

Metodología para el Modelado Tridimensional de los Ligamentos de la Articulación Coxofemoral

B. Pérez Aguilar^{1*}, S. Herrera Paz¹, A. Vidal Lesso¹, J. Bayod-López²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, Salamanca, México.

²Biomedical Research Networking center in Bioengineering, Biomaterials and Nanomedicine (CIBER-BBN).

Group of Applied Mechanics and Bioengineering (AMB), Aragon Institute of Engineering Research (i3A), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain.

*br.perezaguilar@gmail.com

Abstract—The aim of this research is to propose a methodology to model the main ligaments of the hip joint by using computational modeling software such as CATIA® V5. This methodology is divided into two main parts. The first one concerns the conception of the ligaments. The second one refers to the assembly of the ligaments within a computational model of the bones of the pelvis and the femur. Once the ligament models were generated following the proposed methodology, dimensional values were measured to later compare them with those reported in several experimental investigations. In this sense, the percentage of error obtained between these values (up to 8.5 %) is a way of quantitatively validating the generated models, and therefore ensure that the geometry of each ligament can be used for future research that seeks to simulate and analyze the behavior of the ligaments under different physiological conditions.

Palabras clave—Articulación, cadera, coxofemoral, ligamentos, modelado.

I. INTRODUCCIÓN

La articulación coxofemoral, comúnmente conocida como la cadera, asume la función de orientación y de soporte del miembro inferior. La estabilidad que caracteriza a esta articulación es resultado de la acción conjunta de tres ligamentos principales: pubofemoral, isquiofemoral e iliofemoral [1].

Al respecto, existen diferentes investigaciones experimentales que reportan las dimensiones de estos ligamentos en cadáveres humanos, utilizando diferentes métodos de medición [2 – 6]. Asimismo, diversos estudios proporcionan mediciones de la cápsula articular [7 – 8]. En estas investigaciones, la edad promedio de defunción de los pacientes es de 78 años, con 52 % de las caderas de hombres y 48 % de mujeres. Todos los cadáveres utilizados presentaron caderas sanas. Estas dimensiones son de utilidad para generar un modelo tridimensional de la articulación coxofemoral y su validación dimensional. Así, un modelo de esta naturaleza permite analizar el comportamiento de los ligamentos bajo diferentes condiciones fisiológicas.

Por este motivo, en el presente trabajo se propone una metodología para modelar los ligamentos de la cadera en CATIA® V5, con dimensiones equivalentes a las reportadas en el estado del arte. Estos modelos pueden ser utilizados en investigaciones relacionadas con el estudio estructural de la

articulación coxofemoral, así como el diseño de nuevas prótesis y su interacción con los ligamentos de la cadera.

II. METODOLOGÍA

A. Modelado de los ligamentos

La concepción de los tres ligamentos de la articulación coxofemoral se desglosa en ocho pasos principales, los cuales se describen en la Tabla 1. Al seguir estos pasos de manera secuencial, se logran obtener modelos tridimensionales de cada ligamento. Se puede observar una ejemplificación del modelado del ligamento pubofemoral en la Fig. 1. Es importante mencionar, que para el modelado se consideraron los cambios en la sección transversal, así como la variación angular de los perfiles, como se reporta en los estudios cadavéricos realizados por otros autores.

TABLA 1
METODOLOGÍA PARA REALIZAR EL MODELADO DE LOS LIGAMENTOS

Paso	Descripción
1	Creación de un archivo <i>part</i> en CATIA V5 para cada ligamento.
2	Generación de planos equidistantes en la dirección longitudinal.
3	Creación de croquis en cada uno de los planos, diseño de perfiles transversales y asignación de valores de espesor.
4	Unión y posicionamiento de perfiles transversales.
5	Creación de superficies: caras de las inserciones acetabular y femoral, caras exterior e interna, caras laterales.
6	Unión de todas las superficies para obtener un volumen cerrado.
7	Generación de cuerpo sólido a partir del volumen cerrado.
8	Hacer filetes para suavizar la transición entre áreas.

B. Ensamble de los ligamentos.

Se utiliza un modelo tridimensional de los huesos de la pelvis y el fémur, para que, junto con los tres ligamentos, se realice un ensamble completo de la articulación coxofemoral. Lo anterior se obtiene siguiendo cuatro pasos principales, los cuales se describen en la Tabla 2.

