

# Ultrasonido inducido por láser en escalas mesoscópicas: Visión desde la mecánica de medios continuos de Cosserat y la teoría de brechas de momentum

Jorge Enrique Alba-Rosales, Yanier Ojeda-Morales,  
Geminiano Donaciano Martínez-Ponce

Centro de Investigaciones en Óptica,  
Guanajuato,  
México

[geminis@cio.mx](mailto:geminis@cio.mx)

**Resumen.** En este trabajo se plantean las dificultades de realizar medidas en espacios menores al milímetro empleando al ultrasonido inducido por láser o técnica fotoacústica, cabe destacar la medición de ondas de cizalla (transversales) en agua, generadas a partir de un bloque de aluminio. A la par se discuten dos posibles teorías físicas para explicar a las ondas transversales en el líquido: La teoría de medios continuos de Cosserat (micropolar) y la teoría de brechas de momentum (K-gap). Finalmente se muestran resultados preliminares de la medición del tiempo de decaimiento de la onda transversal y como puede emplearse en la caracterización de las propiedades viscoelásticas del sistema.

**Palabras Clave:** Fotoacústica, mecánica micropolar, k-gap, líquidos confinados.

## Laser-Induced Ultrasound on Mesoscopic Scales: View from Cosserat Continuum Mechanics and Momentum Gap Theory

**Abstract.** In this work, the difficulties of carrying out measurements in spaces smaller than a millimeter using laser-induced ultrasound or photoacoustic technique are raised. It is worth highlighting the measurement of shear waves (transverse) in water, generated from a block of aluminum. At the same time, two possible physical theories are discussed to explain transverse waves in the liquid: Cosserat's theory of continuous media (micropolar) and the theory of momentum gaps (K-gap). Finally, preliminary results of the measurement of the shear wave decay time are shown and how it can be used in the characterization of the viscoelastic properties of the system.

**Keywords:** Photoacoustics, micropolar mechanics, k-gap, confined liquids.

## 1. Introducción

Actualmente el efecto fotoacústico (PA) o ultrasonido inducido por láser (USIL), destaca notablemente por sus diversas aplicaciones, principalmente la reconstrucción de imágenes con fines de diagnóstico médico y la caracterización de tejidos [1]. El efecto PA o USIL consisten en la deposición de radiación modulada o pulsada en algún material o medio capaz de absorberla, posteriormente, parte de la energía absorbida se emite en forma de ondas mecánicas por el mismo absorbedor.

Las frecuencias típicas emitidas de estos modos vibracionales o fonones se encuentran en el rango del ultrasonido (US), por lo que es relativamente sencillo detectarlas con ayuda de transductores de características adecuadas. Es por esta versatilidad que el USIL ha tenido un enorme desarrollo tecnológico en los últimos años, además de ser útil en diversos tipos de usos y aplicaciones.

Por otro lado, la tendencia tecnológica ha llevado a miniaturizar los dispositivos y experimentos propios de la técnica PA, buscando mayor resolución y portabilidad [2]. Estas exigencias tecnológicas implican la necesidad de medir y caracterizar al US en escalas micrométricas menores al milímetro. Es bien conocido en la literatura que las leyes y descripciones físicas se complican de forma considerable a estas escalas, debido a que se empieza a manifestar parcialmente la naturaleza discreta de la materia: Demasiado pequeño para describirse con teorías clásicas, pero demasiado grande para abordarlo desde las teorías cuánticas.

Es aquí donde surge la necesidad de emplear teorías mecánico estadísticas o que puedan incorporar de una forma efectiva las estructuras de carácter micrométrico del fenómeno, bajo la exigencia que en los límites de la teoría concuerden con las descripciones físicas ya conocidas y describan adecuadamente los fenómenos estudiados.

