

Relatorio Técnico RT-ATCP-02

# Limpieza por Ultrasonido:

Información general y estado de la técnica

**ATCP Engenharia Física**

[ww.atcp.com.br](http://ww.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 y publicado online el cinco de abril del 2010]

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de sistemas de limpieza para la eliminación de contaminantes está presente en diversas ramas, recorriendo los servicios industriales hasta llegar a los hospitalarios, ya sea para la manutención de equipos y dispositivos, en la limpieza de superficies o en los procesos de limpieza durante el propio tiempo de la fabricación. Los principales tipos de limpieza pueden ser divididos en 08 grupos [1]:

- Alcalina
- Por disolventes
- Por emulsiones
- Por baño de sales fundidas.
- Ultrasonido
- Ácido
- Mecánica
- Por descapage

La elección del sistema de limpieza es determinada generalmente por las siguientes variables [2]:

- Naturaleza del contaminante
- Naturaleza del objeto a limpiar
- Grado de limpieza requerido
- Geometría de los objetos a limpiar
- Cantidad y frecuencia
- Necesidad de procesos automatizados
- Restricciones y reglamentaciones ambientales
- Costos y presupuestos disponibles

En *ASM Handbook, Volumen 5 - Surface Engineering [1]*, puede encontrar una explicación detallada de los distintos procesos de limpieza industrial.

La utilización de la limpieza por baño de sales fundidas y mediante disolventes ha decaído en las últimas décadas en los países desarrollados, esto se debe a las crecientes restricciones en el uso de productos tóxicos y nocivos para el medio ambiente. Como alternativas principales para la utilización de estos procesos están; la limpieza con ácidos, por alcalinos y por emulsiones, junto con la limpieza mecánica y ultrasónica. Estas, además de ser menos agresivas al medio ambiente y a la salud, facilitan el despliegue de sistemas automatizados [2].

En Brasil, hasta el 90, los sistemas de limpiezas más sofisticados (por ultrasonidos y automatizados) eran importados y utilizados, en su gran mayoría, por empresas multinacionales que los compraban en sus países de origen. Los sistemas más simples eran desarrollados y utilizados por pequeñas y medianas empresas, siendo muchas veces similares a las primeras versiones analógicas importadas. Con la aceleración de la globalización en los años 90 y de las limitaciones ecológicas, surgió una gran demanda entre esas empresas por sistemas de limpiezas más eficientes, que posibilitaron el aumento de la competitividad de sus productos siendo estos más saludables para el medio ambiente tales como los sistemas de ultrasonidos y los de automatización, así como la utilización de estos en las aplicaciones médicas y hospitalarias. Ese nuevo nicho de mercado se viene explorando en Brasil con éxito por diversas empresas brasileras y extranjeras.

## VISIÓN GENERAL

La tecnología de limpieza ultrasónica hace uso de la cavitación y de la transferencia de tiempo, fenómenos inducidos por la propagación de ondas acústicas de alta intensidad, con frecuencia por encima de lo audible ( $\approx 18$  kHz) en medios líquidos [3-4]. Es el más eficiente de los métodos de limpieza no abrasivos y que no utilizan disoluciones químicas de sustrato [4]. Asociada a otros métodos; tales como la limpieza alcalina, ácida y por emulsión; la limpieza ultrasónica es capaz de remover contaminantes complejos sin comprometer la integridad o dañar la superficie a limpiar, siendo particularmente efectiva en la limpieza de objetos con cavidades, agujeros y huecos [2]. Actualmente es ampliamente aplicada en la

industria metalúrgica, automovilística, aeronáutica y de la óptica para la eliminación de residuos metálicos y grasos en el proceso mecánico, de manutención y manipulación. [4,5].

En la Fig.1 tenemos un sistema industrial típico de limpieza por ultrasonido, son tres tanques dispuestos en serie: El primero realiza la limpieza más gruesa (con ultrasonido de 25kHz), el segundo remueve las partículas microscópicas que resistieron a la acción del primero (con ultrasonido de 40 kHz) y el tercero enjuaga, evitando que se sequen residuos de soluciones arrastradas desde los tanques anteriores (lo que comprometería la eficiencia del proceso). En este sistema, las fuentes de ultrasonido son acopladas en la parte inferior de los tanques y estimuladas por un generador. La automatización de esta configuración no es compleja, basta simplemente espacio para llevar a cabo el desplazamiento de los cestos de piezas a lo largo de los tres tanques.

