tal intensidade que não possa ser modelado matematicamente desprezando-se termos de ordem superiores para solucionar a equação da continuidade ( $\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot \rho\mathbf{u} = 0$ ), propagando-se em um meio atenuante. Experimentalmente podemos dividir o fenômeno do jato acústico em dois tipos, um primeiro, relacionado principalmente à propagação do campo acústico em um meio atenuante, e um segundo, relacionado principalmente a irregularidades no campo acústico e interações com superfícies. No primeiro tipo, o fluido sofre uma força  $F$  por unidade de volume igual a  $\rho\alpha A^2$ , sendo  $\rho$  a densidade do meio,  $\alpha$  o coeficiente de atenuação do meio e  $A$ , a área do campo acústico. No segundo tipo o jato acústico e a força a que o fluido será submetido dependem das condições de contorno do meio de propagação. Na Fig. 15 podemos observar os jatos ultra-sônicos gerados por uma fonte ultra-sônica de 400 kHz.

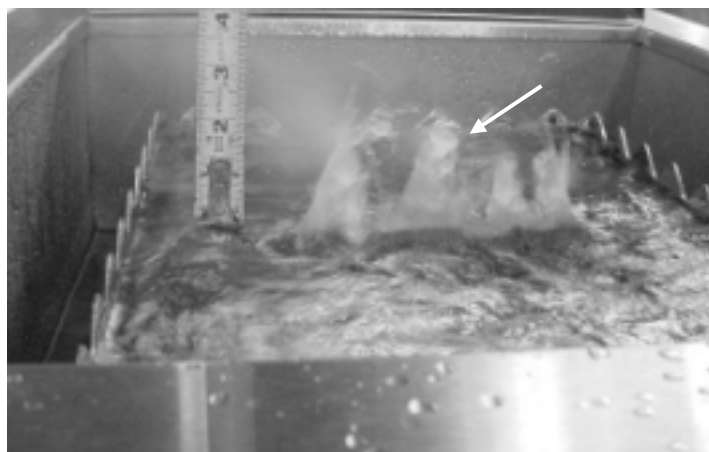


Figura 15 – Exemplo de um sistema “megassônico” operando. Neste sistema uma fonte de ultra-som de 400 kHz gera jatos ultra-sônicos (indicados pela seta branca) que chegam a saltar da superfície do líquido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COTELL, C.M.; SPRAGUE, J.A.; SMIDT, F.A.; **ASM Handbook, Volume 5 / Surface Engineering**: The Materials Information Society.
- [2] QUITMEYER, J.; **Cleaning Challenges: Chemistry, Process, Testing, and Waste Treatment – Cleantech Exposition 2002 Seminars**. Proceedings... CD
- [3] Endereço eletrônico da **Feira da Mecânica 2004**, organizada pela Alcantara Machado Feiras de Negócios.
- [4] PUSKAR, A.; **The use of High-intensity Ultrasonics**: Elsevier Scientific Publishing Company – 1982.
- [5] FREDERICK, J.; **Ultrasonic Engineering**: John Wiley & Sons, Inc. - 1965.
- [6] BÖSZÖRMÉNYI, I.; SEIP, C.; **Ultrasonic Cleaning Fundamentals, Cleantech Exposition 2002 Seminars**. Proceedings... CD
- [7] FUCHS, J.; **Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application, Cleantech Exposition 2002 Seminars**. Proceedings... CD
- [8] PEDZIWIATR, M.P.; **Ultrasonic cleaning apparatus, United States Patent 5,865,199**, February 2, 1999.
- [9] PEDZIWIATR, M.P.; **Ultrasonic cleaning method in which ultrasonic energy of different frequencies is utilized simultaneously United States Patent 6,019,852**, February 1, 2000.
- [10] PUSKAS, W.L.; **Apparatus and methods for cleaning and/or processing delicate parts, United States Patent 5,834,871**, November 10, 1998.
- [11] GOODSON, J.M.; **Ultrasonic transducer using third harmonic frequency, United States Patent 6,653,760**, November 25, 2003.
- [12] SUSLICK, K.S.; **The Chemical Effects of Ultrasound, Scientific American** February 1989.
- [13] NEPPIRAS, E.A.; **Acoustic cavitation: an introduction, Ultrasonics** January 1984.
- [14] MASON, W.P.; **Physical Acoustics Principles and Methods**, Volume 1 parte B, Academic Press 1964.

- [15] EDMONDS, P.E.; **Methods of Experimental Physics: Ultrasonics**, Volume 19, Academic Press 1981.
- [16] NEPPIRAS, E.A.; Acoustic Cavitation, **Physics Reports** (1980) 61 159-251.
- [17] MCQUEEN, D.H.; Frequency dependence of ultrasonic cleaning, **Ultrasonics**, 1986 vol 24 273-280.
- [18] LAMM, E.W.; Selecting the Ultrasonic Frequency to Match the Application , **Cleantech Exposition 2002 Seminars**. Proceedings... CD.

Notas: i) O conteúdo deste application note foi adaptado da dissertação de mestrado “DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS DE POTÊNCIA BI-FREQÜÊNCIAS PARA SISTEMAS DE LIMPEZA POR ULTRA-SOM”, do mesmo autor, apresentada em 2005 na UFSCar pelo PPGCEM e de web sites relevantes sobre o assunto em questão. ii) A ATCP Engenharia Física não se responsabiliza pelo uso das informações contidas neste relatório e eventuais perdas e danos associados.

Você tem sugestões e/ou críticas para melhorar este artigo?  
Envie para [ha@atcp.com.br](mailto:ha@atcp.com.br) a/c Henrique Alves. Obrigado!