

# A Sonoquímica

FERNANDO GLENADÉL BRAGA\*

Um número crescente de investigadores tem-se dedicado a um novo campo de pesquisa que estuda o efeito das ondas ultra-sónicas na reactividade química. A semelhança de várias outras técnicas modernas, poder-se-ia pensar que a Sonoquímica estaria envolta em muitas dificuldades experimentais, tais como a necessidade de equipamentos caros e sofisticados ou de uma considerável especialização num campo particular de investigação. Na realidade, a Sonoquímica mostra-se cada vez mais atraente, não apenas devido aos baixos custos envolvidos, mas também ao facto de a sua aplicabilidade se estender, praticamente, a qualquer área da Química.

## INTRODUÇÃO

Para compreender a origem e evolução das tecnologias que empregam os ultra-sons é preciso voltar ao início deste século. Em Abril de 1912, o navio de luxo S. S. Titanic afundou após a colisão com um icebergue no Oceano Atlântico, sendo organizada uma competição internacional para encontrar o melhor meio de evitar a repetição de tal desastre. Em 1917, seguindo a sugestão do norte americano L. R. Richardson de uma técnica baseada na detecção de ecos, o francês Langevin desenvolve o primeiro sistema de rastreio eficiente que utilizava este princípio, o sonar. Langevin que originalmente havia investigado os ultra-sons como uma possível técnica de detecção de submarinos teve, no entanto, que esperar até que fossem desenvolvidos os primeiros transdutores piezoelétricos para obter resultados satisfatórios.

Utilizando os transdutores recentemente desenvolvidos, Richards e Loomis efectuaram o trabalho pioneiro quanto às aplicações do ultrassom em reacções químicas na década de 20, num estudo clássico sobre os efeitos de ondas sonoras de alta frequência numa variedade de soluções, sólidos e líquidos puros [1]. Surpre-

endentemente, apesar da primeira pesquisa sistemática relatada dos ultra-sons em Química Orgânica ter ocorrido em 1938, é apenas no final da década de 70 que esta técnica começa a despertar um interesse generalizado, nomeadamente na diminuição dos tempos de reacção.

O actual desenvolvimento nos métodos sonoquímicos tem sido rápido por várias razões. Questões científicas fundamentais chamam a atenção dos investigadores, tais como se a falta de selectividade química observada seria uma propriedade derivada das ondas ultra-sónicas, ou se seria possível, sob condições diferentes, obter novos efeitos úteis e selectivos, ou ainda se a maioria dos resultados obtidos com soluções aquosas homogêneas poderia ser transposto para meios orgânicos, homogêneos ou heterogêneos. Este interesse renovado é também devido aos avanços técnicos, pois a comercialização de geradores ultra-sónicos para actividades laboratoriais de rotina como a limpeza e a desgaseificação de soluções, provavelmente encorajaram muitos cientistas a tentar, algumas vezes com sucesso, melhorias em uma série de reacções problemáticas através da irradiação ultra-sónica.

Neste texto, o símbolo ))) será usado para indicar que uma dada reacção foi submetida à irradiação ultra-sónica. O símbolo para reacções sem irradiação, isto é, efectuadas apenas com agitação será ∇.

## OS EQUIPAMENTOS SONOQUÍMICOS

### O banho ultra-sónico

Entre os vários tipos de equipamentos sonoquímicos destinados à escala laboratorial, o banho ultra-sónico de limpeza é, sem dúvida, o aparelho mais usado. Neste caso, a fonte de ultra-sons é um material piezoelétrico que está ligado à parede do banho ultra-sónico a partir de onde transmite a radiação para o meio reagente.

Um material piezoelétrico é aquele que ao ser submetido a uma pressão numa secção da sua superfície, gera uma carga em cada face oposta, igual em valor absoluto, mas de sinal contrário. Da mesma forma, se forem aplicadas cargas simétricas, a cada uma das faces opostas numa secção, a totalidade da secção de um material piezoelétrico expandirá ou contrairá, dependendo da polaridade das cargas aplicadas. Assim, ao submeter-se este tipo de material a uma corrente alternada com a frequência correcta, é possível transmitir vibrações ultra-sónicas a qualquer meio com que esteja em contacto.

O esquema básico de um banho ultra-sónico (ver Fig. 1) consiste em um ou mais transdutores piezoelétricos ligados à parte exterior de um reservatório em aço inoxidável (normalmente à base).