En la Tabla I mostramos la comparación entre los principales procesos de limpieza utilizados en la industria metalúrgica [1].

Sin dudas, la limpieza por ultrasonido es lo más avanzado en cuanto a eficiencia y fiabilidad, y no deja que desear en cuestiones de practicidad y costo de operación, aunque la tecnología sea la más cara.

A pesar de los altos costos, la demanda por los sistemas de ultrasonidos está en franca expansión motivada principalmente por las ya mencionadas limitaciones ambientales que tienen las otras tecnologías. Los mayores fabricantes mundiales son las multinacionales Crest, Branson y Amsonic. En Brasil se destacan la [CTA de Brasil](#) y la Unique, además de otros fabricantes de equipos para laboratorios y clínicas (instalaciones con tanques de hasta 5 litros).

## ASPECTOS MACROSCÓPICOS DE LA LIMPEZA

Limpieza en general, es la eliminación permanente de un contaminante de un sustrato, que puede ser en la superficie de cualquier objeto. **Para realizar la limpieza, es preciso ejercer un trabajo para eliminar los contaminantes, romper los enlaces químicos, vencer la fuerza de atracción eléctrica y de Van der Waals, garantizando que esta eliminación sea permanente, evitando que la fuerza eléctrica redeposite los contaminantes**[6]. Por lo tanto, la limpieza de un sustrato no es una tarea fácil, especialmente si la necesidad de limpieza requerida fuese alta, si los contaminantes fuesen químicamente inertes, si el objeto ha limpiar tuviese huecos y cavidades o no pueda someterse a la abrasión, química o mecánica.

En los sistemas de limpieza por ultrasonidos, quien realiza el trabajo de remover los contaminantes y mantenerlos alejados del sustrato (normalmente con ayuda química) son los fenómenos de propagación de sonidos de alta intensidad: la cavitación y el tiempo de transferencia.

Las manifestaciones macroscópicas de estos fenómenos en el proceso de limpieza son las siguientes [2,5,7]

- La dispersión y aumento de la disolución de las películas de sólidos y líquidos
- Erosión
- La fatiga y la degradación de contaminantes
- Eliminación de burbujas de aire en pequeños orificios y cavidades.

La cavitación es el efecto principal en los sistemas que operan a frecuencias de hasta 100 kHz y el tiempo de transferencia, en los sistemas que operan a frecuencias próximas a 1 MHz (conocido como los sistemas Megasónicos).

## **La dispersión y aumento de la disolución de las películas de sólidos y líquidos**

En la *Fig. 2*, tenemos la condición inicial y la evolución de un sustrato sumergido en un baño químico estático. Dado que la acción del baño se produce sólo en la interfaz, a través de la disolución, a medida que el baño reacciona con los contaminantes se forma una capa saturada, que conduce a la disminución de la velocidad de disolución o incluso el estancamiento del proceso, tornando indispensable a la acción mecánica. Cuando el objeto de limpieza tiene una geometría compleja con agujeros y grietas, amenudo la agitación mecánica generada por las burbujas de aire o agitadores de hélice, no es suficiente, llegando a ser obligatorio el uso de ultrasonido.

*Figura 2 - Condición inicial y evolución de un sistema de limpieza donde el sustrato a limpiar y el baño químico se encuentran estáticos.*

En presencia de un campo ultra-sónico de alta intensidad en medio líquido, ocurre el fenómeno de la cavitación, que en resumen podríamos describirlo como el surgimiento de burbujas de vapor que colapsan generando diferencias específicas de presión y temperatura. En la *Fig. 3* tenemos una representación de la acción pictórica de la cavitación en la dispersión de la capa de baño saturado y en la eliminación mecánica de contaminantes.

