

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**UNIDAD ZACATENCO**

**ANÁLISIS NUMÉRICO BIOMECÁNICO DE UN FÉMUR CON  
PATOLOGÍA OSTEOGÉNICA IMPERFECTA ANTE UNA  
COLISIÓN**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:**

**ING. KAREN PAOLA MOLINA REYES**



**DIRECTORES DE TESIS:**

**DR GUILLERMO M. URRIOLAGOITIA CALDERÓN**

**DR. GUILLERMO MANUEL URRIOLAGOITIA SOSA**

**CDMX, JUNIO 2022**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14  
 REP 2017

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de  siendo las  horas del día  del mes de  del  se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de:  para examinar la tesis titulada:  del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	MOLINA	Apellido Materno:	REYES	Nombre (s):	KAREN PAOLA
-------------------	--------	-------------------	-------	-------------	-------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 0 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo Si  NO  SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

**JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:** El trabajo de tesis cumple con el Artículo 33 del Reglamento de Estudios de Posgrado. Es responsabilidad del alumno, como autor de la tesis, la verificación antiplagio. Según el artículo 36 del reglamento de estudios de posgrado, en el caso de que un alumno incumpla el criterio de originalidad en el trabajo de tesis, es responsabilidad de la Secretaría de Investigación y Posgrado, aportar a la Oficina del Abogado General u otras instancias competentes, los elementos que se encuentren a su alcance, para las acciones legales al que haya lugar, sin que la comisión revisora de esta tesis se haga responsable.

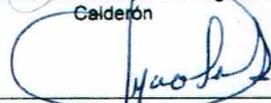
**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio.**

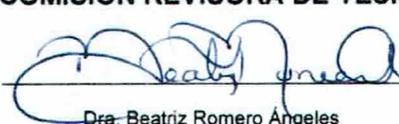
Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron APROBAR  SUSPENDER  NO APROBAR  la tesis por UNANIMIDAD  MAYORÍA  en virtud de los motivos siguientes:

Se juzga que la tesis cumple con reglamento y tiene calidad suficiente para realizar el tramite y presentar el examen de grado

**COMISIÓN REVISORA DE TESIS**

  
 Director de Tesis  
 Dr. Guillermo Manuel Uriolagoitia Calderón

  
 2° Director de Tesis  
 Dr. Guillermo Uriolagoitia Sosa

  
 Dra. Beatriz Romero Ángeles

  
 Dra. Rosa Alicia Hernández Vázquez

  
 Dr. Christopher René Torres San Miguel

  
 Dr. José Martínez Trinidad  
 PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES





## INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día **17** del mes de **junio** del **2022**, la que suscribe **Karen Paola Molina Reyes**, alumna del programa **Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica opción Diseño Mecánico** con número de registro **B201148**, adscrita a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Adolfo López Mateos (Zacatenco), manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón** y el **Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa** y cede los derechos del trabajo titulado: **“Análisis numérico biomecánico de un fémur con patología osteogénica imperfecta ante una colisión”**, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo **paomoli1319@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

---

KAREN PAOLA MOLINA REYES

---

**Resumen**

La osteogénesis imperfecta, es una enfermedad poco común, debido a su baja incidencia, se clasifica como una de las enfermedades raras. Afecta diversos tejidos, provocando principalmente fragilidad ósea, lo cual ocasiona múltiples fracturas. La osteogénesis imperfecta se denomina como una colagenopatía genética, las colagenopatías, afectan al tejido conectivo, lo cual produce síntomas diversos dependiendo del órgano afectado. El colágeno tipo I es la proteína con mayor presencia en la estructura de los huesos y la piel, es un componente estructural, con la función de brindar resistencia a la tracción en los tejidos, así como soporte. Esta deficiencia en el colágeno provoca afecciones en diferentes tejidos y fragilidad ósea debido a la disminución de la masa ósea.

El desarrollo psicomotor es un proceso integral en el cual el individuo mejora gradualmente sus habilidades motoras, haciéndolas cada vez más complejas. El tratamiento para la osteogénesis imperfecta está enfocado en mejorar su calidad de vida, incrementando la independencia de los pacientes. Este tratamiento consiste en prácticas multidisciplinarias que se determinan de acuerdo a las características y necesidades de cada individuo. La reducción de la incidencia de fracturas y la disminución del dolor resultantes de la aplicación de bifosfonatos, hacen que este tratamiento sea uno de los más importantes y efectivos, permitiendo a su vez un aumento de la fuerza muscular mediante el tratamiento posterior con fisioterapia. Realizar un análisis numérico de un biomodelo 3D de una estructura ósea con osteogénesis imperfecta, en este caso un fémur, permite determinar los efectos mecánicos que producen fuerzas externas al ser aplicadas en las estructuras óseas en actividades de la vida cotidiana, logrando determinar posibles fracturas, así como crear protocolos y tratamientos cada vez más efectivos para mejorar el desarrollo de los individuos con osteogénesis imperfecta.