El principal objetivo de este trabajo es justificar la medición de ondas transversales o de cizalla en agua, empleando al efecto PA o USIL en una placa de aluminio, utilizando un láser pulsado de ns. Se destaca que de acuerdo a la literatura clásica [3] los fluidos son incapaces de soportar y transmitir este tipo de onda. Por esta razón es necesario considerar descripciones alternativas, así como nuevas analogías que justifiquen adecuadamente las mediciones obtenidas.

El resto del manuscrito se estructura de la siguiente manera: En la sección 2 se discute el aparato experimental para lograr inducir y sensar las ondas de cizalla en el líquido. En la sección 3 se discuten los trabajos previos de Ruocco [4] y Noirez [5], en donde se demuestra que los líquidos (particularmente agua) es posible la inducción, propagación y detección de ondas transversales.

En la sección 4 se describe de forma general dos teorías de carácter mesoscópico<sup>1</sup> capaces de describir a nivel teórico los resultados aquí reportados, estas son la teoría de medios continuos micropolares (mecánica de Cosserat) [6] y la teoría de brechas de momentum (K-gap) [7]. Ambas teorías predicen un aumento en la velocidad de propagación de la onda longitudinal, así como efectos disipativos sobre la ondas transversal.

En sección 5 se discuten e interpretan los resultados obtenidos, la relación que guardan con la caracterización viscoelástica del sistema, así como las implicaciones de los mismos en las metodologías que emplean al USIL como técnica de caracterización

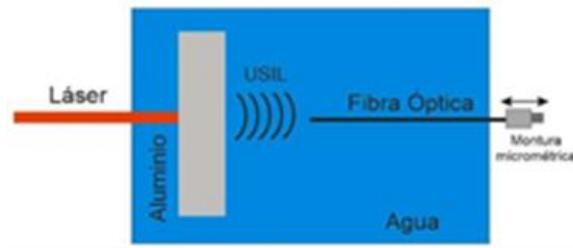


Fig. 1. Arreglo experimental.

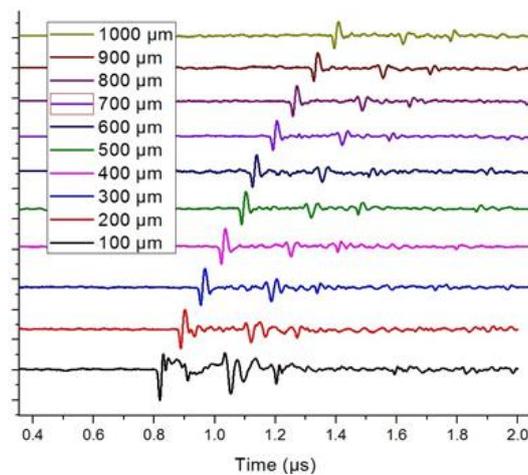


Fig. 2. Señales PA obtenidas con el arreglo experimental.

de materiales en escalas mesoscópicas. Finalmente, en la sección 6 se muestran las conclusiones y perspectivas de este trabajo.

## 2. Aparato experimental

Para lograr el USIL se empleó<sup>1</sup> un oscilador óptico paramétrico, bombeado por un láser de Nd: YAG de 10 ns de pulso y frecuencia de repetición de 10 Hz, sintonizado en 670 nm de longitud de onda. Empleando un objetivo de microscopio de 20X se enfocó la radiación a un spot de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro. La energía por pulso depositada en la muestra se estima en menos de 50  $\mu\text{J}$ . La iluminación láser se hace incidir sobre un bloque de aluminio de 1.28 mm de espesor que está completamente sumergido en agua. La detección del US se hace mediante un sensor de fibra óptica con un interferómetro tipo Fabry-Perot en su punta.

<sup>1</sup> Se debe aclarar que no existe un consenso unificado en la literatura de lo que corresponde a una mesoescala. El término mesoescala hace referencia a condiciones tales donde teorías clásicas son insuficientes para lograr la descripción del fenómeno, teniendo que acudir a correcciones heurísticas, descripciones no locales y a tratamientos propios de la física estadística

Esta fibra se conecta a un sistema de interrogación óptica que es capaz de convertir las variaciones del patrón de interferencia (modificado por el USIL) en señal eléctrica que es adquirida por un osciloscopio a una velocidad de 5 Gs/s.