*Figura 3 – La inhibición de la capa saturada y la eliminación mecánica del contaminante por cavitación.*

### **Erosión**

Entre los muchos tipos de contaminantes, tenemos los químicamente inertes, que son los más difíciles de eliminar debido a la exigencia de utilizar la acción mecánica vigorosa. Para estas aplicaciones los sistemas de limpieza por ultrasonido son especialmente adecuados para la erosión generada por la cavitación, eliminando el contacto directo del objeto a limpiar con cepillos u otros agentes físicos externos. *Ver Fig.4.*

*Figura 4 - Sustrato con contaminantes inertes al baño químico eliminado por la cavitación.*

Además de la cavitación, otro fenómeno de la propagación de campos ultra-sónicos intensos que viene siendo explorado es la transferencia de impulso, que se torna importante en frecuencias superiores a 1 MHz. En estos sistemas los contaminantes son eliminados por la fuerza de corte generada por un golpe acústico (*Ver Fig.5*). Los nebulizadores por ultrasonidos también se valen de ese fenómeno.

*Figura 5 -Eliminación de los contaminantes del sustrato por medio de la erosión generada por el sonido de los reactores.*

### **Eliminación de contaminantes presentados en capas y de burbujas de aire**

Mediante la propagación, las ondas ultrasónicas generan la expansión y contracción de burbujas de aire que pudieran estar atrapadas en orificios y cavidades, muchas veces impidiendo la limpieza completa del objeto dificultando el acceso del baño químico. Estos ciclos propician la disminución de los contaminantes presentados en capas, facilitando la eliminación de burbujas atrapadas por la tensión superficial (durante la expansión el volumen aumenta, y consecuentemente, la fuerza de empuje en sentido de remover la burbuja), *ver Fig. 6*. Los fenómenos de la cavitación y de la transferencia de impulso serán detallados y explicados posteriormente.

*Figura 6 – Decamación de contaminantes dispuestos en capas mediante la expansión de burbujas de aire.*

### **FUENTES ACÚSTICAS PARA SISTEMAS DE LIMPEZA POR ULTRASONIDOS**

Existen dos tipos de fuentes acústicas que se utilizan en los sistemas de limpieza por ultrasonidos: las piezoeléctricas y la magnetostrictiva.

Las piezoeléctricas hace uso de la capacidad de algunos materiales al deformarse cuando son sometidos a un campo eléctrico, principalmente las [cerámicas de Titanato Zirconato de Chumbo \(PZT\)](#). [Las magnetostrictivas hace uso de la capacidad que tienen algunos materiales que se deforman cuando son sometidos a un campo magnético, principalmente de aleaciones especiales de Níquel. Estos materiales constituyen el elemento activo de los transductores de ultrasonidos, que sometidos a campos eléctrico/magnéticos variables generan campos acústicos que pueden fácilmente alcanzar 2 kW/cm<sup>2</sup>.](#)

Los transductores magnetostrictivos (*ver Fig. 7*) son más robustos y no pierden eficacia con el tiempo como los piezoeléctricos, aunque en contrapartida, no consiguen operar en frecuencias por encima de 20 kHz y son muy caros debido a los costos de las aleaciones y al tipo de generador (de alta potencia/frecuencia y baja impedancia)

*Figura 7 – Transductores magnetostrictivos. Se observan las bobinas enrolladas en el núcleo de níquel para aplicar el campo magnético (Blue Wave Ultrasonics).*

Los transductores piezoeléctricos, aunque pierden eficiencia con el uso debido a la despolarización de las cerámicas, poseen diversas ventajas que los hacen más atractivos, como el bajo costo (relativo), la facilidad de fabricación y de excitación. Con el respaldo de estos puntos fuertes, se ha difundido más la tecnología de estos transductores, dejando a los magnetostrictivos a penas una porción muy pequeña en el mercado para aplicaciones de baja frecuencia (15 kHz). Existen diversos tipos de transductores piezoeléctricos, los más difundidos de estos es el tipo Langevin, que consiste básicamente en un par de cerámicas y un par de masas metálicas unidas por tornillo, como se muestra en la *Fig. 8*.