---

**Abstract**

Osteogenesis Imperfecta is a rare disease, due to its low incidence, it is classified as one of the rare diseases. It affects various tissues, mainly causing bone fragility, which causes multiple fractures. Osteogenesis imperfecta is known as a genetic collagen disease, collagen disorders, affect connective tissue, which produces several symptoms depending on the affected organ. Type I collagen is the protein with the greatest presence in the structure of bones and skin, it is a structural component, with the function of providing resistance to traction in tissues, as well as support. This deficiency in collagen causes conditions in different tissues and bone fragility due to the decrease in bone mass.

Psychomotor development is a process which the individual gradually improves their motor skills, making them more and more complex. Treatment for osteogenesis imperfecta is focused on improving quality of life, increasing the independence of patients. This treatment consists of multidisciplinary practices that are determined according to the characteristics and needs of each individual. The reduction in the incidence of fractures and the decrease in pain resulting from the application of bisphosphonates make this treatment one of the most important and effective, allowing in turn an increase in muscle strength through subsequent treatment with physiotherapy. Performing a numerical analysis of a 3D biomodel of a bone structure with osteogenesis imperfecta, in this case a femur, allows determining the mechanical effects produced by external forces when applied to the bone structures in activities of daily life, managing to determine possible fractures, as well as creating increasingly effective protocols and treatments to improve the development of individuals with osteogenesis imperfecta.

---



---

**Índice general**

<b>Resumen</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>Índice general</b> .....	III
<b>Índice de figuras</b> .....	IV
<b>Índice de tablas</b> .....	XI
<b>Objetivo general</b> .....	XII
<b>Objetivos particulares</b> .....	XII
<b>Justificación</b> .....	XIII
<b>Introducción</b> .....	XIV
 <b>Capítulo I: Estado del arte</b>	
I.1.- Generalidades sobre los antecedentes prehistóricos del desarrollo de la vida humana.....	2
I.2.- Paleopatología, una forma de entender la vida prehistórica.....	4
I.3.- El inicio del desarrollo de la Medicina en las civilizaciones antiguas.....	6
I.4.- La Edad Media, impulso hacia la medicina científica.....	13
I.4.1.- La medicina en el Nuevo Mundo.....	15
I.5.- Los grandes aportes durante el Renacimiento.....	16
I.5.1.- Anatomía del cuerpo humano.....	17
I.6.- El inicio de la Cirugía como ciencia.....	19
I.7.- La osteogénesis imperfecta, una enfermedad rara.....	25
I.8.- Tratamiento para osteogénesis imperfecta.....	28
I.9.- La Biomecánica como análisis no invasivo.....	29
I.10.- Planteamiento del problema.....	30
I.11.- Sumario.....	30
I.12.- Referencias.....	31

---



---

## Capítulo II: Marco teórico

II.1.- Introducción.....	37
II.2.- La Osteogénesis Imperfecta y su clasificación.....	37
II.3.- Métodos de diagnóstico de Osteogénesis Imperfecta.....	38
II.4.- Tratamiento.....	41
II.4.1.- Tratamiento farmacológico.....	41
II.4.2.- Tratamiento quirúrgico.....	43
II.4.3.- Tratamiento fisioterapéutico y rehabilitación.....	43
II.5.- Estructuras óseas.....	44
II.5.1 Células óseas.....	44
II.5.2.- Tejido trabecular.....	46
II.5.3.- Tejido cortical.....	47
II.6.- Anatomía del fémur.....	47
II.7.- Sumario.....	48
II.8.-Referencias.....	48

## Capítulo III: Modelado

III.1.- Introducción.....	51
III.2.- Metodología para el desarrollo de un biomodelado.....	51
III.2.1.- Obtención de imágenes en formato DICOM.....	51
III.2.2.- Importación de imágenes.....	52
III.2.3.- Procesamiento de imágenes.....	53
III.2.4.- Implementación del modelo sólido del hueso cortical y trabecular del fémur.....	55
III.3.- Análisis numérico del modelo 3D del fémur izquierdo de un infante.....	57
III.4.- Análisis del fémur izquierdo de un infante en posición de bipedestación bipodal.....	59
III.4.1.- Geometría del modelo.....	59
III.4.2.- Propiedades mecánicas del modelo.....	59
III.4.3.- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado.....	59
III.4.4.- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo.....	60
III.4.5.- Solución del modelo.....	60
III.5.- Sumario.....	67
III.6.- Referencias.....	67