El sensor de fibra se sujetó a una montura de desplazamiento micrométrica para obtener las señales PA a distintas distancias de propagación, cada 100  $\mu\text{m}$  hasta alcanzar 1 mm de separación. El esquema del arreglo experimental se muestra en la figura 1. Las señales adquiridas a distintas distancias se muestran en la figura 2. De la gráfica se puede observar la buena concordancia en los tiempos de vuelo de la presión PA en el agua, así como las posiciones relativas de los picos de la señal PA.

Para la interpretación del USIL aquí reportado, se distinguen tres picos en cada señal obtenida: Para la señal medida a 100  $\mu\text{m}$  de distancia, se puede observar un pico angosto, justo después de 0.8  $\mu\text{s}$ , este corresponde a la componente o modo longitudinal del US; posterior a la marca de 1  $\mu\text{s}$ , se observa la componente de cizalla o modo transversal de la onda; a los 1.2 ns, finalmente se observa el primer rebote de US que ocurre dentro de la placa de aluminio. En la siguiente sección se explican detalladamente los posibles mecanismos físicos que permiten la propagación de la onda transversal en el agua.

### **3. Comportamiento viscoelástico del agua**

Antes de iniciar esta discusión, es importante recalcar que en la literatura existen dos tipos que discuten el tema. Los del primer tipo (y más difundidos) consisten en textos introductorios e incluso avanzados sobre la física de fluidos, donde el punto de partida para definir al fluido es su incapacidad de mantener una forma definida; y como consecuencia, la imposibilidad de transmitir ondas transversales en el mismo.

Por otro lado, se encuentran algunas poco conocidas monografías, así como artículos de investigación especializados, donde se discute el comportamiento de líquidos en escalas micro y/o mesoscópicas, en donde un líquido logra mantener una configuración de sus elementos fija y, por lo tanto, en escalas espaciotemporales específicas, muestra comportamientos típicos de un sólido. Es en la segunda categoría donde versa la discusión de los resultados aquí expuestos.

Cómo se relata en la antología de Ruocco y Sette [4], el comportamiento sólido de líquidos como el agua, fue predicho desde 1974 por medio de simulaciones de dinámica molecular, y verificado experimentalmente en experimentos de dispersión de neutrones y rayos x entre las décadas de los años 70 y 80.

Este efecto es solo observable en escalas de tiempo del orden de PS, las cuales corresponden al tiempo de difusión de las moléculas de agua entre sí mismas. Este fenómeno es conocido como “velocidad rápida del agua” la cual alcanza valores de 3300 m/s en su componente longitudinal, debido a la breve aparición del modo transversal. Se remarca la necesidad del uso de altas frecuencias en la técnica experimental para observar el comportamiento previamente discutido.

Por otro lado, en la década pasada, se encuentra el resultado de Noirez y Baroni [5], en donde logran propagar una onda transversal en agua confinada entre dos superficies de aluminio, separadas una distancia de 125  $\mu\text{m}$ . Lo que más destaca de este trabajo es que la onda se induce con un reómetro convencional usando frecuencias menores a 1 Hz de repetición, logrando un resultado no esperado; para ese momento, ya era bien

aceptado el comportamiento sólido de líquidos para altas frecuencias, pero en el caso de bajas frecuencias.

Posteriormente en 2020, Zaccone y Trachenko [6] lograrían demostrar teóricamente, que el mecanismo subyacente en la propagación de las ondas transversales con frecuencias menores a 1 Hz radica en el confinamiento del líquido: La interacción del líquido con las superficies en contacto suprime los modos difusivos del fluido o desplazamientos no afines, responsables del mecanismo de viscosidad, ello permite observar los modos transversales que puede soportar el fluido.