*Figura 8 – Ejemplo de un transductor piezoeléctrico tipo Langevin (Crest Ultrasonics).*

Además del tipo Langevin, tenemos también los “unimorphs” y los tubulares. El “unimorphs”, es ampliamente utilizado en equipos de bajo costo, consiste en un disco de cerámica unido a una membrana metálica (*ver Fig. 9*) siendo sin duda los transductores más simples y económicos. Mientras que los tubulares (*ver Fig.10*), son utilizados en equipos de gran tamaño y volumen requiriendo alta tecnología para su fabricación, tanto del transductor en sí, como del generador para la excitación eléctrica.

Figura 9 – Ejemplo de un transductor piezoeléctrico tipo “unimorph”(CTA do Brasil).

Figura 10 – Transductores piezoeléctricos tubulares fabricados con titanio (Martin WalterUltraschalltechnik).

### **Estado de la Técnica de los Sistemas de Limpieza por Ultrasonidos**

La distribución del tamaño de las partículas es una función de la frecuencia del campo ultrasónico, esta distribución en un determinado Sistema de Limpieza consigue eliminar eficazmente un sustrato, una pieza o un objeto. Con el objetivo de ampliar la distribución de tamaños de partículas y también reducir los efectos negativos de la formación de ondas estacionarias en los depósitos para la limpieza, se inició a partir de la década del 50, el desarrollo de sistemas capaces de operar en múltiples frecuencias. Hoy en día estos sistemas multi-frecuenciales constituyen el “estado del arte” de los sistemas industriales de limpieza por ultrasonido, y poseen como núcleo transductores piezoeléctricos tipo Langevin (TPL).

### **Sistemas multi-frecuenciales**

Podemos dividir en dos grupos, los sistemas con múltiples frecuencias disponibles en el mercado:

**1- Sistemas con dos o más conjuntos de transductores/generadores mono-frecuenciales:** Se trata de sistemas que poseen dos o más conjuntos de transductores y generadores monofrecuenciales acoplados al mismo depósito de limpieza. El primero de estos sistemas fue fabricado en la década del 50. A partir de la década del 70 se desarrollaron los sistemas comerciales de 25 y 40 kHz por la Branson Cleaning Equipments, Blackstone e Zenith [8,9]. La desventaja principal de este grupo radica en la necesidad de disponer transductores y generadores dobles. Este grupo apenas tiene una pequeña cuota en el mercado de sistemas multi-frecuenciales.

**2-Sistemas con transductores y generadores capaces de operar en una banda de frecuencia alrededor de la frecuencia principal y frecuencias armónicas:** Con la popularización de los ordenadores y las restricciones ambientales al uso de disolventes, surgió una gran demanda en los países desarrollados por sistemas de limpieza mediante ultrasonidos capaces de atender los requisitos de limpieza y aumentara la velocidad de producción en la industria microelectrónica y de semiconductores. . En respuesta a la creciente demanda del mercado, salieron al frente dos empresas americanas: Crest y CAE-Ney-Blackstone. Estas empresas lanzaron equipos con múltiples frecuencias en el rango de 40 a 170 kHz, capaces de remover eficientemente la distribución de partículas (desde algunos microns hasta partículas sub-microscópicas). Los equipos lanzados por estas empresas dieron origen a un segundo grupo de sistemas de limpieza con múltiples frecuencias: El “grupo de los sistemas con transductores y generadores capaces de operar en una banda de frecuencia alrededor de la frecuencia principal y frecuencias armónicas” [10,11]. En este grupo, los transductores funcionan en armonía excitados por generadores que, además de obtener múltiples frecuencias, consiguen generar un barrido (“sweep”) alrededor de las frecuencias centrales de cada modalidad, colaborando con la homogeneidad de la densidad de potencia y disminución de las ondas estacionarias. Las frecuencias donde estos sistemas presentan mejor desempeño es en la primera armónica, normalmente a 40 kHz; y en la tercera armónica, en torno a los 120 kHz. Estos sistemas multi-frecuenciales tienen la mayor demanda en el mercado.

### **Sistemas mono-frecuenciales de 25 o 40 kHz**

Los sistemas de 25 kHz son óptimos para limpiezas pesadas (gran cantidad de contaminante/contaminantes particulados) y los sistemas de 40 kHz para limpiezas más delicadas o para el refinamiento de la limpieza a 25 kHz. Normalmente estos sistemas son asociados en equipos con múltiples etapas/depósitos de limpieza (ver Fig.1).