TABLA 2
METODOLOGÍA PARA REALIZAR EL ENSAMBLE DE LOS LIGAMENTOS CON EL MODELO PELVIS-FÉMUR

Paso	Descripción
1	Creación de un archivo <i>product</i> en CATIA V5.
2	Importar modelo pelvis-fémur junto con los tres ligamentos.
3	Posicionar y orientar los ligamentos dentro del ensamble.
4	Aplicar operaciones booleanas de remoción para realizar las inserciones acetabular y femoral de los ligamentos con el

modelo.

Además, la concepción del ligamento iliofemoral involucra un paso extra después de realizar las inserciones con los huesos de la pelvis y el fémur. Este paso consiste en la creación de un nuevo cuerpo, para que, con la ayuda de una operación booleana de remoción, se generen los dos brazos que caracterizan a este ligamento, véase la Fig. 2.

C. Mediciones de las dimensiones de los ligamentos.

Una vez insertados los ligamentos en el ensamble, se realizan las mediciones de los parámetros geométricos y dimensionales de los mismos, ya que la geometría final de cada ligamento depende de sus inserciones acetabular y femoral. La cantidad de mediciones reportadas en el estado del arte varía en cada ligamento y son usadas para la comparación con los modelos generados.

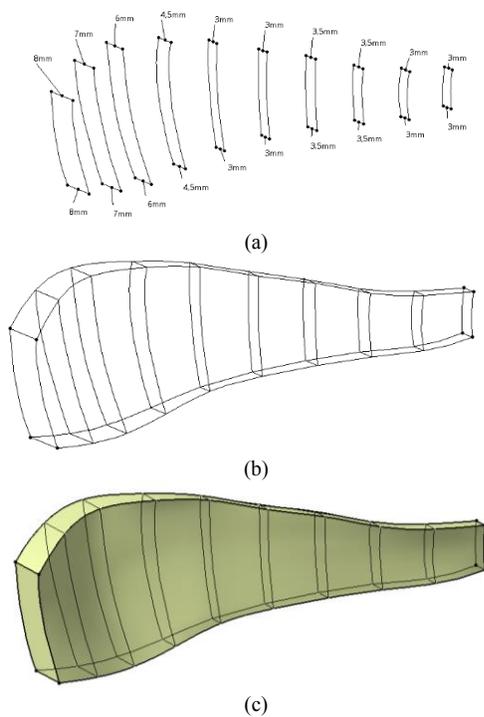


Fig. 1. Representación de la metodología para el modelado del ligamento pubofemoral. (a) Paso 3, (b) Paso 4 y (c) Paso 5 de la Tabla 1.

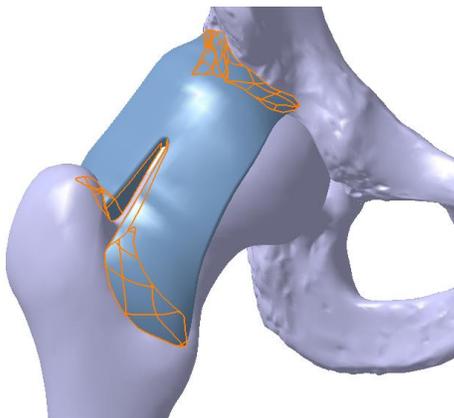


Fig. 2. Inserción acetabular, femoral y creación de los dos brazos del ligamento iliofemoral con el uso de operaciones booleanas de remoción.

III. RESULTADOS

A. Ensamble de la articulación coxofemoral.

Se puede visualizar el ensamble de los ligamentos con los huesos de la pelvis y el fémur en la Fig. 3.