### A sonda de imersão directa

A principal desvantagem do banho ultra-sónico como fonte de energia para a sonoquímica é a quantidade de energia relativamente baixa que transmite ao sistema reacional. Este inconveniente pode ser ultrapassado pela utilização da sonda de imersão directa, que permite uma irradiação até 100 vezes mais intensa do que a do banho.

De forma a aumentar a quantidade de energia disponível para uma dada reacção é desejável introduzir a radiação directamente no sistema, evitando assim a dissipação e reflexão causadas pelo líquido necessário ao transporte das ondas e pelas paredes do recipiente. O meio mais simples

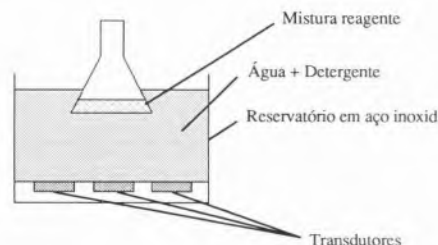


Fig. 1 - O banho ultra-sónico.

seria imergir um transdutor na solução. Entretanto, a quantidade máxima de energia (amplitude vibracional) gerada por este sistema não é muito grande e, se expusermos um cerâmico piezoelétrico a uma corrente excessiva, ele provavelmente romperá. É possível amplificar a amplitude vibracional através da ligação ao transdutor, de uma barra metálica especialmente desenhada para este fim. Esta barra, que é chamada trompa sónica, não só amplia a energia acústica disponível, como também permite que o transdutor não entre em contacto com a reacção química (apenas a ponta da barra é imersa no líquido). É este conjunto de transdutor e trompa que se designa por sonda sonoquímica (ver Figura 2).

## A CAVITAÇÃO

Os efeitos causados pelos ultrasons podem ser atribuídos a três fenómenos diferentes. Inicialmente, há um rápido movimento de fluido causado pela variação da pressão sónica que sujeita o líquido a períodos de compressão e rarefacção. O segundo fenómeno, de longe o mais importante, é a *cavitação*. Geralmente, é aceite que a formação e o colapso de microbolhas (cavitação) são os responsáveis pela maioria dos efeitos químicos observados. As microbolhas produzidas pela sujeição de um líquido à energia ultra-sónica podem ser *estáveis* e oscilar em torno de um tamanho médio, ou *instáveis* por crescerem até um determinado tamanho antes de implodirem violentamente e gerarem ondas de choque que algumas vezes produzem radiação electromagnética e gases luminescentes. São estas microbolhas instáveis as principais responsáveis pelos efeitos sobre as reacções químicas. A implosão cria, momentaneamente, pressões locais de vários GPa e temperaturas no centro da bolha entre os 10<sup>4</sup> e os 10<sup>6</sup> K. Um terceiro fenómeno tem a ver com o transporte acústico devido à existência de uma grande quantidade de energia vibracional num pequeno volume.

## A SONOQUÍMICA

A sonoquímica começou, cerca de 70 anos atrás, como um estudo dos efeitos dos ultra-sons sobre soluções aquosas homogéneas, sendo a sonólise da água o primeiro caso estudado. Na Tabela 1 estão algumas das reacções sonoquímicas homogéneas aquosas nas quais os produtos foram bem caracterizados. Entre estas reacções, uma extensa lista de oxidações e reduções de várias espécies inorgânicas foi relatada. Várias substâncias orgânicas foram também irradiadas em soluções aquosas ou em suspensões, resultando, geralmente, em produtos de degradação.

### A sonoquímica homogénea não-aquosa

Da mesma forma que foi estabelecido que a evolução sonoquímica de um soluto em água é directamente dependente do solvente, tem sido pesquisado o comportamento individual no caso de soluções não-aquosas. De facto, a maioria dos solventes testados mostraram ser instáveis sob a irradiação ultra-sónica e capazes de influenciar a eficiência da reacção pela variação da pressão de vapor do meio.

Até recentemente, poucos exemplos de reacções monomoleculares deste tipo haviam sido publicados. Estes incluíam a lenta degradação de solventes comuns, a aceleração do rearranjo de Curtius e a depolimerização de materiais com alto peso molecular. Entre estes exemplos, o rearranjo de Curtius é, provavelmente, o mais conhecido. A benzoilazida (1), irradiada em benzeno, leva à formação do isocianato de fenilo (2), com uma velocidade sete vezes mais alta do que simplesmente sob agitação à mesma temperatura. O rendimento, todavia, é baixo [13].