Los sistemas tradicionales de limpieza mono-frecuenciales de 25 o 40 kHz, aunque llevan mucho tiempo en el mercado, tienen la mayor demanda debido a la excelente razón costo/beneficio y a la eficiencia en la realización de la limpieza. Estos sistemas son ampliamente utilizados en la industria metalurgia, automoción, aeronáutica y de la óptica con el objetivo de eliminar residuos metálicos y grasos

en los distintos tipos de procedimientos de mecanización y manipulación, además de las aplicaciones que tienen en el área de la salud, para la limpieza de equipos quirúrgicos.

La demanda principal, en Brasil, está en los sistemas de 25 y 40 kHz debido a cuestiones económicas y de ofertas limitadas de alternativas más avanzadas. A pesar de no recibir grandes contribuciones tecnológicas, en el sentido de unificar sus características en un único bi-frecuencial en el rango de 20 a 50 kHz, se produjeron cambios, tales como la aparición de los transductores tubulares y de los generadores de barrido (“*sweep*”), que mejoraron la distribución de la densidad de potencia y redujeron la formación de ondas estacionarias.

### **Expectativas y Perspectivas Tecnológicas para los Sistemas de Limpieza por Ultrasonidos**

Hoy en día, la mayor expectativa de los usuarios de sistemas de limpieza por ultrasonidos, radica en la obtención de equipos con una mejor relación costo/beneficio, deseo que puede ser atendido con las siguientes innovaciones:

- Desarrollo de un método normatizado para evaluar y estandarizar la calidad de los equipos de limpieza.
- Reducir el nivel de ruido acústico generado por el equipo de limpieza.
- Compactación de los actuales sistemas de limpieza manteniéndose el rendimiento y la productividad.
- Desarrollo de productos químicos que aceleren y faciliten el proceso de limpieza por ultrasonido

### **La importancia de las cerámicas piezoeléctricas para los equipos de limpieza por ultrasonido**

Las [cerámicas piezoeléctricas](#) constituyen el “corazón” de los sistemas modernos de limpieza por ultrasonidos. Ellas son las responsables por la conversión de la energía eléctrica suministrada por el generador en el ultrasonido, que promoverá la cavitación y la limpieza. Consecuentemente, el uso de cerámicas de calidad es primordial para que el sistema de limpieza también sea de calidad.

Además de las cerámicas, también es muy importante el control estricto de la calidad en la fabricación y sintonía de los transductores ( con la electrónica) utilizando un impedímetro o un [analizador de transductores](#).

### **COMPLEMENTO: MECANISMOS MICROSCÓPICOS DE LA LIMPIEZA POR ULTRASONIDO**

El primer contacto con un sistema de limpieza por ultrasonido es siempre interesante. Se dice en la caja del equipo que la frecuencia de funcionamiento es de 25 kHz o 40 kHz, una frecuencia no audible; mas se escucha un silbido que se asemeja al de una friturada ( este silbido llega a alcanzar un intensidad de 90 decibeles en equipos de media y alta escala). Al observar atentamente el líquido se nota la presencia de formaciones filamentosas de pequeñas burbujas que se agitan incesantemente. Al sumergir las puntas de los dedos en el baño ultrasónico se siente pequeñas punzadas en la piel y se desprende grasa que oscurece el agua a su alrededor. Por último, se puede sumergir una hoja de papel lumínico en el baño para observar la misteriosa perforación y pérdida de la coloración que ocurre en pocos minutos. Todo eso con líquido a temperatura ambiente. Un nebulizador ultrasónico también provoca la curiosidad: Qué es aquella especie de vapor frío? Cómo es generado?...

Este complemento es dedicado a la comprensión de los fenómenos de la cavitación y transferencia de tiempo, responsables por el funcionamiento de los sistemas de limpieza por ultrasonidos.