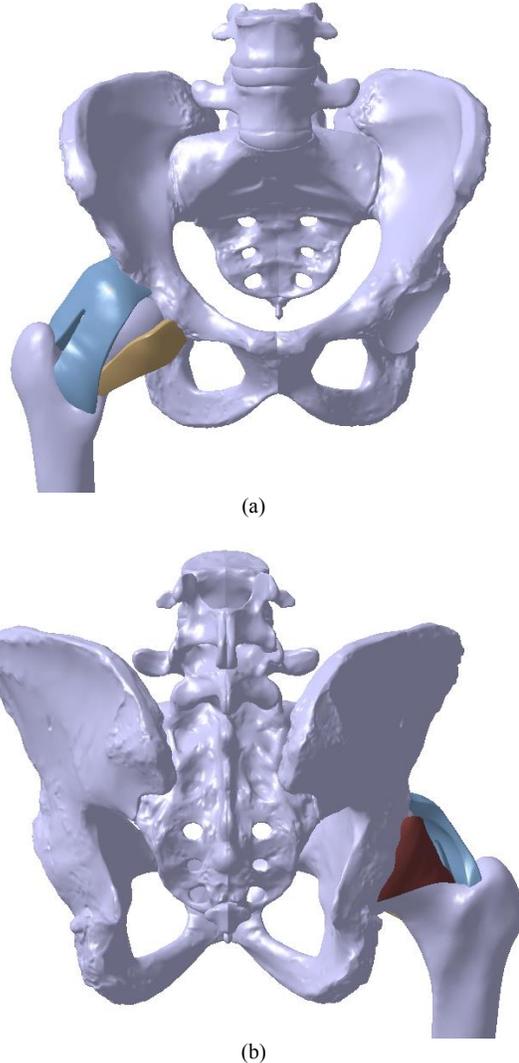


Fig. 3. Ensamble de los ligamentos pubofemoral (color café), isquiofemoral (color vino) e iliofemoral (color azul) con los huesos de la pelvis y el fémur de la pierna derecha. (a) Vista anterior y (b) Vista posterior.

B. Posición de los ligamentos en el acetábulo.

Es importante conocer la posición y el ángulo de extensión de las inserciones de los ligamentos en el acetábulo. Para ello, se utiliza un sistema de medición semejante a un reloj de 12 horas, tal como se propone en [5 – 6]. Este sistema se reprodujo en el ensamble, véase la Fig. 4.

Dicho esto, el ligamento pubofemoral se ubicó entre las 4:00 y las 5:30, mientras que el ángulo de extensión de la inserción acetabular es de 44° . Asimismo, el ligamento

isquiofemoral se ubicó entre las 8:45 y las 11:45, abarcando una distancia media de 90° . Además, el ligamento iliofemoral se ubicó desde las 12:45 hasta las 3:00, con una extensión media de 70° .

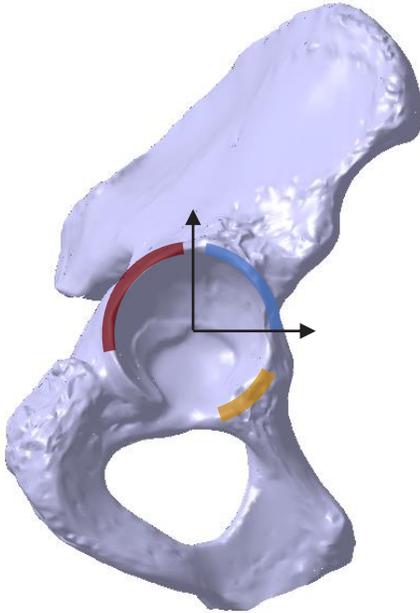


Fig. 4. Posición de los ligamentos en el acetábulo. Puede ver las huellas de inserción del ligamento pubofemoral (color café), ligamento isquiofemoral (color vino) y ligamento iliofemoral (color azul). La flecha vertical indica las 12:00 horas, la flecha horizontal indica las 3:00 horas.

C. Ligamento pubofemoral.

Durante la concepción, se asignaron valores de espesor de 2 mm en la región femoral, 3 mm en la región media y 8 mm en la región acetabular. Véase el modelo resultante en la Fig. 5.

Después de realizar las inserciones, se midió la longitud del ligamento, obteniendo un valor de 5.54 cm. Asimismo, el área media del ligamento es de 12.86 cm^2 , mientras que el área de la huella de inserción acetabular es de 1.47 cm^2 .



Fig. 5. Ligamento pubofemoral. Puede observarse la inserción acetabular (izquierda), femoral (derecha) y la cara interna (centro).

D. Ligamento isquiofemoral.

En el diseño del ligamento, se asignaron valores de espesor de 3mm en la región femoral, 2 mm en la región media y 10 mm en la región acetabular del ligamento. El modelo resultante se muestra en la Fig. 6. La longitud del ligamento, desde la inserción femoral hasta la inserción

acetabular, tiene un valor es de 4.42 cm. Asimismo, el área media es de 19.67 cm^2 , mientras que las áreas de las huellas de inserción acetabular y femoral son de 6.14 cm^2 y 1.26 cm^2 , respectivamente.

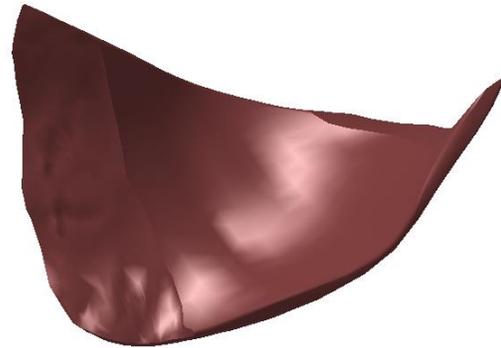


Fig. 6. Ligamento isquiofemoral. Puede observarse la inserción acetabular (izquierda), femoral (derecha) y la cara interna (centro).

