

IMPLEMENTACIÓN DE LA ASIGNATURA “INTRODUCCIÓN A LA BIOMECÁNICA EN EL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.

Gabriela Martínez Bordes, Instituto de Diseño y Métodos Industriales, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, gabriela.martinez@uach.cl

Belkys Amador Cáceres, Instituto de Diseño y Métodos Industriales, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, belkys.amador@uach.cl

Javier Aros Taglioni, Escuela de Ingeniería Civil Mecánica y Programa de Maestría en Ingeniería Mecánica y Materiales, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, javier.aros@alumnos.uach.cl

RESUMEN

Se presenta la propuesta de implementación de la asignatura *Introducción a la Biomecánica* basada principalmente en aprendizaje basado en proyectos. Esta metodología ha sido modificada al proponer un proyecto por cada tópico de la disciplina en vez de proyecto único para toda la asignatura, con la característica particular de que existe relación entre los proyectos. Durante el inicio del curso se define para cada estudiante una sola articulación o elemento anatómico a estudiar y sobre el mismo se trabaja en cada tópico de la disciplina. La implementación de esta propuesta resultó positiva, logrando que todos los estudiantes finalizaran exitosamente. De la implementación puede evidenciarse la importancia de mantener una estricta distribución de los tiempos, de lo contrario se compromete el avance del curso.

PALABRAS CLAVES: Aprendizaje Basado en Proyectos, Biomecánica, Bioingeniería

INTRODUCCIÓN

Aprendizaje basado en problemas o proyectos (a partir de ahora PBL) es el aprendizaje que se produce como resultado del esfuerzo que realiza el alumno para resolver un problema o llevar a cabo un proyecto. Las estrategias de PBL se empezaron a aplicar a comienzos de los 70, desde entonces esta metodología ha ido ganando adeptos, y en la actualidad se considera especialmente adecuada para abordar muchos de los retos de la formación superior (Alcober et al, 2003). La Carrera de Ingeniería Civil Mecánica, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Austral de Chile, desde el año 2009 modificó su plan de estudio para adaptarlo a esta estrategia de aprendizaje (Escuela de ICM & DACIC, 2017). Aprovechando este conocimiento y en el marco de la readecuación de la malla curricular de la Maestría en Ingeniería Mecánica y Materiales, se propuso, aprobó e implementó la asignatura *Introducción a la Biomecánica*, basando su estrategia de enseñanza-aprendizaje fundamentalmente en una metodología de aprendizaje basado en proyectos. Su implementación ha sido modificada al proponer un proyecto por cada tópico de la disciplina, y no un proyecto único para toda la asignatura, con la característica particular de que existe relación entre los proyectos. Durante el inicio del curso, se define para cada estudiante una articulación o elemento anatómico a estudiar

y el mismo se mantiene en cada tópico de la disciplina. A continuación, se comparte la experiencia académica de la implementación de esta metodología aplicada a una asignatura de Bioingeniería integrada en la nueva malla de la Maestría en Ingeniería Mecánica y Materiales.

La biomecánica combina el campo de la ingeniería mecánica con los campos de biología y fisiología. Los principios de mecánica son aplicados a la concepción, diseño, desarrollo y análisis de equipos y sistemas en la biología y la medicina (Nordin, 1998 y Comín et al., 1999). Esta rama del conocimiento está insertada en un campo más amplio como lo es la Bioingeniería, que implica abordar, comprender y resolver problemas de gran complejidad relacionados con la biomedicina, combinando las herramientas disponibles en los campos de la ciencia experimental, la ciencia de la vida y la ingeniería en todas sus facetas (Griffith & Grodzinsky, 2001).

Para la implementación de la asignatura se seleccionaron cinco tópicos que generan un conocimiento fundamental de esta disciplina, a saber:

- Biomecánica de las articulaciones
- Propiedades mecánicas de los tejidos biológicos
- Reconstrucción de imágenes médicas
- Biomecánica del movimiento, técnicas para medición de análisis de marcha
- Biomecánica de la fractura y reparación

Biomecánica de las articulaciones hace referencia a una descripción del movimiento en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración contra el tiempo, sin ocuparse de las fuentes del movimiento, es decir las fuerzas que producen el movimiento.