Se o mecanismo das reacções monomoleculares em meio homogéneo é relativamente simples de prever, os processos nos quais mais de uma espécie estão envolvidas são bem mais difíceis de compreender. Até hoje, com a provável excepção

de reacções em que intervêm gases dissolvidos, nenhuma explicação de carácter geral foi proposta e, como consequência, a pesquisa de novas reacções tem-se baseado largamente no empirismo.

É importante realçar que pela escolha adequada do solvente e das condições experimentais (líquidos pouco voláteis a baixa temperatura), as velocidades de degradação dos solventes não-aquosos podem ser tor-

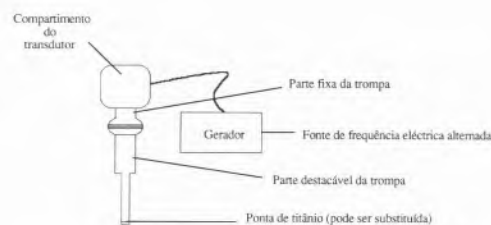
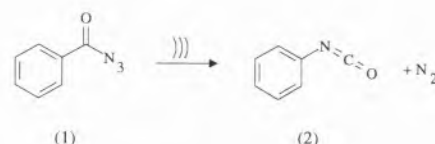


Fig. 2 - Diagrama esquemático de uma sonda de imersão directa.



Esquema 1 - O rearranjo de Curtius.

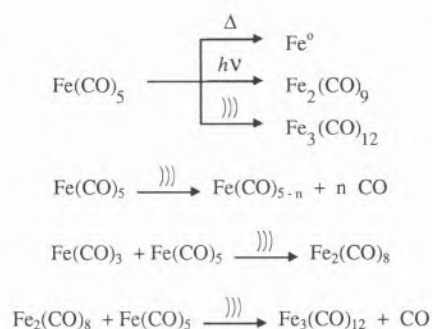
Tabela 1 - Resumo de algumas reacções sonoquímicas em solução aquosa.

Reagente presente	Produtos principais	Referência
<b>Gases</b>		
O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	2
N <sub>2</sub>	HNO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , NH <sub>2</sub> OH, NH <sub>3</sub>	3
N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	3
CO + H <sub>2</sub>	HCHO	3
<b>Iões inorgânicos</b>		
Br <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup>	Br <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub>	4
Ce <sup>4+</sup>	Ce <sup>3+</sup>	4
Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	5
I <sup>-</sup>	I <sub>2</sub>	6
MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	MnO <sub>2</sub> + Mn <sup>2+</sup>	4
CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cr <sup>3+</sup>	4
<b>Compostos orgânicos</b>		
CCl <sub>4</sub>	Cl <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , HCl, C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> , HOCl	7
CH <sub>3</sub> I	CH <sub>4</sub> , I <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, HI, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br	Br <sup>-</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	8
Ácido maleico + Br <sub>2</sub>	Ácido fumárico + Br <sup>-</sup>	9
RCHO	CO, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> , RCO <sub>2</sub> H	10
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub>	11, 12

nadas bastante lentas, muito mais baixas que a da água. Este facto constitui uma considerável vantagem, já que será possível observar experimentalmente a sonoquímica primária do substrato dissolvido e não as reacções secundárias com fragmentos do solvente. Em geral, o exame de reacções sonoquímicas em soluções aquosas tem produzido resultados de difícil interpretação, devido à complexidade das reacções secundárias que ocorrem com facilidade e é de se esperar que nos estudos futuros sejam empregues, cada vez mais, líquidos de baixa volatilidade.

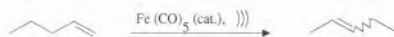
### A sonoquímica homogénea organometálica

Os únicos resultados importantes, sejam para fins teóricos ou práticos, obtidos neste domínio foram publicados por Suslick [3] que descreveu a reacção em que o pentacarbonilo de ferro, sob a acção dos ultra-sons, se comportava de uma forma bem diferente em relação aos mecanismos fotolítico e termolítico (Esquema 2).



Esquema 2 - As várias reacções do pentacarbonilo de ferro.

