

Tesista: Lucas Colabella

Título al que aspira: Doctor en Ciencia de Materiales, UNMdP

Tema: “Diseño multiescala de estructuras porosas inspiradas en el hueso trabecular”

Director de tesis: Dr. Adrián Cisilino

Co-directora: Dra. Josefina Ballarre

Lugar de Trabajo: Facultad de Ingeniería, UNMdP

Fecha de Defensa: 16 de marzo de 2018

Jurados:

Dr. Alfredo Huespe (UNR-CONICET, IFIR)

Dr. Martín Idiart (UNLP-CONICET)

Dra. Silvia Ceré (CDS, CONICET – UNMdP, INTEMA)

Resumen

El hueso trabecular es un material altamente poroso, heterogéneo y anisotrópico que se puede encontrar en las epífisis de los huesos largos y en la estructura vertebral. La arquitectura jerárquica hace del hueso trabecular un excelente ejemplo de un material natural liviano que combina resistencia con dureza. Esta excepcional combinación de propiedades hace interesante el uso del hueso para el diseño de materiales bioinspirados, que son el punto de partida para el diseño de estructuras que sean livianas y resistentes. Además, una mejor comprensión de la mecánica del hueso trabecular es de interés para el diagnóstico de enfermedades óseas, la evaluación del riesgo de fractura y para el diseño de huesos y andamios óseos para la ingeniería de tejidos. En este contexto, es el objetivo de este trabajo desarrollar e implementar una herramienta computacional para el diseño multiescala de sólidos porosos con microarquitecturas inspiradas en la del hueso trabecular para uso general y en aplicaciones de bioingeniería.

La tesis comienza con la caracterización del comportamiento elástico del hueso trabecular, para lo que se implementa una herramienta de homogenización computacional basada en el método numérico iterativo de la transformada rápida de Fourier (FFT) propuesto por Moulinec y Suquet. No existen antecedentes sobre la utilización del método de FFT a la mecánica ósea, por lo que en este trabajo se realizan aportes originales.

La microestructura biomimética parametrizada introducida por Kowalczyk es la utilizada en este trabajo, para la que se desarrolla un esquema de optimización que determina la microestructura que mejor reproduzca las simetrías elásticas de una muestra de hueso natural objetivo. Cuando se analizan los tensores de elasticidad de las muestras naturales y sus correspondientes artificiales se puede ver que las microestructuras artificiales son en general

más rígidas, por lo que la microestructura parametrizada debe tener, en promedio, la mitad de la rigidez de la muestra natural objetivo.

Las microestructuras naturales y sus equivalentes artificiales fueron comparadas en términos de su comportamiento ultrasónico a través de modelos computacionales de transmisión. Estos modelos reproducen las condiciones de ensayos de ultrasonido cualitativo (QUS) y permiten determinar la velocidad de propagación del sonido (SOS). Este estudio se realiza para 23 muestras de hueso trabecular, encontrándose una discrepancia promedio del 15%.

Finalmente, se desarrolla una herramienta de optimización multiescala para maximizar la rigidez de cuerpos elásticos con microestructuras biomiméticas parametrizadas. La implementación combina un modelo de elementos finitos que evalúa la rigidez del cuerpo en la macroescala con un algoritmo de optimización de punto interior para determinar los valores locales óptimos de las variables de diseño. La herramienta de optimización es utilizada para la resolución de una serie de problemas. En primer lugar, se demuestra la efectividad de la herramienta mediante la solución de cuatro problemas de evaluación cuyos resultados se comparan con soluciones de referencia obtenidas empleando optimización topológica. Los resultados de optimización multiescala son coherentes con las soluciones de optimización topológica de referencia, produciendo, en todos los casos, diseños más eficientes. Luego, se explora la capacidad de la herramienta para reproducir la microestructura de un fémur proximal sometido a cargas fisiológicas normales. El modelo predice exitosamente las principales características de la disposición espacial de las microestructuras trabeculares y corticales en el fémur.

Abstract

Cancellous bone is a highly porous, heterogeneous, and anisotropic material which can be found at the epiphyses of long bones and in the vertebral bodies. The hierarchical architecture makes of cancellous bone a prime example of a lightweight natural material that combines strength with toughness. This exceptional combination of properties arouses the interest to use bone as a basis for the design of bioinspired materials, which offer a path towards solving the challenge of designing structures that are both light and strong. Furthermore, to better understand the mechanics of cancellous bone is of interest for the diagnosis of bone diseases, the evaluation of the risk of fracture, and for the design of artificial bones and bone scaffolds for tissue engineering. Within this context, it is the objective of this work to develop and implement computational tools for the multi-scale design of porous solids with microarchitectures inspired by trabecular bone for general purpose and in bioengineering applications.

This thesis begins with the multi-scale characterization of the elastic behavior of trabecular bone. For this purpose, a computational homogenization tool based on the Fast Fourier Transform (FFT) method by Moulinec and Suquet is implemented. This is a nouvelle application of the FFT method to bone mechanics, so original contributions are made in the field of computational mechanics.

The parameterized artificial trabecular microstructure by Kowalczyk is studied in detail, and its ability to mimic the anisotropic elastic response of natural cancellous bone is shown. An original optimization scheme based in the elastic-tensor symmetries is developed to obtain the artificial microstructure that better mimics the elastic response of a target natural bone specimen. A study made on 146 natural cancellous bone samples resulted in artificial microstructures whose elastic tensors have symmetries that differ, in average, 6% with respect to those of the natural samples. It is found that mimetic microstructures are more efficient in terms of stiffness per mass unit, being them around twice stiffer than natural bone. A strategy based on the scaling of the material rigidity is proposed to compensate the microstructure stiffness deviation.

The natural and artificial microstructures are compared in terms of their ultrasonic behaviors through the computational simulation of ultrasound transmission tests. A study conducted on 23 natural bone samples resulted in an average difference of 15% between the speed of sound of the natural and the mimetic microstructures.

Finally, a new multiscale optimization method is developed to maximize the rigidity of elastic bodies with parameterized biomimetic microstructures. The implementation combines a finite element model to evaluate the stiffness of the body at the macroscale with an internal point optimization algorithm to determine the optimal values of the artificial microstructure parameters and orientation over the body domain. The optimization method is shown for a series of problems. First, the effectiveness of the tool is demonstrated by solving four evaluation problems whose results are compared with reference solutions obtained through topological optimization. It is found that the multi-scale optimization produces, in all cases, more efficient designs. Secondly, the ability of the multi-scale optimization method to reproduce the microstructure of a bone is explored via the analysis of a proximal femur subjected to physiological loads. The model successfully predicts the main features of the spatial arrangement of femur trabecular and cortical microstructures.

A final chapter with a compendium of the results and conclusions and a proposal for future work closes the thesis.