El segundo tópico presentado, *propiedades mecánicas de los tejidos biológicos*, comprende la caracterización mecánica de diferentes tejidos para su posterior modelamiento numérico-computacional.

Actualmente, el estudio de la marcha humana es una herramienta diagnóstica importante en la evaluación de patologías neuro-musculoesqueléticas, ya sean transitorias o permanentes, locales o generales (Villa et al, 2008), conocer e interpretar *las técnicas de medición de análisis de marcha* es fundamental para el diseño de posteriores dispositivos médicos.

Una aplicación importante de la biomecánica está directamente relacionada con las alteraciones en las estructuras óseas. Estas alteraciones pueden llegar a producir discontinuidades (fracturas). El estudio de la *fractura y las técnicas de reparación* con las implicaciones mecánicas correspondientes es abordado en el último tópico del curso.

METODOLOGÍA

La propuesta en este curso es ambiciosa, pues se plantea una distribución casi equitativa de semanas en el tiempo para cada tópico o actividad. De esta forma, se distribuyeron los tópicos incluyendo el tiempo de trabajo autónomo por parte del estudiante. La Fig. 1 muestra esquemáticamente la propuesta.

Semana	Tópico o actividad
1	Tópico 1. Biomecánica de las articulaciones
2	
3	
4	Exposición y entrega de Tópico 1
5	Tópico 2. Propiedades mecánicas de los tejidos biológicos
6	
7	
8	Tópico 3. Reconstrucción de imágenes médicas
9	
10	
11	Tópico 4. Biomecánica del movimiento, técnicas para medición de análisis de marcha
12	
13	
14	Exposición y entrega de Tópico 4
15	Tópico 5. Biomecánica de la fractura y reparación
16	
17	

Figura N° 1. Distribución de los tópicos por semana.

A pesar de que cada proyecto es abordado individualmente por el estudiante y posteriormente presentado en el aula de clase, entre cada uno de los tópicos existe un lazo conductor que permite que el estudiante se familiarice con términos y conceptos que le permitirán adquirir las competencias deseadas. Es por esto por lo que, a cada estudiante, inicialmente, se le asigna un elemento anatómico. Los conocimientos que se adquieren en cada tópico son aplicados sobre este elemento anatómico. Así, si el elemento anatómico seleccionado es el hombro, al final del tópico uno el estudiante deberá presentar un modelo cinemático de la articulación del hombro bajo ciertas condiciones de carga (normales o patológicas) que estén reportadas para esta articulación. En lo correspondiente al tópico dos, el estudiante será capaz de identificar el modelo de comportamiento del tejido más adecuado para su posterior simulación. Esta metodología se repite para cada uno de los cinco tópicos.

A continuación, se muestra, por tópico, las estrategias de enseñanza-aprendizaje aplicadas.

Metodología de abordaje del tópico uno. Biomecánica de las articulaciones

El primer tópico de la asignatura se abordará en dos fases. Una primera fase de una semana de duración donde el académico introducirá el curso y expondrá conceptos de repaso de estática, cinemática, cinética, diagramas de cuerpo libre junto ejemplos de aplicación. En la segunda fase, cada estudiante seleccionará una articulación (ej. hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo, entre otras) y durante las siguientes dos semanas, a través de trabajo autónomo, seleccionará una condición de carga (debidamente sustentada por la literatura existente), generará el correspondiente diagrama de cuerpo libre y aplicará las ecuaciones de equilibrio estático para hallar las fuerzas reactivas correspondientes. Al finalizar este tiempo, cada estudiante entrega un breve manuscrito y realiza una exposición ante el curso. La Fig. 2 muestra el esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico uno.