#### **Cavitación**

La cavitación inducida por diferencias de presión se convirtió en un fenómeno conocido a finales del siglo 19, cuando la marina británica se enfrentó con el problema de la pérdida de la potencia y la corrosión de las palas de propulsión de los barcos cada vez más poderosos. Los primeros estudios sobre la cavitación ( realizados con el fin de solucionar el problema de los propulsores) se llevaron a cabo por Lorf Rayleigh, que creó el modelo ahora conocido como “Rayleigh Cavity” [12]. em general, el fenómeno de la cavitación se refiere a la formación de cavidades vacías o rellenas con gases/vapor en un medio líquido, siendo que esta definición incluya los fenómenos de ebullición y eferescencia. En presencia del sonido ( que genera un diferencial de presión alternado) tenemos la cavitación acústica

donde se produce la formación y expansión así como también el colapso de cavidades [13]. La cavitación acústica es el fenómeno explorado por los sistemas de limpieza por ultrasonidos.

### Cavitación acústica

En un líquido absolutamente puro, libre de gases diluidos y heterogeneidades, la presión negativa necesaria para inducir la formación de cavidades es elevadísima, el orden de la tensión de ruptura (“*tensile strength*”) del líquido es algo entorno a -270 bar en el caso del agua (1 bar  $\approx$  0,98 atmósfera). Sin embargo en líquidos ordinarios, algunos bares de presión negativa (fácilmente proporcionados por transductores piezoeléctricos) son suficientes para generar cavidades a partir de micro burbujas, gases disueltos y la falta de homogeneidades [12]. Cuando inducimos la propagación de una onda mecánica (como por ejemplo, ultrasonidos) en un medio líquido, este sometido a un diferencial de presión alternado genera ciclos de expansión y compresión de acuerdo con la frecuencia y la amplitud de la onda. En los ciclos de expansión (diferencial de presión negativa), micro-burbujas, gases disueltos y falta de homogeneidad pueden originar cavidades que van a oscilar en tamaño, de acuerdo con la frecuencia de las compresiones y rarefacciones que se suceden, y que crecen por la difusión rectificada. Al alcanzar un tamaño crítico, donde estas cavidades entran en resonancia con la frecuencia de la onda mecánica, puede ocurrir un rápido crecimiento del volumen que lleva a la cavidad a flotar, a la implosión de la cavidad o a la estabilización de las oscilaciones, dependiendo de su relleno de gases y/o vapores, de los parámetros del líquido y de la excitación mecánica. El fenómeno de la cavitación acústica es llamado de efervecencia cuando es inducida por flotación, la cavitación estable ocurre cuando existe la estabilización de las oscilaciones de las cavidades, y de cavitación transitoria cuando ocurre la implosión de las cavidades. La cavitación transitoria es el fenómeno explorado en los procesos de limpieza por ultrasonidos. La cavitación estable colabora con el proceso de limpieza agitando el medio líquido y la efervecencia colabora con la desgasificación (aumentado la intensidad de la cavitación transitoria).

La cavitación transitoria es subdividida en gaseosa y por vaporización; en gaseosa las cavidades se encuentran llenas de gases, que anteriormente estaban disueltos en el líquido, y por vaporización las cavidades se llenan de vapor del líquido que constituye el baño. La implosión o colapso de las cavidades gaseosas es menos intensa debido al efecto negativo de los gases, siendo la cavitación transitoria por vaporización más eficiente para los procesos de limpieza. En la Fig. 10 tenemos una representación de la dinámica de cavidades llenas de vapor presentadas para diversas gamas de la mecánica ondulatoria. Donde las cavidades surgen, se desarrollan mediante la difusión rectificada y finalmente colapsan. El desarrollo y colapso de las cavidades pueden ocurrir durante varios ciclos o en un único ciclo, dependiendo de los parámetros de las ondas mecánicas y del líquido. **Cuanto menor sea la frecuencia de la onda mecánica, más tiempo tienen la cavidad para crecer en un ciclo de expansión, y cuanto más intensa sea la onda mecánica mayor será la fase de crecimiento de la cavidad,**

*Figura 10 - Dinámica (radio en función del tiempo) de cavidades acústicas de vapor formadas en un líquido real para diversas amplitudes de ultrasonidos.*