Se destaca que este mecanismo de confinamiento se encuentra en buena concordancia con lo que se conoce como agua acotada/confinada [7], haciendo referencia al cambio de las propiedades mecánicas y termodinámicas del fluido al encontrarse muy próximo o en contacto con la superficie. Particularmente este comportamiento queda bien justificado para el aluminio por su conocida hidrofobicidad, de donde es conocida la interacción líquido-superficie que permite fijar y maximizar el contacto entre las interfaces.

A continuación se discuten brevemente dos aparatos teóricos capaces de capturar los aspectos mesoscópicos de este tipo de sistemas donde, ambos predicen modificaciones en la velocidad de propagación del modo longitudinal, análoga al fenómeno previamente reportado en el trabajo de Ruocco y Sette [4].

## **4. Descripción mesoscópica de propagación de ondas**

Se debe aclarar que en esta sección no se pretende abordar una exposición exhaustiva y completa de estas teorías; en lugar de ello se busca presentar los conceptos físicos centrales en las mismas y justificar su uso en la descripción de fenómenos mesoscópicos de propagación de ondas.

### **4.1. Teoría micropolar de medios continuos**

Propuesta originalmente por los hermanos Cosserat en 1909 y desarrollada formalmente por A. C. Eringen y colaboradores [8]. consiste en dotar de grados de libertad adicionales al elemento diferencial con el cual se construye la teoría. Particularmente en la teoría micropolar se asocia un vector de orientación o micro rotación a cada uno de los elementos que conforman al medio continuo.

Esto tiene como principal consecuencia la aparición de constantes adicionales que caracterizan las propiedades de micro rotación del sistema, así como la aparición de ondas adicionales a la longitudinal y transversal. Las velocidades de propagación vienen dadas por [9]:

$$C_L = (\lambda + 2\mu/\rho)^{1/2}, \quad (1)$$

$$C_T = (\mu/\rho)^{1/2}, \quad (2)$$

$$C_{\mu 1} = (k/j)^{1/2}, \quad (3)$$

$$C_{\mu 2} = (\alpha + \beta/j)^{1/2}, \quad (4)$$

$$C_{\mu 3} = (k/j)^{1/2} \quad (5)$$

donde  $C_L$  y  $C_T$ , corresponden a las ondas longitudinal y transversal, respectivamente, que se observan en sólidos; por otro lado,  $C_{\mu 1}$ ,  $C_{\mu 2}$  y  $C_{\mu 3}$  son las ondas de carácter microscópico adicionales. Los constantes  $\rho$  y  $j$ , hacen referencia a las propiedades de densidad y micro inercia,  $\mu$  y  $\lambda$  corresponden a los parámetros clásicos de Lamé, finalmente,  $k$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  caracterizan las propiedades microrotacionales del sistema.

El carácter más importante de las teorías micropolares se encuentra en su capacidad para capturar las configuraciones mesoscópicas del material, escala donde aún se puede utilizar es concepto de continuidad, pero donde simultáneamente se puede distinguir a las propiedades de los componentes.

Esta teoría cobra aún más relevancia cuando se buscan describir materiales compuestos o de estructura compleja como son materiales porosos (e.g., huesos), suspensiones como sangre, cristales líquidos y en general materiales compuestos con geometrías complicadas. Si bien la teoría puede ser matemáticamente compleja, es capaz de abordar descripciones de carácter más realista.

Aclaremos que, para los resultados experimentales aquí expuestos, este tipo de teorías no resulta el candidato más adecuado; sin embargo, no se debe de perder de vista en las futuras investigaciones para el uso del USIL mesoscópico en la caracterización de tejidos biológicos. Para cerrar la discusión de este tema, se resalta la existencia varios puntos en común en la literatura, donde las teorías micropolares pueden describir de forma efectiva materiales o propagación de ondas no convencionales a nivel ingenieril.