---



---

---



---

## Capítulo IV: Análisis numérico 1

IV.1.- Introducción.....	69
IV.2.- Modelado del fémur izquierdo de un infante con <i>OI</i> .....	69
IV.3.- Análisis numérico del modelo 3D del fémur izquierdo de un infante con <i>OI</i> .....	71
IV.4.- Equilibrio de los segmentos corporales.....	71
IV.5.- Planos anatómicos de la cadera.....	72
IV.6.- Superficie articular durante la bipedestación.....	72
IV.7.- Análisis del fémur izquierdo de un infante con <i>OI</i> en posición de bipedestación bipodal..	74
IV.7.1.- Geometría del modelo.....	74
IV.7.2.- Propiedades mecánicas del modelo.....	74
IV.7.3.- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado.....	74
IV.7.4.- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente.....	75
IV.7.5.- Solución del modelo.....	75
IV.7.6.- Resultados obtenidos.....	75
IV.8.- Sumario.....	85
IV.9.- Referencias.....	86

## Capítulo V: Análisis numérico 2

V.1.- Introducción.....	90
V.2.- Modelado del fémur izquierdo de un infante con <i>OI</i> .....	90
V.3.- Análisis numérico del modelo 3D del fémur izquierdo de un infante con <i>OI</i> .....	90
V.4.- Análisis del fémur izquierdo de un infante con <i>OI</i> en posición de sedestación.....	91
V.4.1.- Geometría del modelo.....	91
V.4.2.- Propiedades mecánicas del modelo.....	91
V.4.3.- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado.....	91
V.4.4.- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo.....	91
V.4.5.- Solución del modelo.....	92
V.4.6.- Resultados obtenidos.....	92
V.5.- Sumario.....	101
V.6.- Referencias.....	101
Conclusiones.....	102

---



---

## Índice de figuras

### Capítulo I: Estado del arte

<b>Figura I.1.-</b> <i>Homo Erectus</i> controlando el fuego y un hombre prehistórico defendiéndose.....	2
<b>Figura I.2.-</b> Forma de vida de los homínidos cazadores-recolectores.....	3
<b>Figura I.3.-</b> Estudio de la enfermedad del Hombre Prehistórico.....	4
<b>Figura I.4.-</b> Molino prehistórico y su uso en la vida cotidiana.....	5
<b>Figura I.5.-</b> Cráneo macrocéfalo, vista lateral y frontal.....	6
<b>Figura I.6.-</b> <i>Código Hammurabi</i> .....	7
<b>Figura I. 7</b> Momia humana egipcia con osteogénesis imperfecta.....	8
<b>Figura I.8.-</b> Reducción de luxaciones mediante aparatos.....	10
<b>Figura I.9.-</b> Ilustración del <i>pie zambo (pie equino varo)</i> y tratamiento para la corrección.....	10
<b>Figura I.10.-</b> Hospital de campaña e instrumentos médicos más usados la antigua Roma.....	11
<b>Figura I.11.-</b> Monje copista medieval y primeros modelos de gafas en la época medieval.....	13
<b>Figura I.12.-</b> Procedimiento y material quirúrgico exhibido en <i>Chirurgia Magna</i> .....	15
<b>Figura I.13.-</b> Descripción de las plantas medicinales de la <i>Enciclopedia Rerum medicarum</i> <i>Novae Hispaniae Thesaurus</i> de Francisco Hernández.....	16
<b>Figura I.14.-</b> <i>Parecelso</i> y un filósofo tradicional examinando un frasco.....	17
<b>Figura I.15.-</b> Ilustración de miembros superiores, tórax, cabeza y cuello, y feto humano.....	18
<b>Figura I.16.-</b> Ilustración de <i>Humani Corpus Fabrica</i> realizada por <i>Andrés Vesalio</i> .....	18
<b>Figura I.17.-</b> Prótesis de pierna, brazo y mano diseñadas por <i>Ambrosio Paré</i> .....	20
<b>Figura I.18.-</b> Corrección de postura y emblema de la ortopedia.....	20
<b>Figura I.19.-</b> Fotografía de niña con escoliosis, columna deformada.....	22
<b>Figura I.20.-</b> Microscopio de Robert Hooke y fisiología de cuerpos diminutos.....	22
<b>Figura I.21.-</b> Caja esterilizadora o autoclave. Así como spray de vapor y apuntes de <i>Lister</i> .....	24
<b>Figura I.22.-</b> Vista microscópica de los tejidos sanguíneo, ósea y cartilaginosa.....	25
<b>Figura I.23.-</b> El esqueleto y cráneo de un infante con osteogénesis imperfecta.....	26