En la Fig. 11 tenemos una secuencia de imágenes que muestran el desarrollo y colapso de una cavidad de vapor [15] mostrada con la dinámica aproximada de la curva con diferencial de presión de 20 bares presentada en la figura 10

*Figura 11- Imágenes del desarrollo y colapso de una cavidad de vapor con la dinámica aproximada de la curva con diferencial de presión de 20 bares mostrada en la Fig 10.*

En la Fig. 12 tenemos una imagen del momento en que la cavidad inicia su proceso de colapso, que no es una simple reducción del radio como fue previsto en el modelo de “Rayleigh Cavity”, sino un fenómeno no lineal donde la superficie de la cavidad gira.

*Figura 12 - Imagen del momento inicial del colapso de una cavidad.*



Existen estudios que estiman los picos de presión y temperatura del llenado de la cavidad al final del proceso de colapso, en más de 500 atmósferas y 5.000 °C [12].

### **Cavitación, limpieza e influencia de la frecuencia del ultrasonidos.**

El diámetro típico de una cavidad resonante, teniendo como medio líquido agua sobre condiciones normales de presión y temperatura, es de aproximadamente 240  $\mu\text{m}$  para una excitación de 25 kHz y aproximadamente 150  $\mu\text{m}$  para 40 kHz. Estos diámetros corresponden a los diámetros de resonancia, en la que la cavidad oscilará absorbiendo energía de la onda mecánica de excitación hasta colapsar, y este colapso culmina en una onda de choque y un chorro de alta energía de líquido y micro-burbujas (que serán los próximos núcleos formadores de cavidades causando una reacción en cadena). Esta onda de choque y el chorro de líquido y de micro-burbujas poseen entre el 5 y el 10% frecuencias en el rango de 25-40 kHz) y suelen estar dirigidos contra superficie más cercana, desempeñando el papel principal de la cavitación en el proceso de limpieza por ultrasonidos [16].

**De acuerdo con el modelo de McQueen [17], cuando el chorro y la onda de choque alcanzan la superficie encuentran una capa viscosa que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia del ultrasonido (algo en torno de 2,8  $\mu\text{m}$  para 40 kHz – Ver Fig. 13) esta capa protege las partículas con diámetros inferiores al espesor, tornándolas acústicamente “invisibles”. Partículas con diámetros superiores a la espesura de esta capa viscosa son eliminadas por la fuerza de cisallamiento generadas por el chorro y por la onda de choque, y las partículas microscópicas “invisibles” a las fuerza de cisallamiento teniendo facilitada la eliminación mediante la aceleración del proceso de difusión de los contaminantes disueltos químicamente a través de la capa viscosa, que en la ausencia de ultrasonidos tendría una espesura de 30  $\mu\text{m}$ , que en orden de magnitud es más alto en presencia de ultrasonidos. Tenemos, por tanto, una dependencia entre la limpieza y la frecuencia,; la eliminación de contaminantes y de partículas más gruesas con la frecuencia más baja, y la eliminación de los contaminantes microscópicos con frecuencias elevadas.**

*Figura 13 - Espesura 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 - Porcentaje de partículas eliminadas en función del tamaño de partícula y de la frecuencia del ultrasonido [18].*

Estas diferencias entre la eficiencia de los sistemas de limpieza mono-frecuenciales en función de la frecuencia justifican la utilización de múltiples depósitos de limpieza (ver Fig. 1) en sistemas medianos y grandes, y la elección de la frecuencia de equipos pequeños en función de la distribución del tamaño de partículas promedio del contaminante a ser eliminado. Estas diferencias en la eficiencia son la principal motivación para el desarrollo de sistemas de limpieza multi-frecuenciales.