## 4.2. Teoría de brechas de momentum

El origen de esta teoría se encuentra en las ideas de J. Frenkel [10], quien propuso abordar el estudio de líquidos extendiendo algunos conceptos empleados en la descripción de sólidos. Para entender profundamente a este conjunto de teorías basta preguntarse: En el nivel más fundamental ¿Qué es lo que distingue a un líquido de un sólido? Como ya se mencionó en la parte introductoria, en la literatura clásica se enfatiza que el sólido tiene la capacidad de retener su forma mientras que el fluido no; la consecuencia de esta propiedad es la capacidad de transmitir ondas transversales en los materiales sólidos, mientras que los líquidos adolecen de ellas.

Para no caer en esta típica respuesta, Frenkel consideró el caso de una transición de fase tratando de plantear en qué momento sólidos y líquidos compartían sus propiedades cualitativas. En particular aquí presentamos su idea de la extensión del concepto de cizalla a un líquido molecular, como se muestra en la figura 3.

En la Figura 3 se muestran dos esquemas de configuración de sus moléculas conformantes particular que podrían tener un fluido a un tiempo  $t = 0$  y a un tiempo posterior  $t = \tau$ . De acuerdo con Frenkel, durante un tiempo específico los fluidos tienden a mantener una configuración fija determinada, posteriormente, las moléculas y los espacios entre ellas se difundirán en el sistema hasta alcanzar una configuración que no tenga correlación alguna con las posiciones iniciales. Es durante este tiempo  $\tau$  que los elementos conformantes del líquido pueden ser tratados como la red amorfa de moléculas o átomos que forman un sólido; por lo tanto, es durante este periodo que el líquido es capaz de propagar y transmitir ondas transversales.

A este parámetro de caracterización se le conoce como tiempo de relajación del material, el cual fue propuesto por primera vez por J. C. Maxwell para la caracterización de materiales viscoelásticos. De forma reciente, estos conceptos han sido retomados y

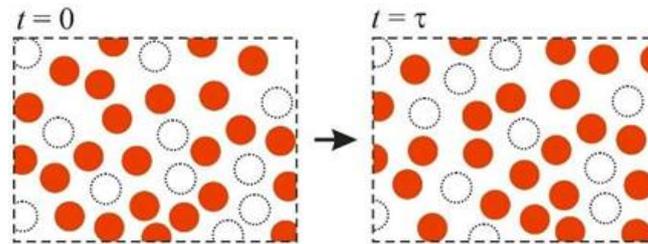


Fig. 3. Señales PA obtenidas con el arreglo experimental.

profundizados por M. Baggioli, A. Zaccone y colaboradores [11-13] para construir teorías generalizadas que son capaces de describir la propagación de modos transversales una gran cantidad de sistemas físicos.

El modelo parte de tratar por igual a las contribuciones elásticas y viscosas del material en donde la primera contribución se obtiene de la información de interacción de las moléculas desde sus posiciones de equilibrio y la segunda del tiempo de relajación  $\tau$  que hace referencia a las características de difusión de los átomos y/o moléculas que forman al líquido.

Particularmente se les llama teorías de brechas de momentum, debido a que las relaciones de dispersión obtenidas exhiben una brecha (gap) indicando que la propagación de la onda solo es posible a números de onda mayores o iguales a un valor umbral del partida, esto se interpreta fácilmente como la transmisión de un momentum mínimo para que el efecto ocurra.

Lo anterior se demuestra y discute con mucho detalle en la sección 2 de la referencia [11]. También se señala que la teoría de medios micropolares cuenta con relaciones de dispersión que exhiben brechas similares en el número de onda y la frecuencia. En este sentido es que no las consideramos ajenas a la descripción previamente discutida, sino como otra perspectiva del mismo problema, la descripción de sistemas mesoscópicos.