Esta reacção, na qual o solvente desempenha um papel importante, pode ser utilizada de forma selectiva pela diminuição da energia cavitacional, ou seja, aumentando-se a pressão de vapor do meio. As espécies intermediárias, coordenativamente insaturadas, podem ligar-se a uma base de Lewis ou a um alceno adicionado à mistura. No último caso, ocorre uma isomerização como indicado



Esquema 3 - A isomerização organometálica de alcenos [14].

abaixo (Esquema 3), com uma velocidade  $10^5$  vezes maior do que na reacção sem irradiação.

### A sonoquímica heterogénea

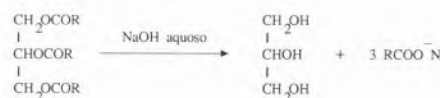
O uso de ultra-sons para acelerar reacções químicas em sistemas heterogéneos vem-se tornando um procedimento comum. Os fenómenos físicos que são responsáveis por este facto incluem a criação de emulsões em interfaces líquido-líquido, o aparecimento de erosão cavitacional, a diminuição da camada de difusão em interfaces sólido-líquido e a melhoria no transporte de massa devido à mistura turbulenta e à agitação acústica.

### A sonoquímica heterogénea líquido-líquido

Um problema comum quando se trabalha em sínteses que envolvem líquidos imiscíveis é os reagentes estarem muitas vezes dissolvidos em fases diferentes. Qualquer reacção entre estas espécies poderá acontecer apenas na região interfacial dos líquidos o que, obviamente, constituirá um processo lento. Para contornar este problema, o investigador poderá empregar um catalisador de transferência de fase (PTC) que transportará os reagentes para uma mesma fase (geralmente a orgânica) e possibilitará uma reacção eficiente entre as espécies. Esta abordagem, entretanto, apresenta dois problemas principais: o custo elevado dos PTC e o facto de serem potencialmente perigosos para os seres humanos, por serem capazes de transportar para o organismo todo o tipo de substâncias químicas dissolvidas na água. Como a irradiação de líquidos imiscíveis cria finas emulsões que possuem áreas de contacto interfacial muito grande e geram um espectacular aumento na reactividade das espécies dissolvidas em fases dife-

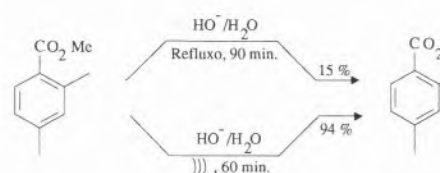
rentes, este efeito pode substituir o uso dos PTC ou pelo menos diminuir a quantidade necessária para uma dada reacção.

Um bom exemplo deste tipo de aplicação é a hidrólise de óleos, ceras e gorduras comerciais (Esquema 4) com hidróxido de sódio aquoso. Devido ao facto das gorduras serem imiscíveis com a solução aquosa da base é usada, tradicionalmente, uma rápida agitação e aquecimento até a fervura para aumentar a velocidade da hidrólise. Este procedimento no entanto, causa alguma decomposição e o aparecimento de produtos corados. Sob condições sonoquímicas, estas hidrólises podem ser feitas rapidamente a baixa temperatura e produzem materiais consideravelmente mais puros [15].



Esquema 4 - Hidrólise de ésteres de ácidos gordos.

A hidrólise de ésteres (Esquema 5), que também é frequentemente efectuada sob condições agressivas, pode ser feita de uma forma mais branda na presença dos ultra-sons. Neste caso, já que o aquecimento macroscópico não existe, o aumento na velocidade da reacção parece relacionar-se com o efeito emulsificante dos ultra-sons [16].



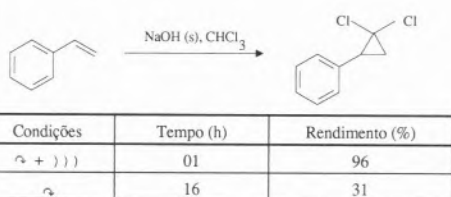
Esquema 5 - Um exemplo da hidrólise sonoquímica de ésteres.