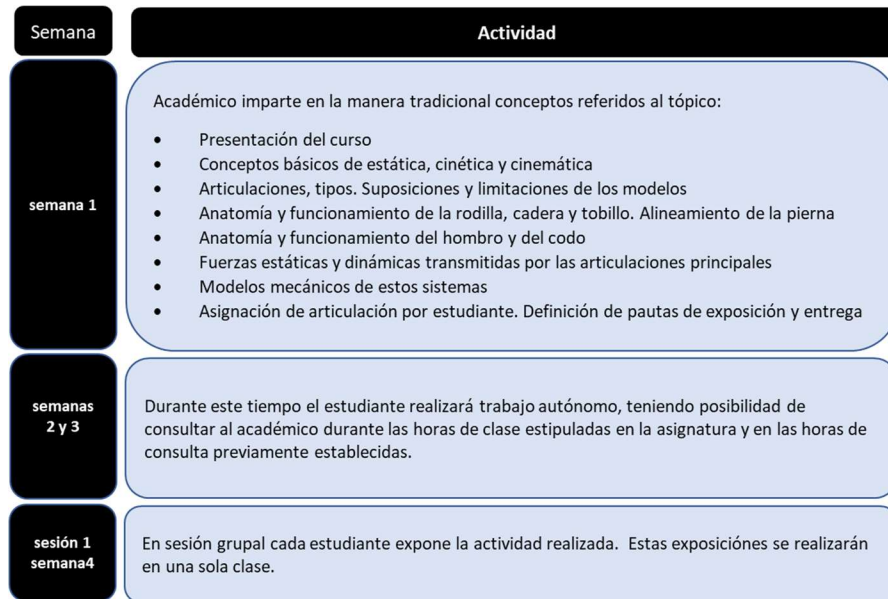


Figura N° 2. Esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico uno.

Metodología de abordaje del tópico dos. Propiedades mecánicas de los tejidos biológicos

Establecer las propiedades mecánicas de los elementos a analizar es fundamental en cualquier disciplina mecánica. Particularmente, en el área de la biomecánica es muy importante poder definir el modelo más adecuado en función del tejido a estudiar. Este tópico inicia en la segunda sesión de clases de la semana cuatro, y durante dos sesiones se abordarán tópicos referidos a tejidos óseo, muscular, tendinoso y cartilaginoso. El estudiante contará con casi dos semanas de trabajo autónomo y posteriormente realizará la entrega y la exposición correspondiente. Se resalta que, en este punto, el estudiante tiene que identificar el modelo de comportamiento mecánico y las correspondientes propiedades que adaptará al elemento anatómico en estudio. La Fig. 3 muestra el esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico dos.

Metodología de abordaje del tópico tres. Reconstrucción de imágenes médicas

El proceso de reconstrucción de imágenes médicas a partir de tomografías axiales computarizadas o resonancias magnéticas ha ido evolucionando a lo largo de estas últimas décadas. La comprensión de las figuras anatómicas y el manejo de los diferentes formatos de almacenamiento de imágenes es fundamental para poder generar "sólidos" tridimensionales que posteriormente podrán ser utilizados tanto en impresión como en simulación numérica. Durante las dos primeras sesiones de este tópico se abordarán conceptos y se introducirá al estudiante al uso de diferentes softwares de reconstrucción de imágenes, conversión de formatos y modelamiento como son Slicer 3D ©, Fusión360 © e Inventor ©. Las siguientes dos semanas constituyen trabajo autónomo del estudiante para el proyecto final que consiste en la generación del modelo anatómico "sólido" seleccionado. La metodología es mostrada en la Fig. 4.

Semana	Actividad
sesión 2 semana 4 y sesión 1 semana 5	<p>Académico imparte en la manera tradicional conceptos referidos al tópico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biomecánica del tejido óseo. Composición, procesos biológicos • El hueso como estructura. Remodelación ósea. Propiedades mecánicas del tejido óseo • Tendones, composición, funciones y propiedades mecánicas • Ligamentos, funciones. Músculos, composición y estructura • Cartílago articular • Modelos de comportamiento mecánico de materiales (elástico, visco-elástico, hiperelástico) • Modelos de comportamiento mecánico de tejidos vivos • Asignación de artículo de revisión de diferentes modelos. Definición de pautas de exposición y entrega
sesión 2 semana 5 y semana 6	<p>Durante este tiempo el estudiante realizará trabajo autónomo, teniendo posibilidad de consultar al académico durante las horas de clase estipuladas en la asignatura y en las horas de consulta previamente establecidas.</p>
sesión 1 semana 7	<p>En sesión grupal cada estudiante expone la actividad realizada. Estas exposiciones se realizarán en una sola clase.</p>

Figura N° 3. Esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico dos.

