



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS DE DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

DEVELOPMENT OF ULTRASONIC SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY FOR RHEOLOGICAL PROPERTIES ASSESSMENT

Autor: Eliana Budelli

Tutores:
Dra. Patricia Lema
Dr. Carlos Negreira

Montevideo, Uruguay

Marzo, 2017

Título: Development of ultrasonic shear wave elastography for rheological properties assessment

Resumen : La elastografía por ondas de corte (Shear wave elastography) consiste escencialmente en dos etapas: Primero, una onda de corte es generada por una fuente externa controlada (ej. actuador mecánico o fuerza de radiación ultrasónica); luego los desplazamientos inducido son monitoreados y la elasticidad del medio se deduce de la propagación medida. Sin embargo, las técnicas de elastografía disponibles actualmente no es posible estimar la viscosidad del medio. En este contexto el objetivo de esta tesis tiene dos partes: primero desarrollar una herramienta capaz de determinar las propiedades viscoelásticas de un sólido blando, particularmente utilizando supersonic shear imaging (SSI), y luego aplicar esta herramienta a distintos problemas encontrados en la industria agroalimentaria y en medicina.

La primera etapa consistió en el uso de la técnica SSI para generar mapas de velocidad de propagación de ondas de corte en sólidos blandos isotrópicos. En este contexto, la técnica fue utilizada para monitorear el proceso de coagulación de leche. Los resultados obtenidos probaron la utilidad de la técnica para una aplicación agroalimentaria. En esta etapa, las limitantes de la técnica SSI para obtener una caracterización reológica completa fueron puestas en evidencia. Para obtener esta caracterización la velocidad de propagación de las ondas de corte y la absorción generada cuando atraviesan un medio deben ser evaluadas simultáneamente. Dadas las características de la técnica SSI, la absorción no puede ser cuantificada directamente debido a efectos de difracción.

La parte central de la tesis se enfoca en el estudio de las ventajas y limitantes de usar una aproximación cilíndrica para corregir los efectos de difracción. Este estudio fue abordado de forma experimental y mediante simulaciones numéricas. Los resultados obtenidos demostraron que la corrección cilíndrica es útil bajo ciertas restricciones. La aproximación cilíndrica asume una fuente lineal infinita, pero la naturaleza finita de la fuente limita la utilidad de la aproximación a la zona central de la fuente acústica. Luego de la validación de la corrección mapas de velocidad y atenuación fueron calgulados. Estoas mapas permitieron alcanzar una caracterización reológica completa del medio.

Luego de estudiada la validez de la corrección, tres aplicaciones de interés fueron estudiadas: el monitoreo de la coagulación de leche mediante mapas de módulos de almacenamiento y pérdida; el monitoreo de coagulación de sangre *in vitro*; la caracterización reológica de hígado *in vivo*. La segunda aplicación permitió monitorear el comportamiento de las propiedades reológicas de la sangre durante su coagulación *in vitro*, haciendo posible considerar la posibilidad de caracterizar coágulos *in vivo* en un futuro. La tercera aplicación permitió evaluar la utilidad del uso de la corrección para obtener medidas *in vivo.* Los primeros resultados fueron alentadores y futuros trabajos deberán centrarse en la relación entre las propiedades reológicas del hígado y diversas patologías.

Finalmente, la aplicación de la corrección cilíndrica para la caracterización de sólidos anisotrópicos (particularmente trabajando en el caso de isotropía transversa) fue estudiada. Los resultados obtenidos mostraron que para bajos grados de anisotropía la corrección cilíndrica otorga resultados útiles dentro de errores razonables. Se realizaron medidas de coeficientes de absorción en geles anisotrópicos y en carne.

Title: Development of ultrasonic shear wave elastography for rheological properties assessment

Abstract: Shear wave elastography consists essentially of two steps: first, a shear wave is generated by an external controlled source (eg mechanical actuator or ultrasonic radiation force); then the induced displacements are imaged and the tissue elasticity is deduced from the measured shear wave propagation. However, with the currently available elastographic techniques, a quantitative estimation of viscosity is not possible. In this context, the objective of this thesis is twofold: first, to develop a tool capable of estimating the viscoelastic properties of a soft solid, in particular by using supersonic shear imaging (SSI), and then to apply it to some problems encountered in medicine and the food industry.

The first stage consisted in using the SSI technique to generate shear wave velocity maps in soft, isotropic solid media. In this context, this technique was used to evaluate the milk coagulation process. The results obtained showed the utility of the technique for a new and interesting application for the food industry. During this stage, limitations of the SSI technique to obtain a complete rheological characterization of viscoelastic solids were demonstrated. To achieve this characterization, the velocity of the shear waves and the absorption generated when passing through the medium must be evaluated at the same time. Given the characteristics of the SSI technique, the absorption cannot be directly quantified due to diffraction.

The central part of the thesis focuses in the study of the advantages and limitations of using a cylindrical approximation to correct the diffraction effects. This study was carried out experimentally and through numerical simulations. The study showed that cylindrical correction is useful for estimating the attenuation caused by absorption under certain conditions. The cylindrical correction assumes a linear and infinite source, but the finite size of the source limits the utility of the correction to the center region of the acoustic push line. After determining the validity zone of the correction, velocity and attenuation maps were obtained. These maps allowed the complete rheological characterization of the studied media.

Once the correction was validated, three applications of interest were carried out to obtain rheological properties, one for the food industry and two for clinical medicine: a) monitoring the process of milk coagulation through storage and loss moduli maps b) following in vitro blood coagulation processes, c) rheological characterization experiments of the liver in vivo. The second study made it possible to monitor the behavior of the rheological properties of the blood during coagulation in vitro, thus making it possible to look forward to obtaining an in vivo characterization of the blood clots. The application in liver made it possible to evaluate the usefulness of this correction procedure for in vivo measurements. These first results are encouraging, future work should study the relation between the rheological properties of the liver and various pathologies.

Finally, the application of the cylindrical correction to characterize transversely isotropic soft solids was studied. Media with different degrees of anisotropy were analyzed through numerical simulations. The results obtained showed that for low levels of anisotropy the cylindrical correction proves useful within a reasonable error. For higher degrees of anisotropy the cylindrical correction leads to major errors in the estimation of the attenuation. Measurements of the absorption coefficients were performed in anisotropic gel phantoms and in beef samples with muscle tissue.