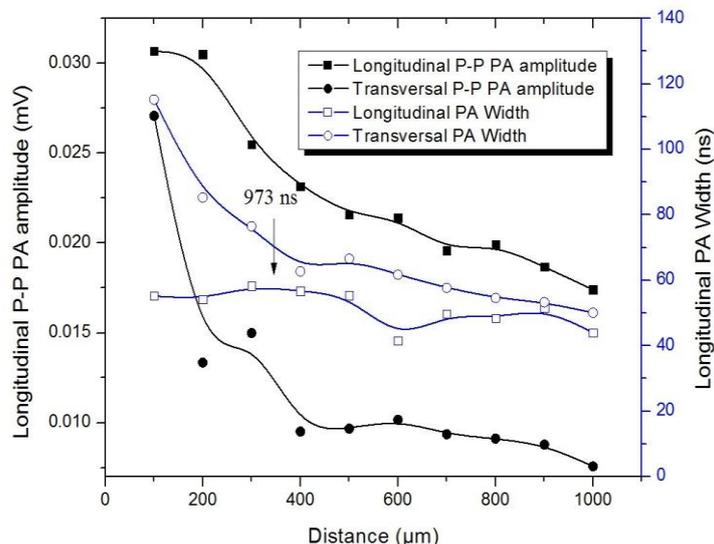
En la siguiente sección, conjuntamos todos los argumentos aquí esgrimidos para fundamentar el comportamiento experimental aquí reportado: La propagación de una onda de cizalla en agua, la cual solo logra propagarse una distancia y tiempo definidos.

## 5. Resultados y discusión

Para una mejor discusión de la figura 2, se presenta un resumen de la misma en la figura 4.

Se define como amplitud pico a pico de la señal PA a la distancia en voltaje que hay desde el mínimo de la señal hasta el máximo; por otra parte, se define al ancho PA como el intervalo de tiempo donde aparece el modo de propagación. Ambas definiciones se aplican tanto a la componente longitudinal como a la transversal del US. Ambos parámetros son graficados en función de la distancia de medición del sensor de fibra en la Figura 4.

De esta última figura, se identifica un decaimiento monótono, casi lineal en la amplitud pico a pico de la señal longitudinal, esto es de esperarse ya que la onda debe atenuarse por efecto de su distancia de propagación; en cambio, para la componente



**Fig. 4.** Comportamiento de la amplitud pico a pico de la señal PA y su ancho medio en función de la distancia de detección de la onda. Se muestran los resultados para ambos modos.

transversal, se observa una caída muy abrupta en los primeros 400 μm de distancia para posteriormente decaer de forma semejante a la componente longitudinal.

En lo que respecta al ancho temporal de los modos estudiados, para el longitudinal prácticamente se mantiene, mientras que para el transversal se adelgaza hasta casi alcanzar el ancho temporal correspondiente al modo longitudinal y seguir su misma tendencia.

El comportamiento resumido en la figura 4, coincide con la desaparición de la componente transversal, la cual solo es observable antes de los 400 μm de distancia en lo que respecta a la figura 2. Esto se puede interpretar justamente como el tiempo del fluido, el cual puede caracterizarse justamente con el tiempo de existencia de la onda PA transversal, el cual puede estimarse menor a 937 ns.

Este tiempo de existencia tan largo del modo transversal se justifica plenamente por las condiciones de confinamiento, discutidas del trabajo de Noirez [5] y en virtud de las frecuencias típicas del efecto PA que están en el rango de los MHz. Este tiempo de existencia, en la interpretación más simple de la teoría de brechas de momentum, corresponde a la razón que hay entre el módulo de cizalla y el coeficiente de viscosidad de difusión de las moléculas.

En el trabajo de Baggioli [13] se menciona que se debe ser cuidadosos con la interpretación directa de este tiempo de relajación, ya que en la práctica lo que se puede medires su valor promedio o de expectación, reflejando justamente un parámetro de características mesoscópicas. Finalmente, no se debe perder de vista que mientras exista un módulo de cizalla en el material, la velocidad de propagación del US deberá verse modificada de acuerdo a la Ec. (1) y a lo expuesto en la investigación de Ruocco y Sette [4].