Semana	Actividad
sesión 2 semana 7 y sesión 1 semana 8	<p>Académico imparte en la manera tradicional conceptos referidos al tópico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Simulación Física versus simulación por Computador • The Visible Human Project • Tomografía Axial Computarizada • Resonancia Magnética • ¿Qué contiene la imagen médica? • Visualización Volumétrica • Definición de pautas de exposición y entrega
sesión 2 semana 8 semana 9 y sesión 1 semana 10	<p>Durante este tiempo el estudiante realizará trabajo autónomo, teniendo posibilidad de consultar al académico durante las horas de clase estipuladas en la asignatura y en las horas de consulta previamente establecidas.</p>
sesión 2 semana 10	<p>En sesión grupal cada estudiante expone la actividad realizada. Estas exposiciones se realizarán en una sola clase.</p>

Figura N° 4. Esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico tres.

Metodología de abordaje del tópico cuatro. Biomecánica del movimiento, técnicas para medición de análisis de marcha

La marcha humana es el proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano en posición erguida se mueve hacia delante, siendo su peso soportado alternativamente por ambas piernas (Perry (1992) y Sánchez et al. (2005)). El análisis de marcha añade precisión con relación a la simple observación, permite la percepción de eventos no disponibles al ojo humano, facilita la correlación de múltiples factores y de un registro detallado del proceso. Durante el tópico 4, en las primeras dos sesiones de clase se entregan las herramientas para poder cuantificar, desde el punto de vista mecánico, las diferentes fuerzas que se generan durante la marcha. Al igual que los ítems anteriores, el estudiante cuenta con dos

semanas de trabajo autónomo para poder llevar a cabo el proyecto que contempla la obtención de las fuerzas reales que se producirán en el elemento anatómico estudiado. La Fig. 5 muestra esquemáticamente el abordaje metodológico de este tópico.

Semana	Actividad
semana 11	<p>Académico imparte en la manera tradicional conceptos referidos al tópico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Introducción. Proceso de adquisición de datos. Aplicaciones clínicas y deportivas • Características funcionales y energéticas generales del movimiento humano, tomando como ejemplo la marcha humana • Laboratorio de Análisis del Movimiento Humano. Caracterización y análisis de la marcha humana en condiciones normales y alteradas • Modelamiento de la marcha humana mediante simulación dinámica • Definición de pautas de exposición y entrega
semana 12 y 13	<p>Durante este tiempo el estudiante realizará trabajo autónomo, teniendo posibilidad de consultar al académico durante las horas de clase estipuladas en la asignatura y en las horas de consulta previamente establecidas.</p>
sesión 1 semana 14	<p>En sesión grupal cada estudiante expone la actividad realizada. Estas exposiciones se realizarán en una sola clase.</p>

Figura N° 5. Esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico cuatro.

Metodología de abordaje del tópico cinco. Biomecánica de la fractura y reparación

El conocimiento de los tipos de fracturas y su clasificación desde el punto de vista mecánico es fundamental para el diseño de dispositivos biomédicos de reparación. En este tópico se integran todos los conocimientos vistos anteriormente en la asignatura en un modelo numérico computacional para posteriormente someterlo a análisis de cargas. El abordaje metodológico de este tópico se presenta en la Fig. 6.

Semana	Actividad
sesión 2 semana 14 y sesión 1 semana 15	<p>Académico imparte en la manera tradicional conceptos referidos al tópico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El hueso como estructura (repasso tema 2) • Tipos de fractura • Reparación ósea • Técnicas de reparación de fracturas • Biomateriales • Definición de pautas de exposición y entrega
sesión 2 semana 16 y sesión 1 semana 17	<p>Durante este tiempo el estudiante realizará trabajo autónomo, teniendo posibilidad de consultar al académico durante las horas de clase estipuladas en la asignatura y en las horas de consulta previamente establecidas.</p>
sesión 2 semana 17	<p>En sesión grupal cada estudiante expone la actividad realizada. Estas exposiciones se realizarán en una sola clase.</p>

Figura N° 6. Esquema de distribución de tiempo y actividades del tópico cinco.

RESULTADOS

La metodología propuesta se evaluó durante el semestre 1-2021. A continuación, se reporta el caso de los resultados obtenidos por uno de los estudiantes del curso, quien trabajó bajo la metodología descrita con la articulación de la rodilla.