### Capítulo II: Marco teórico

<b>Figura II.1.-</b> Cortes histológicos posteriores a un estudio histomorfométrico en huesos con tratamiento de bifosfonatos.....	39
<b>Figura II.2.-</b> Prueba de diagnóstico densitometría ósea.....	39
<b>Figura II.3.-</b> Ecografía para diagnóstico de OI tipo 2.....	40
<b>Figura II.4.-</b> Biopsia cutánea.....	40
<b>Figura II.5.-</b> Radiografías a pacientes con Osteogénesis Imperfectas.....	41
<b>Figura II.6.-</b> Diagrama de resorción y formación de tejido óseo.....	42
<b>Figura II.7.-</b> Imágenes radiográficas de dos niños con OI tratados con bifosfonatos, donde se pueden observar las líneas “cebras” en la zona metafisaria de los huesos largos.....	42
<b>Figura II.8.-</b> Clavo telescópico intramedular Fassier Duval.....	43
<b>Figura II.9.-</b> Tratamiento fisioterapéutico postquirúrgico en osteotomías de fémur.....	44
<b>Figura II.10.-</b> Diagrama de las células óseas.....	45
<b>Figura II.11.-</b> Diagrama del corte transversal de un fémur.....	46
<b>Figura II.12.-</b> Estructuras óseas típicas del hueso esponjoso.....	46
<b>Figura II.13.-</b> Estructuras óseas típicas del hueso compacto.....	47
<b>Figura II.14.-</b> Anatomía del fémur.....	48

### Capítulo III: Modelado

<b>Figura III.1.-</b> Equipo para realizar tomografía y tomografía.....	52
<b>Figura III.2.-</b> Importación de archivos <i>DICOM</i> para su procesamiento.....	52
<b>Figura III.3.-</b> Visualización de las imágenes tomográficas en planos sagital, axial y coronal....	53
<b>Figura III.4.-</b> Desarrollo de la máscara del hueso trabecular con la herramienta <i>Profile Lines</i> ...	54
<b>Figura III.5.-</b> Modelo del hueso cortical obtenido a partir de archivos <i>DICOM</i> .....	54
<b>Figura III.6.-</b> Representaciones tridimensionales en formato <i>*stl</i> de los biomodelos obtenidos.	55
<b>Figura III.7.-</b> Discretizado del tejido trabecular del fémur con el programa <i>PowerShape®</i> .....	56
<b>Figura III.8.-</b> Visualización del corte transversal del tejido cortical para comprobar que es un modelo sólido funcional.....	56

<b>Figura III.9.-</b> Cavidad generada en el tejido cortical al fusionarlo con el tejido trabecular en el programa <i>SolidWorks</i> <sup>®</sup> .....	57
<b>Figura III.10.-</b> Cintura pélvica y articulaciones relacionadas, transferencia del peso.....	58
<b>Figura III.11.-</b> Diagrama de cuerpo libre del fémur izquierdo en posición de bipedestación bipodal con carga aplicada y condiciones de frontera.....	59
<b>Figura III.12.-</b> Discretizado del modelo del sistema biológico en el <i>ANSYS Workbench</i> <sup>®</sup> .....	60
<b>Figura III.13.-</b> Aplicación de carga y de condiciones de frontera en el modelo <i>3D</i> .....	61
<b>Figura III.14.-</b> Elongación total. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	61
<b>Figura III.15.-</b> Elongación nominal eje x. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	62
<b>Figura III.16.-</b> Elongación nominal eje y. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	62
<b>Figura III.17.-</b> Elongación nominal eje z. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	63
<b>Figura III.18.-</b> Esfuerzo nominal eje x. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	63
<b>Figura III.19.-</b> Esfuerzo nominal eje y. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	64
<b>Figura III.20.-</b> Esfuerzo nominal eje z. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	64
<b>Figura III.21.-</b> Esfuerzo cortante plano xy. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	65
<b>Figura III.22.-</b> Esfuerzo cortante plano xz. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	65
<b>Figura III.23.-</b> Esfuerzo cortante plano yz. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	66
<b>Figura III.24.-</b> Esfuerzo de falla teoría de von Mises. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular...	66
<b>Capítulo IV: Análisis numérico 1</b>	