### A sonoquímica heterogénea sólido-líquido

Bases fortes tais como o hidróxido de sódio ou de potássio são frequentemente usadas em reacções com transferência de fase. As velocidades,



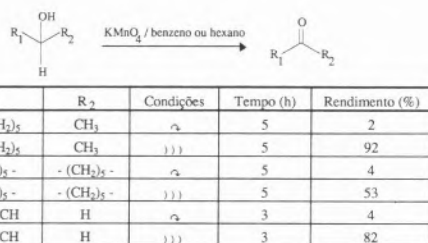
contudo, estão limitadas pela superfície do reagente exposto à solução e ao transporte de massa. A síntese e reacção do diclorocarbene (Esquema 6) constitui uma boa demonstração de como a sonoquímica pode influenciar este tipo de reacções.



Esquema 6 - Reacção em que o diclorocarbene é gerado por acção dos ultras-sons [17].

Seguindo a mesma filosofia, uma série de outras reacções têm sido testadas e dentre os melhores resultados estão os de Davidson [18]. Neste estudo, a alquilação de várias aminas secundárias foi seguida como função do tempo, sendo comparados os procedimentos com e sem irradiação.

Em reacções de oxidação e redução, o principal interesse em aplicar os métodos sonoquímicos é para encontrar condições que sejam mais eficientes do que as convencionalmente usadas. No caso das oxidações, por exemplo, os reagentes inorgânicos usuais requerem, além do solvente, a presença de água, o que torna a reacção menos eficiente e dificulta uma purificação posterior. Sob irradiação ultra-sónica (Esquema 8), o permanganato de potássio sólido (suspensão em benzeno ou hexano) pode ser usado para oxidar álcoois sem a presença de água [19].



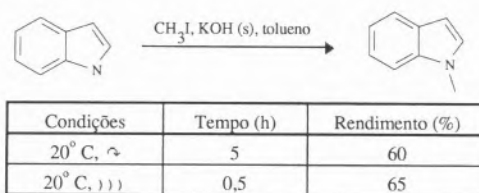
Esquema 8 - Oxidação sonoquímica de álcoois com permanganato de potássio.

## A SÍNTESE ORGANOMETÁLICA

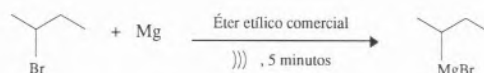
Os compostos organometálicos (Tabela 2) são importantes intermediários para a síntese orgânica e constituem actualmente um domínio de predilecção na pesquisa sonoquímica. Um problema comum em tais sínteses é que as superfícies metálicas são facilmente "envenenadas" (catálise negativa), pela presença de humidade e outras impurezas, tornando a reacção mais difícil. Assim sendo, na maior parte dos casos, os reagentes utilizados devem ser puros e secos e as superfícies metálicas limpas e livres de óxido. A irradiação ultra-sónica elimina a necessidade de tais precauções e permite muitas vezes o uso de reagentes comerciais, o que constitui uma condição invulgar na metodologia clássica da área organometálica.

Um bom exemplo deste comportamento consiste na reacção de

Grignard em que é utilizado éter etílico comercial (Esquema 9). Sob o efeito dos ultra-sons, a reacção entre o magnésio e o 2-bromobutano pode ser induzida em 5 minutos neste solvente, enquanto que o método tradicional requer 3 horas [20] devido à presença de água.



Esquema 7 - Um exemplo da alquilação sonoquímica de aminas.



Esquema 9 - A reacção de Grignard [20].

Tabela 2 - Resumo das principais reacções sonoquímicas organometálicas.

Reagentes orgânicos	Produtos	Referência
<b>Mercúrio</b>		
$(\text{R}_1\text{R}_2\text{BrC})_2\text{CO} + \text{R}'\text{OH}$	$(\text{HR}_1\text{R}_2\text{C})\text{CO}[\text{C}(\text{OR}')\text{R}_1\text{R}_2]$	21
<b>Magnésio</b>		
$\text{R-Br}$	$\text{R-MgBr}$	20
<b>Lítio</b>		
$\text{R-Br}$ $\text{R} = (\text{n-Pr, n-Bu, Ph})$	$\text{R-Li}$	22
$\text{R-Br} + \text{R}'\text{R}''\text{CO}$	$\text{RR}'\text{R}''\text{COH}$	23
$\text{R-Br} + \text{PhCHO}$	$\text{PhC(OH)R}$	24
<b>Sódio</b>		
Arenos	$\text{Na}^+ (\text{areno}^-)$	25
<b>Potássio</b>		
$\text{XH}_2\text{C}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_2\text{X}$	Cicloalcanos	26
<b>Zinco</b>		
$\text{RI} + \text{R}'\text{R}''\text{C=O}$	$\text{R}'\text{R}''\text{C(OH)R}$	27
$\text{RR}'\text{C=O} + \text{BrCH}_2\text{CO}_2\text{R}''$	$\text{RR}'\text{C(OH)CH}_2\text{CO}_2\text{R}''$	28
$\text{H}_2\text{Cl}_2 + \text{RR}'\text{C=CR}''\text{R}'''$		29
<b>Cobre</b>		
$\text{NO}_2 - \text{Ph} - \text{I}$	$\text{Ph(NO}_2) - \text{Ph(NO}_2)$	30
<b>Alumínio</b>		
$\text{CH}_3\text{I}$	$(\text{CH}_3)_3\text{Al}$	31