Resultados del tópico uno

El resultado de aprendizaje indica que el estudiante aplicó los conocimientos cinemáticos y los nuevos conceptos aprendidos para describir cinemáticamente la articulación. Definió los grados de libertad, funciones y componentes. Estableció suposiciones y limitaciones del modelo y finalmente halló las incógnitas correspondientes. La Fig. 7 muestra diferentes etapas del proceso.

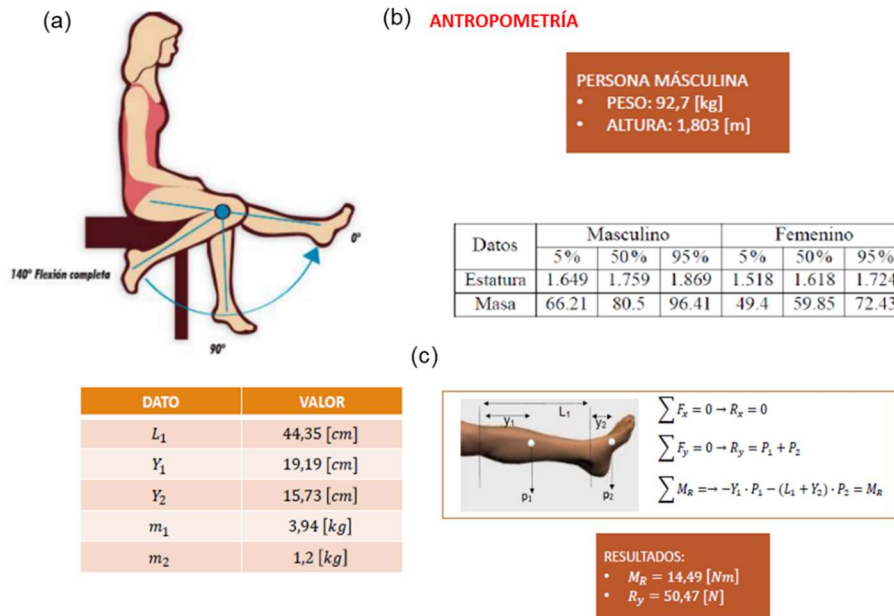


Figura N° 7. Modelo cinemático de rodilla. Posición de estudio: Extensión en sedestación (a), Antropometría (b), Diagrama de cuerpo libre y resolución de ecuaciones (c).

Resultados del tópico dos

La comprensión del comportamiento mecánico de los tejidos biológicos no resulta un concepto trivial pues se tienen que tomar en cuenta diferentes aspectos, principalmente, ¿qué se quiere evaluar? El resultado de aprendizaje de este tópico evidenció que el estudiante evaluó diferentes posibilidades de modelos de comportamiento para la articulación de la rodilla seleccionando finalmente un modelo isotrópico, elástico y lineal.

Resultados del tópico tres

La generación del modelo sólido de rodilla a partir de imágenes en formato DICOM provenientes de una Tomografía Axial Computarizada resultó exitosa. El estudiante logró generar todos los huesos que conforman la estructura anatómica y ensamblarlos correctamente. La Fig. 8 muestra imágenes del resultado.



Figura N° 8. Articulación de rodilla. Generación de superficies a partir de triangulación (a). Modelo sólido suavizado (b).

Resultados del tópico cuatro

El contexto pandémico modificó el abordaje del tópico cuatro, pues los estudiantes no pudieron extraer información directamente de un paciente en el laboratorio de análisis de movimiento humano, por lo que se trabajó con los registros de marcha disponibles de un paciente real con una lesión de extremidad inferior. La actividad consistió en manejar y graficar los registros utilizando un software de procesamiento de datos, identificar la extremidad lesionada, las diferencias entre la marcha normal y patológica, los cambios en la cinemática de cadera, rodilla y tobillo y en la actividad de la musculatura vasto lateral de cuádriceps, además de cambios en la fuerza de reacción del suelo. En la Fig. 9 se muestra una parte de los resultados obtenidos, evidenciándose la diferencia entre la cinemática de la pierna derecha y la izquierda (siendo la extremidad derecha la lesionada), particularmente se puede notar la importante diferencia de la cinemática de la articulación de rodilla derecha respecto a la referencia (Fig. 9b y 9c).