<b>Figura IV.1.-</b> Desarrollo de la máscara del hueso cortical.....	70
<b>Figura IV.2.-</b> Discretizado del tejido cortical del fémur con el programa <i>PowerShape</i> <sup>®</sup> .....	70
<b>Figura IV.3.-</b> Tejido cortical y trabecular para comprobar que es un modelo sólido funcional...	70
<b>Figura IV.4.-</b> Planos anatómicos del cuerpo.....	72
<b>Figura IV.5.-</b> Articulación coxofemoral en posición de bipedestación.....	73
<b>Figura IV.6.-</b> Diagrama de cuerpo libre del fémur izquierdo afectado con OI en posición de bipedestación bipodal con carga aplicada y condiciones de frontera.....	73
<b>Figura IV. 7.-</b> Discretizado del modelo del sistema biológico en el <i>ANSYS Workbench</i> <sup>®</sup> .....	75
<b>Figura IV.8.-</b> Desplazamiento total (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	76
<b>Figura IV.9.-</b> Deformación direccional en mm. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	76

<b>Figura IV.10.-</b> Deformación elástica equivalente (Von-Mises) a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	77
<b>Figura IV.11.-</b> Deformación elástica principal máxima. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	77
<b>Figura IV. 12.-</b> Deformación elástica principal mínima. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	78
<b>Figura IV. 13.-</b> Esfuerzo von Mises (MPa) a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	78
<b>Figura IV. 14.-</b> Desplazamiento. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	79
<b>Figura IV. 15.-</b> Esfuerzo nominal eje x (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	79
<b>Figura IV. 16.-</b> Esfuerzo nominal eje y (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	80
<b>Figura IV. 17.-</b> Esfuerzo nominal eje z (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	80
<b>Figura IV. 18.-</b> Esfuerzo cortante plano xy (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	81
<b>Figura IV. 19.-</b> Esfuerzo cortante plano yz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	81
<b>Figura IV. 20.-</b> Esfuerzo cortante plano xz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	82
<b>Figura IV. 21.-</b> Esfuerzo principal máximo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	82
<b>Figura IV. 22.-</b> Esfuerzo principal mínimo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	83
<b>Figura IV. 23.-</b> Desplazamiento en eje x (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	83
<b>Figura IV. 24.-</b> Desplazamiento en eje y (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	84
<b>Figura IV. 25.-</b> Desplazamiento en eje z (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	84
<b>Capítulo V: Análisis numérico 2</b>	
<b>Figura V.1.-</b> Diagrama de cuerpo libre del fémur izquierdo afectado con <i>OI</i> en posición de sedestación con carga aplicada y condiciones de frontera.....	90
<b>Figura V.2.-</b> Representación de la posición de sedestación en el momento de la colisión.....	92
<b>Figura V.3.-</b> Desplazamiento total (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	93
<b>Figura V.4.-</b> Desplazamiento en eje x a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	93
<b>Figura V.5.-</b> Desplazamiento en eje y a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	94
<b>Figura V.6.-</b> Desplazamiento en eje z a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	94
<b>Figura V. 7.-</b> Esfuerzo von Mises (MPa) a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	95
<b>Figura V.8.-</b> Esfuerzo nominal eje x (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	95
<b>Figura V.9.-</b> Esfuerzo nominal eje y (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	96
<b>Figura V.10.-</b> Esfuerzo nominal eje z (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	96
<b>Figura V.11.-</b> Esfuerzo cortante plano xy (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	97
<b>Figura V.12.-</b> Esfuerzo cortante plano yz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	97

---

---

<b>Figura V.13.-</b> Esfuerzo cortante plano xz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	98
<b>Figura V.14.-</b> Esfuerzo principal máximo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	98
<b>Figura V.15.-</b> Esfuerzo principal mínimo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	99
<b>Figura V.16.-</b> Deformación unitaria en eje x (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	99
<b>Figura V.17.-</b> Deformación unitaria en eje y (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	100
<b>Figura V.18.-</b> Deformación unitaria en eje z (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.....	100

---

---

**Índice de tablas****Capítulo I: Estado del arte****Tabla I.1.-** Clasificación expandida de osteogénesis imperfecta.....27**Capítulo III: Modelado****Tabla III.1.-** Propiedades mecánicas de los materiales.....60**Tabla III.2.-** Resultados del análisis.....67**Capítulo IV: Análisis numérico 1****Tabla IV.1.-** Propiedades mecánicas de los materiales.....74**Tabla IV.2.-** Resultados del análisis.....85**Capítulo V: Análisis numérico 2****Tabla V.1.-** Propiedades mecánicas de los materiales.....91**Tabla V.2.-** Resultados del análisis.....101

---

---

## Objetivos generales

Realizar un análisis numérico a un biomodelo tridimensional de una estructura ósea, utilizando un software de cálculo basado en el Método de Elementos Finitos.