## A CATÁLISE E A SONOQUÍMICA

Há um grande número de artigos publicados nos quais o uso dos ultra-sons, durante a preparação de catalisadores sólidos, leva a melhorias na actividade catalítica em comparação com os materiais preparados através de métodos químicos semelhantes, mas usando apenas agitação mecânica (ver Tabela 3). O negro de platina, por exemplo, quando preparado pela redução de soluções aquosas de sais de platina com formaldeído, na presença de ultra-sons de baixa intensidade, apresenta uma actividade catalítica três vezes maior em processos como a hidrogenação de alcenos e a decomposição do peróxido de hidrogénio, do que o catalisador produzido sob agitação mecânica a 1000 rpm [32].

Na última década foi observado um espectacular crescimento do interesse no uso de catalisadores e reagentes impregnados em suportes com grandes superfícies específicas tais como a sílica gel, as peneiras moleculares, a alumina e a celite [32]. Em vários casos, o uso combinado dos ultra-sons e de um suporte impregnado com um catalisador significou melhorias numa grande variedade de sínteses inorgânicas e orgânicas [33].

Contudo, o uso dos ultra-sons para facilitar a impregnação de reagentes em suportes sólidos não é novo, existindo referências na literatura desde o início da década de 70. Nesta época, Ranganathan [34] mostrou que a irradiação, por 1 hora, de suspensões aquosas de vários óxidos metálicos ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$  e  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ) e alumina, antes da secagem e da calcinação, produzia catalisadores com um alto grau de dispersão metálica e uma grande actividade na decomposição do peróxido de hidrogénio. Do mesmo modo, a redução de uma solução aquosa de hexacloroplatinato de amónio contendo uma suspensão de sílica gel, sob um campo ultra-sónico (440 kHz, 5 Wcm<sup>-2</sup>), resultava num aumento de 80 % na superfície específica do metal quando comparado com um padrão apenas agitado mecanicamente.

A activação de catalisadores ou reagentes inorgânicos não-metálicos pelos ultra-sons, também está bem documentada. Ando [33] demonstrou que para muitas reacções promovidas por sólidos inorgânicos não-metálicos, era necessário haver uma pequena quantidade de água presente para se atingir uma reactividade óptima e em muitos casos esta água era fornecida pelo suporte "inerte". Além do mais, relacionou o número óptimo de moles de água com a energia reticular do reagente inorgânico e afirmou que a função da água é a de activar a superfície do reagente sólido pela remoção de alguns iões superficiais por solvatação. Baseando o seu raciocínio na hipótese de que a água é necessária para a exposição da superfície, Ando argumentou que os ultra-sons poderiam também cumprir este mesmo papel. Esta proposta levou à identificação de várias sínteses sonoquímicas de sucesso, tais como a oxidação de álcoois a aldeídos e cetonas pelo permanganato, a síntese de cianetos de acilo e a preparação de aminonitrilos como precursores de aminoácidos.

A capacidade dos ultra-sons em "limpar" superfícies também tem sido explorada na área da regeneração de catalisadores. O bronze catalí-

tico, usado na produção da acetona a partir do isopropanol, é regenerado a 83% da sua actividade original pela irradiação (18-22 kHz, 6-20 Wcm<sup>-2</sup>) num banho contendo uma solução de ácido sulfúrico, ácido nítrico e dicromato de sódio, enquanto que o tratamento sem irradiação resulta numa regeneração de apenas 63%. Outros exemplos são a regeneração da superfície específica, porosidade e actividade dos catalisadores paládio-alumina,  $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$  (usados na remoção dos óxidos de nitrogénio de gases de combustão) e níquel-molibdénio (usado no "cracking" de hidrocarbonetos).