## Chorro acústico (“acoustic streaming”)

Diversos fenómenos asociados a la acústica no lineal, como por ejemplo, los explorados por la sonoquímica para acelerar reacciones ( aumento de la transferencia de masa y calor, catálisis mediante la cavitación, etc.....) están relacionadas con ruidos acústicos, que es básicamente el flujo del líquido inducido por un campo ultrasónico de tal intensidad que no pueda ser modelado matemáticamente despreciándose términos de orden superiores para solucionar la ecuación de la continuidad ( $\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot \rho u = 0$ ), que se propaga en un medio atenuante. Experimentalmente podemos dividir el fenómeno del chorro acústico en dos tipos, un primero, relacionado principalmente a la propagación del campo acústico en un medio atenuante, y un segundo, relacionado principalmente a irregularidades en el campo acústico interactuando con superficies. En el primer tipo, el fluido sufre una fuerza  $F$  por unidad de volumen igual a  $\rho\alpha A^2$ , siendo  $\rho$  la densidad del medio,  $\alpha$  el coeficiente de atenuación del medio y  $A$ , el área del campo acústico. En el segundo tipo el chorro acústico y la fuerza a la que el fluido se someterá dependiendo de contornos del medio de propagación. En la Fig. 15 podemos observar los chorros por ultrasonidos generados por una fuente de ultrasónicos de 400 kHz

*Figura 15 – Ejemplo de un sistema “megasonico” funcionando. En este sistema una fuente de ultrasonido de 400kHz genera chorros ultrasónicos (indicados por la flecha blanca) que llegan a saltar de la superficie del líquido.*

## REFERENCIAS 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] BŐSZÖRMÉNYI, 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] NEPIRAS, 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] NEPIRAS, 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.

Usted tiene sugerencias y/o críticas para mejorar este artículo?  
Envíe para [ha@atcp.com.br](mailto:ha@atcp.com.br) a/c Henrique Alves. Gracias!

**PRODUTOS RELACIONADOS FORNECIDOS PELA ATCP**

# ATCP

DO BRASIL

CERÂMICAS E DISPOSITIVOS PIEZOELÉTRICOS

CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS DE ALTA QUALIDADE EM QUALQUER QUANTIDADE

<b>Para solda e limpeza (anéis em PZT-4 e PZT-8):</b>	<b>Para sensores (discos em PZT-5A):</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• 50 x 20 x 5,15 mm</li><li>• 38,1 x 19,1 x 5,15 mm</li><li>• 38 x 13 x 6,35 mm</li><li>• 50,8 x 19,1 x 3 mm</li><li>• 30 x 10 x 06 mm</li><li>• 25 x 12 x 3,15 mm</li><li>• 25 x 10 x 4,15 mm</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 15 x 0.9 mm</li><li>• 25 mm e 30 mm em diversas espessuras</li></ul> <p><b>(placas em PZT-5A):</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 12 x 06 x 1,2 mm</li><li>• 06 x 06 mm x 2 MHz</li></ul>

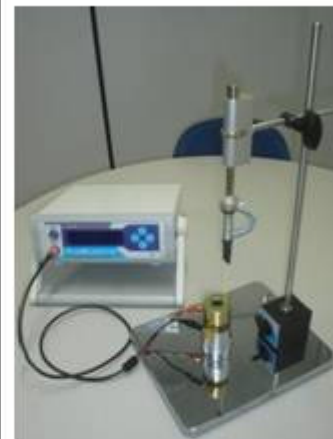
Outras geometrias, como discos e placas, medidas e materiais são fornecidas sob encomenda. O prazo de entrega varia entre 1 e 90 dias, dependendo do estoque e da programação de importações.

#### ANALISADOR DE TRANSDUTORES TRZ-03

O TRZ-03 foi desenvolvido para a análise de impedância de Transdutores Ultra-sônicos, Conjuntos Acústicos bem como para Pesquisas, Desenvolvimentos e Controle de Qualidade, em que se necessita mensurar características elétricas em função da frequência.

Com o TRZ-02, sua empresa ou laboratório contará com um diferencial tecnológico de ponta inédito na América Latina.

- Frequência de operação: 1- 200 kHz
- Faixa de impedância: 2 - 200k Ohms
- Precisão em frequência: +/-0,02 - %



#### CONSULTORIAS PARA:

- Desenvolvimento e melhoria de equipamentos ultra-sônicos de potência
- Desenvolvimento e melhoria de dispositivos piezoelétricos
- Determinação do material piezoelétrico ideal em função da aplicação
- Caracterização de materiais piezoelétricos e transdutores ultra-sônicos