## Objetivos particulares

- Realizar una investigación sobre la patología osteogénesis imperfecta.
- Analizar las fuerzas que actúan sobre el fémur en posición de bipedestación y sedestación
- Desarrollar un modelo CAD de un fémur izquierdo de un infante aparentemente sano y un modelo de fémur izquierdo de un paciente con osteogénesis imperfecta.
- Realizar el análisis numérico con la aplicación de diferentes cargas y condiciones de frontera.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en ambos análisis numéricos.
- Evaluación de los resultados.

---

---

## **Justificación**

El fémur es el hueso más largo del cuerpo, la longitud del fémur corresponde a una cuarta parte de la estatura de un individuo. Este hueso es el responsable de sostener el peso del cuerpo de una persona en las actividades de la vida cotidiana. El fémur humano tiene contacto con dos articulaciones, en su extremo proximal, el acetábulo del fémur conforma la articulación de la cadera, mientras que, en el extremo distal, el fémur tiene contacto con la tibia formando la articulación de la rodilla. Las lesiones y fracturas en las extremidades, son comunes en personas con osteogénesis imperfecta, incluso sin la acción de un agente externo aparente.

El análisis numérico por método de elementos finitos es una herramienta importante para el análisis de biomodelos, con una alta fidelidad a la realidad, permitiendo conocer de una forma precisa el comportamiento del fémur ante cargas generadas en situaciones cotidianas como lo son la sedestación y la bipedestación y describiendo áreas propensas a una lesión o fractura.

---

---

## Introducción

Esta investigación está enfocada en desarrollar un modelo tridimensional de un fémur con patología osteogénica imperfecta y un fémur aparentemente sano, con la finalidad de realizar un análisis numérico que permita observar las características mecánicas de cada ambos elementos biomecánicos ante la acción de fuerzas externas, resultado de actividades cotidianas.

### Capítulo I: Estado del arte

En este capítulo se realiza una breve investigación sobre el desarrollo de la Medicina desde su uso instintivo en la Prehistoria y empírico en las civilizaciones antiguas, que por mucho tiempo se mantuvo relacionado con diferentes creencias. Presentando el inicio de la Medicina Científica con las nuevas perspectivas que brindaron inventos. Posteriormente, se menciona el desarrollo de especialidades de la Medicina que en la actualidad son fundamentales para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades complejas como la osteogénesis imperfecta. Finalmente, se presenta la evolución y desarrollo de los conocimientos sobre la osteogénesis imperfecta. Se describe la clasificación y los tratamientos que se utilizan en la actualidad para mejorar la calidad de vida de las personas con osteogénesis imperfecta.

### Capítulo II: Marco Teórico

En este capítulo se describen las manifestaciones clínicas de la Osteogénesis Imperfecta. También se explican los métodos de diagnóstico de este padecimiento y los tratamientos a los cuales son sometidos los pacientes. Se abordan las características del tejido cortical y el tejido trabecular y se representa la anatomía del fémur, con la finalidad de presentar contenido de interés para el desarrollo de este caso.

### Capítulo III: Modelado

Se describe la metodología para elaborar un biomodelo de un fémur aparentemente sano de un paciente pediátrico. Se generaron dos modelos que representan la anatomía del hueso cortical y el hueso trabecular, los cuales fueron perfeccionados en diferentes programas computacionales para lograr tener modelos funcionales con superficies uniformes para ser transformadas posteriormente en un discretizado volumétrico para su uso en un programa computacional de solución numérica por medio de *MEF*. Se exportó el modelo a *ANSYS Workbench*<sup>®</sup> en donde se realizó un estudio de prueba para comprobar que el modelo arrojaba resultados.

---

---

#### Capítulo IV: Análisis numérico I

Se describe la metodología para elaborar un biomodelo de un fémur de un paciente con Osteogénesis Imperfecta. Se generaron dos modelos que representan la anatomía del hueso cortical y el hueso trabecular, los cuales fueron perfeccionados en diferentes programas computacionales para lograr tener modelos funcionales con superficies uniformes para ser transformadas posteriormente en un discretizado volumétrico para su uso en un programa computacional de solución numérica por medio de MEF. Se exportó el modelo a ANSYS Workbench® en donde se realizó un análisis numérico del fémur en posición de bipedestación para realizar un comparativo entre los resultados del fémur sano analizado en el Capítulo III.

#### Capítulo V: Análisis numérico II

Se analiza el fémur con Osteogenesis Imperfecta en un caso donde es sometido a una fuerza en la parte distal del mismo, simulando una colisión mientras el sujeto permanece en posición de sedestación. El fémur se considera como un sistema de viga empotrada dando como resultado datos sobre el comportamiento mecánico del tejido cortical y el tejido trabecular.