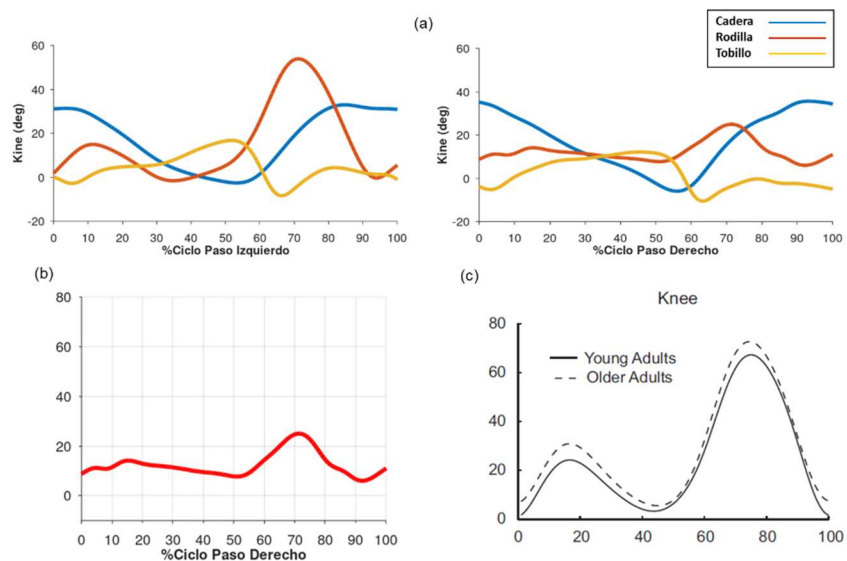


Figura N° 9. Comparación entre la cinemática de las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo de piernas derecha e izquierda del paciente (a). Cinemática de la articulación de rodilla derecha del paciente (b). Cinemática de la articulación de rodilla de referencia (Silder et al., 2008) (c).

Resultados del t3pico cinco

El alumno decidi3 simular una fractura de f3mur transversa y propuso un clavo intramedular bloqueado como t3cnica de reparaci3n. Esto, si bien no afecta a toda la rodilla, afecta a uno de los huesos m3s importantes que concurren a ella. Teniendo en cuenta que toda la informaci3n obtenida en los t3picos anteriores es aplicable, la selecci3n de esta fractura y t3cnica de reparaci3n cumple con los objetivos del curso. La Fig. 10 muestra el modelo de f3mur con el dispositivo de reparaci3n seleccionado.