E. Ligamento iliofemoral.

Se asignaron valores de espesor para cada uno de los dos brazos. En el brazo medio o inferior se tiene un espesor de 4 mm en la región femoral, 7 mm en la región media y 10 mm en la región acetabular. Asimismo, en el brazo lateral o superior se tiene un espesor de 10 mm en la región femoral, 4 mm en la región media y 10 mm en la región acetabular. El modelo resultante se muestra en la Fig. 7.

Por otro lado, se midió la longitud del ligamento, obteniendo valores de 7.64 cm y 5.36 cm para los brazos inferior y superior, respectivamente. Asimismo, la distancia de separación entre los brazos en la región de la inserción femoral es de 11.57 mm. Además, el área media del ligamento es de 35.46 cm^2 . El área de la huella de inserción acetabular es de 3.98 cm^2 . Las áreas de las huellas de inserción en la región femoral de los brazos inferior y superior son de 4.66 cm^2 y 3.11 cm^2 , respectivamente.

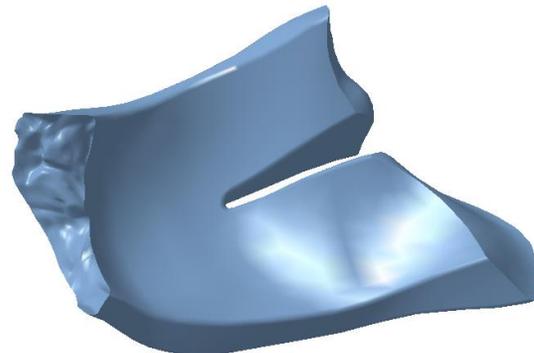


Fig. 7. Ligamento iliofemoral. Observe la inserción acetabular (izquierda), la inserción femoral del brazo superior (derecha, arriba), la inserción femoral del brazo inferior (derecha, abajo) y la cara interna del ligamento (centro).

IV. DISCUSIÓN

Es de especial interés realizar una comparativa entre las

mediciones dimensionales de los modelos computacionales y las mediciones reportadas en el estado del arte. En este sentido, la obtención de valores de porcentaje de error inferiores al 10% entre ambas mediciones, es una forma de validar la metodología propuesta.

En primer lugar, la longitud de los ligamentos de los modelos computacionales se comparó con los valores de especímenes cadavéricos reportados en [2]. Esta investigación muestra que el ligamento pubofemoral tiene una longitud de 5.96 cm, resultando en un porcentaje de error de 6.9% respecto al valor de 5.54 cm de nuestro modelo. De la misma forma, la longitud del modelo del ligamento isquiofemoral de 4.42 cm presenta un porcentaje de error de 1.4%, esto lo posiciona como el ligamento más corto de los tres. Asimismo, las longitudes de los brazos superior e inferior del ligamento iliofemoral presentan valores de porcentaje de error del 6.1% y 8%, respectivamente. Esto lo posiciona como el más largo de los tres. Por lo tanto, el error medio en la longitud de los modelos generados respecto las mediciones en cadáveres humanos es de 5.6 SD 2.9 %.

Aunado a esto, se reportan valores experimentales de las áreas medias de los ligamentos, así como las áreas de las huellas de inserción acetabular y femoral en [4]. El porcentaje de error de las mediciones del ligamento pubofemoral es de 1% para el área media y de 5.2% para el área de la inserción acetabular. Para el ligamento isquiofemoral, el área media y las áreas de las inserciones acetabular y femoral presentan valores de porcentaje de error de 6.9%, 3.9% y 5%, respectivamente. En cuanto al ligamento iliofemoral, el área media de 35.46 cm², la más grande de los tres ligamentos, tiene un porcentaje de error de 2.5%. Asimismo, el porcentaje de error del área de inserción acetabular es del 5%, mientras que el área de inserción femoral del brazo inferior de 4.66 cm², la más grande de los tres, presenta un porcentaje de error del 2.7%. En cuanto al otro brazo del ligamento, el porcentaje de error es del 0.4%. Así, el error medio en las áreas de inserción acetabular, femoral y media es de 3.62 SD 2.13 %.