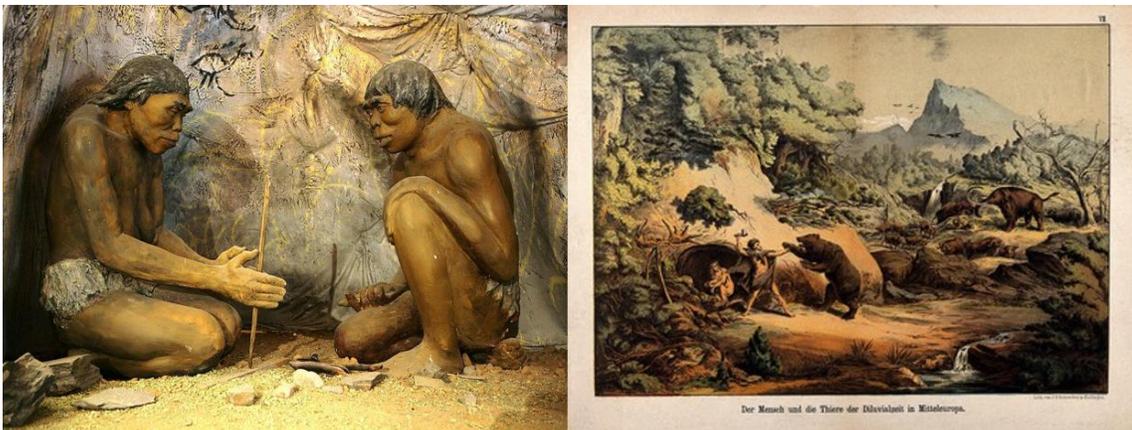
---

# **CAPÍTULO 1:**

# **ESTADO DEL ARTE**

### I.1.- Generalidades sobre los antecedentes prehistóricos del desarrollo de la vida humana

Al hablar sobre la evolución biológica de la humanidad, es importante situarse en la Era de la Prehistoria para poder observar la larga línea evolutiva del Hombre. La Prehistoria, al ser el período más largo de la presencia humana sobre la Tierra brinda información relevante de esta evolución. Mientras que el período Paleolítico es el más antiguo, abarca desde los orígenes de la vida humana hasta el surgimiento de las primeras técnicas agrícolas. Se registra que, entre los primeros homínidos, durante el período Paleolítico inferior fueron los *Homo Habilis* quienes habitaron la zona oriental de África. Los *Homo Habilis*, vivían organizados en grupos de quince a veinte individuos, eran nómadas y se desplazaban en busca de alimentos. Generalmente encontraban refugio en cuevas, lo cual les dio posibilidades de supervivencia en un entorno hostil. Posteriormente, aparecieron los *Homo Erectus* con mejores habilidades para la supervivencia, su cerebro era más grande comparado con el *Homo Habilis*, lo que dio lugar a una mejor organización, permitiéndoles formar grupos más grandes. Por lo que se asegura que tenían su propio lenguaje, pues era necesario para la transmisión de ideas y conocimientos. Una de las características principales de los *Homo Erectus*, es la fabricación de herramientas, ampliando su capacidad para la recolección de alimento, la búsqueda de mejores refugios y la defensa contra depredadores. La elaboración de utensilios representa la existencia de concepciones mentales avanzadas, como la simetría. Asimismo, el uso de fuego sirvió como un medio para modificar recursos naturales y para la elaboración de utensilios. Así como, para brindar luz y calor, para ahuyentar animales depredadores. Estos hechos marcaron el final del periodo Paleolítico Inferior [I.1].



**Figura I.1.-** *Homo Erectus* controlando el fuego y un hombre prehistórico defendiéndose

El *Homo Erectus* se extendió por Europa en busca de mejores condiciones climatológicas. Gradualmente este homínido empezó a evolucionar, el tamaño de su cerebro alcanzó el nivel

máximo; tamaño que posee un humano moderno y tenían mayor capacidad de adaptarse a cualquier entorno que lo rodeara. La evolución del *Homo Erectus* fue tal, que llegó el momento de llamarlo *Homo Sapiens* [I.2]. Los *Homo Sapiens de Neanderthal* tuvieron presencia en el periodo paleolítico medio, se caracterizaron por su estructura corporal, la cual es muy cercana a la de los seres humanos modernos. Durante el período Paleolítico Superior que comprende 40 000 a 10 000 a.C. surgieron los primeros homínidos cazadores-recolectores, con características sociales y económicas mejor definidas. Su capacidad organizacional era cada vez mayor. Integraban grupos de acuerdo a su parentesco y probablemente en este período se dio inicio a la división del trabajo de acuerdo al género. Este hecho constituyó el fundamento principal de la familia humana [I.3]. Otra característica notable es el avance en la tecnología y las técnicas para desarrollar instrumentos, con materiales como el hueso y la piedra tallada [I.4].