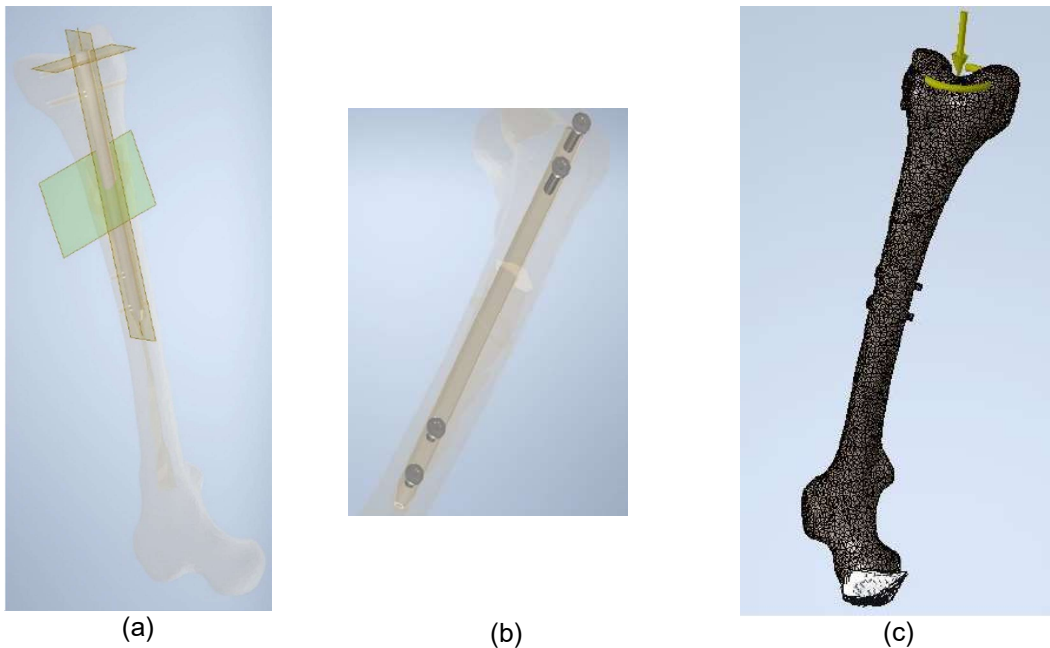


Figura N3 10. Inserci3n de clavo en f3mur. Inserci3n de clavo intramedular y plano de fractura (a). Detalle de clavo intramedular bloqueado (b). Modelo en an3lisis con cargas y condiciones de contorno (c).

CONCLUSIONES

El aprendizaje basado en proyectos en una metodolog3a de ense1anza-aprendizaje que ha revolucionado la forma de visualizar la educaci3n universitaria. La modificaci3n de las premisas de esta modalidad de ense1anza ha generado resultados satisfactorios al implementarse en la asignatura "Introducci3n a la Biomec3nica" en el Programa de Maestr3a de Ingenier3a Mec3nica y Materiales de la Facultad de Ciencias de la Ingenier3a de la Universidad Austral de Chile.

A modo particular puede evidenciarse que esta implementaci3n tiene que respetar una estricta distribuci3n de los tiempos. Los t3picos tienen que ser distribuidos a lo largo de las semanas lectivas, siendo muy importante el avance en cada t3pico.

Es fundamental el compromiso del estudiante pues la entrega de m3ltiples proyectos durante el semestre puede generar en el evaluado una presi3n adicional.

Ante eventualidades como el contexto pandémico, esta metodología de aprendizaje puede adaptarse, pero siempre tomando en cuenta los tiempos de ejecución.

Finalmente se destaca que, a pesar de haber resultado en una evidencia exitosa esta implementación, es necesaria la evaluación en el tiempo para poder generar resultados más concluyentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar especial agradecimiento a Mauricio San Martín y Rodrigo Montefusco, académicos pertenecientes al Instituto de Aparato Locomotor y Rehabilitación Escuela de Kinesiología, también, al académico Guillaume Sérandour, Director del Laboratorio Leufülab y académico del Instituto de Diseño y Métodos Industriales de la Universidad Austral de Chile, por su participación en la implementación de esta asignatura.

REFERENCIAS

Alcober, J., et al. (2003). Evaluación de la implantación del aprendizaje basado en proyectos en la EPSC (2001-2003). En Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas. "XI Congreso Universitario de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas". Escola Universitària Politècnica de Vilanova i la Geltrú, p. 1-8. ISBN 84-699-5659-0.

Comín, M., et al. (1999) Biomecánica de la fractura ósea y técnicas de reparación. Valencia, España: Instituto de Biomecánica de Valencia (IVB).

Escuela de ICM & DACIC (2017). Proyecto de Innovación Curricular de la Carrera de Ingeniería Civil Mecánica. Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería - Universidad Austral de Chile.

Fusion 360 (Nº de versión 2.0). (2020). Windows 10. Autodesk.

Griffith, L. & Grodzinsky, A. (2001). Advances in biomedical engineering. JAMA, 285(5), 556-561.

Inventor Profesional (Nº de versión 183-2021). (2021). Windows 10. Autodesk

Norkin, C. & Levangie, P. (2011) Joint Structure & Function. A comprehensive análisis (5th ed.). Philadelphia: F.A. Davis Company.

Perry, J. (1992). Gait Analysis. Normal and pathological function. USA: SLACK Incorporated.

Sánchez, J., et al. (2005). Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. Valencia, España: Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV).

Silder, A., et al. (2008). Active and passive contributions to joint kinetics during walking in older adults. Journal of Biomechanics, 41(7), 1520–1527.

Slicer 3D (Nº de versión 4.11). (2021). Windows. Slicer.

Villa, A., et al. (2008). Consideraciones para el análisis de la marcha humana. Técnicas de videogrametría, electromiografía y dinamometría. Revista Ingeniería Biomédica, 2(3), 16-26.