## 6. Conclusiones y perspectivas

Se demuestra la existencia de ondas de cizalla en agua vía USIL o efecto PA, este modo de propagación solo logra subsistir un tiempo menor a 973 ns o equivalentemente una distancia menor a 400  $\mu\text{m}$ . Este fenómeno es posible gracias a las condiciones parciales de confinamiento en el experimento, así como al rango de frecuencias del USIL, logrando un fenómeno intermedio entre lo reportado por Ruocco y Noirez.

De las teorías discutidas en esta investigación consideramos más adecuada para describir a este fenómeno a la teoría de brechas de momentum ya que presenta de forma natural el concepto de tiempo de decaimiento, el cual es relacionado con la existencia del modo transversal.

La teoría de medios micropolares, aunque puede capturar los parámetros micrométricos de las muestras, aún requiere una conexión adicional para lograr convertir esta información en la correspondiente al proceso difusivo del material. Finalmente, la aparición de la onda transversal obliga a modificar la velocidad de propagación de la onda longitudinal; aspecto que también está contemplado en las investigaciones citadas en esta investigación.

La perspectiva inmediata es lograr mayor resolución en el tamaño de paso de la montura micrométrica, para caracterizar de mejor forma el tiempo de decaimiento de la onda transversal. Bajo el actual esquema no se cuenta con suficiente resolución para verificar las oscilaciones en la velocidad longitudinal de propagación.

## References

1. Xia, J., Yao, J., Wang, L. V.: Photoacoustic tomography: principles and advances. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 147, 1–22 (2014) doi:10.2528/PIER14032303
2. Gnyawali, V., Strohm, E. M., Tsai S. S. H., Kolios M. C.: Simultaneous ultrasound and photoacoustic based Flow cytometry. In: *Proceedings Conference Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing*, SPIE, vol. 10494, pp. 32–37 (2018)
3. Landau, L. D., Lifshitz, E.: *Fluid mechanics. Course of Theoretical Physics*, vol. 6 (2013)
4. Ruocco, G., Sette, F.: The history of the “fast sound” in liquid water. *Condensed Matter Physics*, vol. 11, no. 1, pp. 29–46 (2008)
5. Noirez, L., Baroni, P.: Identification of a low-frequency elastic behavior in liquid water. *Journal Physics: Condensed Matter*, vol. 24, pp. 372101 (2012) doi: 10.1088/0953-8984/24/37/372101
6. Zaccone, A., Trachenko, K.: Explaining the low-frequency shear elasticity of confined liquids. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 33, pp.19653–19655 (2020) doi: 10.1073/pnas.2010787117
7. Nimtz, G., Weiss, W.: Relaxation time and viscosity of water near hydrophilic surfaces. *Z. Physik B - Condensed Matter*, vol. 67, pp. 483–487 (1987) doi: 10.1007/BF01304117
8. Eringen, C.: *Microcontinuum Field Theories: I. Foundations and Solids: Foundations and Solids*, vol. 1 (1999)
9. Frenkel, F.: Kinetic theory of liquids. *Science*, vol. 106, pp. 174 (1946) doi: 10.1126/science.106.2747.174.b
10. Baggioli, M., Vasin, M., Brazhkin, V., Trachenko, K.: Gapped momentum states. *Physics Reports*, vol. 865, pp. 1–44 (2020) doi: 10.1016/j.physrep.2020.04.002
11. Dupourqué, S., Tibaldo, L., von Ballmoos, P.: Constraints on the antistar fraction in the Solar System neighborhood from the 10-year Fermi Large Area Telescope gamma-ray source catalog. *Physical Review D*, vol. 103, no. 8, pp. 086001 (2021)

*Jorge Enrique Alba-Rosales, Yanier Ojeda-Morales, Geminiano Donaciano Martínez-Ponce*

12. Baggioli, M., Landry, M., Zaccone, A.: Deformations, relaxation, and broken symmetries in liquids, solids, and glasses: A unified topological field theory. *Physical Review E.*, vol. 105, no. 1-2, pp. 024602 (2022) doi: 10.1103/PhysRevE.105.024602