Además, se comparan los ángulos de extensión de las inserciones acetabulares de los ligamentos con los valores reportados en las investigaciones experimentales en cadáveres humanos [5 – 6]. Para el ligamento pubofemoral, la medición del ángulo de extensión en el modelo computacional fue de 43.9°, lo que resulta en un porcentaje de variación de 4.7 % respecto al valor de [6]. En cuanto al ligamento isquiofemoral, el valor calculado en el modelo es de 90.3°, con un porcentaje de variación de 0.37 % respecto al valor de [6]. El ángulo de extensión del ligamento iliofemoral en el acetábulo tiene un porcentaje de error del 4.5%, el cual, a diferencia de los otros dos ligamentos, se asemeja más al valor reportado en [5]. De esta forma, el error medio en los ángulos de extensión de la inserción acetabular es de 3.19 SD 2.44 %.

V. CONCLUSIONES

Las mediciones de los modelos computacionales de los tres ligamentos de la cadera, comparadas con las mediciones experimentales en cadáveres reportadas en el estado del arte, presentan un porcentaje de error bajo para los fines de investigación que se puedan proyectar como trabajo futuro.

Esta es una forma cuantitativa de validar la metodología propuesta para construir los modelos de los ligamentos. El uso de un escáner tridimensional, no se descarta como opción para mejorar la resolución de la geometría de los modelos, sin embargo, el modelado basado en las mediciones experimentales cadavéricas reportadas, usando la metodología y validación propuesta, representa una alternativa como primera aproximación para el modelo de estos tejidos y su uso en análisis futuros por elemento finito.

Por otro lado, utilizar diferentes referencias para obtener los valores dimensionales de los ligamentos, resulta en un modelo computacional más robusto, ya que los valores reportados en las investigaciones surgen de distintos tipos de medición, lo cual, permite la validación de los modelos desarrollados.

Además, el ensamble generado permite visualizar y permitirá analizar y simular la geometría general de la articulación coxofemoral. Esto es de especial interés para futuras investigaciones, ya que la metodología empleada para la construcción de los ligamentos puede ser fácilmente reproducible, incluso si se desea modelar otros tejidos en las articulaciones del cuerpo humano.

RECONOCIMIENTO

El autor B. agradece a la Universidad de Guanajuato y a los asesores de este trabajo por su constante apoyo y acompañamiento.

REFERENCIAS

- [1] A. I. Kapandji, "La cadera" in *Fisiología Articular*. 6th ed. Madrid, Spain: Panamericana, 2006, ch. 1, pp. 2-64.
- [2] F. V. Wagner, J. R. Negrão, J. Campos, S. R. Ward, P. Haghighi, D. J. Trudell, D. Resnick. "Capsular ligaments of the hip: anatomic, histologic, and positional study in cadaveric specimens with MR arthrography", *Radiology*, vol. 263, no. 1, pp. 189-198, Apr, 2012, DOI: 10.1148/radiol.12111320.
- [3] Y. Tamaki, T. Goto, K. Wada, D. Hamada, Y. Tsuruo, K. Sairyo. "Anatomic evaluation of the insertional footprints of the iliofemoral and ischiofemoral ligaments: a cadaveric study", *BMC Musculoskeletal Disord*, vol. 21, no. 1, Dec, 2020, DOI: 10.1186/s12891-020-03848-4.
- [4] J. J. Telleria, D. P. Lindsey, N. J. Giori, M. R. Safran, "A quantitative assessment of the insertional footprints of the hip joint capsular ligaments and their spanning fibers for reconstruction", *Clin. Anat.*, vol. 27, no. 3, pp. 489-497, Apr, 2014, DOI: 10.1002/ca.22272.
- [5] J. J. Telleria, D. P. Lindsey, N. J. Giori, M. R. Safran, "An anatomic arthroscopic description of the hip capsular ligaments for the hip arthroscopist", *Arthroscopy*, vol. 17, no. 5, pp. 628-639, May, 2011, DOI: 10.1016/j.arthro.2011.01.007.
- [6] D. Nam, D. C. Osbahr, D. Choi, A. S. Ranawat, B. T. Kelly, S. H. Coleman, "Defining the origins of the iliofemoral, ischiofemoral, and pubofemoral ligaments of the hip capsuloligamentous complex utilizing computer navigation", *HSS J*, vol. 7, no. 3, pp. 239-243, Oct, 2011, DOI: 10.1007/s11420-011-9214-3.

- [7] J. Weidner, L. Büchler, M. Beck, "Hip capsule dimensions in patients with femoroacetabular impingement: a pilot study", *Clin Orthop Relat Res*, vol. 470, no. 12, pp. 3306 – 3312, Dec, 2012, DOI: 10.1007/s11999-012-2485-2.
- [8] M. J. Philippon, *et al.*, "A quantitative analysis of hip capsular thickness", *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, vol. 23, no. 9, pp. 2548-2553, Sep, 2015, DOI: 10.1007/s00167-014-3030-5.