Para além destes efeitos, o uso dos ultra-sons em reacções homogéneas e heterogéneas tem sido alvo de um número crescente de estudos, devido à capacidade potencial para se efectuarem reacções químicas de altas energias em fases condensadas e a temperatura ambiente. Juntamente com esta característica atractiva da sonoquímica, a facilidade na síntese de complexas espécies organometálicas, tem mostrado um impacto particularmente grande em sistemas heterogéneos e não há dúvida de que se encontrarão aplicações práticas em qualquer caso onde o problema é a mistura de reagentes numa interface.

**Tabela 3** - Diversos catalisadores sólidos que já foram alvo de estudos sonoquímicos.

Catalisador	Reacção ou sistema	Referências
Cobre	Hidrogenação de óleos	32
Zinco-cobre	Adição a enonas conjugadas	35, 36
Ferro	Conversão de Fisher-Tropsch	37
Metais do grupo da platina	Hidrogenação	39, 32
	Decomposição do $\text{H}_2\text{O}_2$	32
	Oxidação do etanol	32
Sílica-gel	Decomposição do $\text{H}_2\text{O}_2$	32, 33
$\text{Cr}_2\text{O}_3$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	Decomposição do $\text{H}_2\text{O}_2$	34
Regeneração de catalisadores	$\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$	38
	Ni-Mo	38

Uma vez que a possibilidade de uma larga utilização da sonoquímica está aberta, quais são os problemas que têm atrasado as suas aplicações num contexto geral? À primeira vista, o estado incompleto da teoria constitui a maior fraqueza. A teoria cavitacional que se prova satisfatória em muitos casos encontra, contudo, limites em alguns dos exemplos citados na literatura [40 e 41] e a melhor hipótese para uma alteração neste aspecto está na criação de uma nova proposta teórica. Luche e Damiano deram o primeiro passo, no final da década de 80, com uma teoria fenomenológica [42 e 43]. Como consequência, um conhecimento mais racional tem sido obtido nos últimos anos e já é possível predizer se a irradiação poderá ter alguma possibilidade de sucesso numa dada reacção.

\* Departamento de Química da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro; Apartado 202, 5001 Vila Real.

#### REFERÊNCIAS

- Richards, W. T., Loomis, A. L., *J. Am. Chem. Soc.*, **49** (1927), 3086.
- Duca, M. D., Yeager, E., Davies, M. O., *J. Acoust. Soc. Am.*, **30** (1958), 301 - 307.
- Suslick, K. S., *Advances in Organometallic Chemistry*, **25** (1986), 73 - 119.
- Andre, L. B., *Rev. Chim. Miner.*, **4** (1967), 283 - 315.
- Sehgal, C., Sutherland, R. G., Verrall, R. E., *J. Phys. Chem.*, **84** (1980), 2920 - 2922.
- Suslick, K. S., Schubert, P. F., Goodale, J. W., *IEEE Ultrason. Symp. Proc.* (1981), 612 - 616.
- Chendke, P. K., Fogler, H. S., *J. Phys. Chem.*, **87** (1983), 1362 - 1369.
- Zechmeister, L., Magoon, E. F., *J. Am. Chem. Soc.*, **78** (1956), 2149 - 2150.
- Lepoint, T., Reisse, J., *Tetrahedron Letters*, **33** (1992), 1055 - 1056.
- Reifsnider, S. B., Spurlock, L. A., *J. Am. Chem. Soc.*, **95** (1973), 299 - 305.
- Petrier, C., Lamy, M. F., Francony, A., *J. Phys. Chem.*, **98** (1994), 10514 - 10520.
- Okouchi, S., Nojima, O., Arai, T., *Water Sci. Technol.*, **26** (1992), 2053 - 2056.
- Apfel, R. E., *Methods of Experimental Physics: Ultrasonics*, Academic Press; Vol. 19, 1981.
- Suslick, K. S., *Advances in Organometallic Chemistry*, **25** (1986), 73 - 119.
- Einhorn, C., Einhorn, J., Luche, J. L., *Synthesis*, **11** (1989), 787 - 813.
- Davidson, R. S., Safdar, A., Spencer, J. D., Lewis, D. W., *Ultrasonics*, **25** (1987), 35.
- Moon, S., Duchin, L., Cooney, J. V., *Tetrahedron Letters*, **35** (1979), 3917.
- Regen, S. L., Singh, A., *J. Org. Chem.*, **47** (1982), 1587.
- Davidson, R. S., Patel, A. M., Safdar, A., Thornhwaite, D., *Tetrahedron Letters*, **24** (1983), 5907.
- Yamawaki, J., Sumi, S., Ando, T., Hanafusa, T., *Chemistry Lett.* (1983), 379.
- Sprich, J. D., Lewandos, G. S., *Inorg. Chim. Acta*, **76** (1982), 1241 - 1242.
- Fry, A. J., Hong, S.S., *J. Org. Chem.*, **46** (1981), 1962 - 1964.
- Luche, J.L., Damiano, J. C., *J. Am. Chem. Soc.*, **102** (1980), 7926 - 7927.
- Trost, B. M., Coppola, B. P., *J. Am. Chem. Soc.*, **104** (1982), 6879 - 6881.
- Souza-Barboza, J. C., Petrier, C., Luche, J. L., *J. Org. Chem.*, **28** (1988), 2013.
- Azuma, T., Yanagida, S., Sakurai, H., Yoshino, K., *Synth. Commun.*, **12** (1982), 137.
- Luche, J. L., Petrier, C., Dupuy, C., *Tetrahedron Letters*, **25** (1984), 753 - 756.
- Kitazume, T., Ishikawa, N., *Chem. Lett.* (1982), 137 - 140.
- Han, B. H., Boudjouk, P., *J. Org. Chem.*, **47** (1982), 5030 - 5032.
- Friedrich, E. C., Domek, J. M., Pong, R. Y., *J. Org. Chem.*, **50** (1985), 4640.
- Lindley, J., Mason, T. M., Lorimer, J. P., *Ultrasonics*, **25** (1987), 45.
- Yang, P., Liou, K., Lin, Y., *J. Organomet. Chem.*, **307** (1986), 273.
- Lindley, J., *Spec. Publ. - R. Soc. Chem.*, **116** (1992), 123-135.
- Ando, T., Kimura, T., *Advances in Sonochemistry*, J. A. I. Press, Vol. 2, pp. 211, 1992.
- Ranganathan, R., Mathur, I., Backshi, N. N., *Ind. Eng. Prod. Res. Develop.*, **12** (1973), 155.
- Luche, J. L., Allavena, C., Petrier, C., Dupuy, C., *Tetrahedron Letters*, **29** (1988), 5373.
- Delair, P., Luche, J. L., *J. Chem. Soc. Commun.* (1989), 398 - 399.
- Suslick, K. S., Choe, S.-B., Chichowlas, A. A., Grins-taif, M. W., *Nature*, **353** (1991), pp 414.
- Lindley, J., *Advances in Sonochemistry*, J. A. I. Press, Vol. 1, pp. 103, 1990.
- Lindley, J., Mason, T. M., Lorimer, J. P., *Ultrasonics*, **25** (1987), 45.
- Farooq, O., Farnia, M. F., Stephenson, M., Olah, G. A., *J. Org. Chem.*, **53** (1988), 2840.
- Berlan, J., Besace, J., Stephen, E., Cresson, P., *Tetrahedron Letters*, **26** (1985), 5765.
- Luche, J. L., Einhorn, C., Einhorn, J., *Tetrahedron Letters*, **29** (1990), 4125 - 4128.
- Luche, J. L., *Spec. Publ. - R. Soc. Chem.*, **116** (1992), 34 - 49.



#### Equipamento de Laboratório

Balanças - Centrífugas - Aparelhos de pH - Tituladores  
Condutoímetros - Agitadores - Espectrofotômetros  
Microscópios - etc.

#### Vidros e Plásticos de Laboratório

Distribuidores NORMAX

#### Material Didático

Ensino Secundário e Superior

Representantes exclusivos SISTEDUC - Sistemas Educativos S.A.

Rua Soeiro Pereira Gomes, 15 r/c Frente

Bom Sucesso - 2615 Alverca

Telefs. (01) 957 04 20/1/2 - Fax (351-1-957 04 23) - Portugal