**Figura I.2.-** Forma de vida de los homínidos cazadores-recolectores

El período Mesolítico hace distinción entre las eras Paleolíticas y Neolítica. El Mesolítico describe hechos culturales, se pueden identificar objetos que muestran mayores recursos y capacidades en los individuos. Se concentran por tiempos prolongados y casi permanentes en lugares cercanos a cuerpos de agua, construyeron chozas elaboradas con diferentes materiales como palos de madera, cubiertos en muchas ocasiones con pieles y plantas para protegerse del frío, lo que les permite alejarse de las cuevas [I.5]. La última etapa de la Prehistoria es el periodo Neolítico, comprendido entre los años 9 000 a.C. a 6 000 a.C., éste revolucionó realmente las condiciones de la existencia humana. En él se puede observar una interacción diferente entre el Hombre y la Naturaleza, que nace de la necesidad de productos básicos y en donde el Hombre comprende que es necesario el

desarrollo de medios y herramientas para transformar estos recursos para obtener beneficios. La agricultura y la domesticación de animales trajeron como consecuencia el sedentarismo y de estos asentamientos surgen las primeras aldeas. Al poder cuidar el desarrollo de los cultivos y pastorear al ganado, la calidad en la alimentación se vio beneficiada. Surgieron nuevas formas de organización social y se dio paso a la civilización con el inicio de las primeras formas de comercio, ya que la producción de artesanías y alimentos superaba las necesidades de los productores [I.6]. El desplazamiento hacia zonas fértiles produjo los primeros asentamientos neolíticos, con el crecimiento de la población fue necesario crear asentamientos para los nuevos habitantes, lo que ayudo a la difusión de los conocimientos básicos que ya habían adquirido, como la domesticación de animales, la agricultura y posteriormente dar paso al inicio de la metalurgia, actividad que caracterizó este periodo [I.7].

### **I.2.- Paleopatología, una forma de entender la vida prehistórica**

Existe una división entre la Prehistoria y la historia de la humanidad, la escritura da información amplia y valiosa sobre civilizaciones antiguas, algo que no ocurre en la Prehistoria y lo que dificulta la obtención de información clara. De esta necesidad surge la aplicación de la Paleopatología, disciplina que en 1913 es definida por el egiptólogo *Marc Armand Ruffer*, como; *la ciencia de las enfermedades cuya existencia puede demostrarse mediante el estudio de sus restos fósiles o momificados* [I.8].



**Figura I.3.-** Estudio de la enfermedad del Hombre Prehistórico

Gracias a los conocimientos que aporta esta rama de la Medicina, se ha documentado que algunas de las enfermedades del esqueleto que afectaron a los antepasados del Hombre son; traumatismos, artritis y artrosis, osteomielitis y neoplasias. Debido a las condiciones de vida, los traumatismos

tienen una elevada presencia, al ser causados por riñas entre diferentes grupos, accidentes o rituales de sacrificio. Las lesiones óseas provocadas por objetos punzocortantes no se observan hasta el período Calcolítico entre el 2 500 a 1 800 a.C., con la implementación del arco y la flecha. Se ha observado en restos fósiles pertenecientes al periodo Paleolítico, el uso de férulas rudimentarias en miembros fracturados. Fue así que la inmovilización se convirtió en un procedimiento general. Al examinar huesos de la Era Neolítica, se han observado fracturas con buena consolidación. Otro resto fósil que aporta información valiosa son las piezas dentarias, su análisis no se enfoca únicamente en la medicina. Asimismo, se muestra el tipo de alimentación que llevaban. Las mandíbulas encontradas, pertenecientes al período Paleolítico se encuentran con daños severos desde la raíz indicando infecciones. Así como, desgaste importante de las mandíbulas y dientes. En el período Mesolítico, las mujeres eran las encargadas de moler granos, los molinos usados en la Prehistoria consistían de un canto rodado con el cual trituraban sobre losas de piedra, (Figura I.4) se ha llegado a la conclusión de que esta actividad condicionó a un 70% de los hallazgos encontrados de mujeres a padecer artritis y artrosis [I.9].



**Figura I.4.-** Molino prehistórico y su uso en la vida cotidiana

Las malformaciones y afecciones congénitas son identificadas en cuerpos exhumados. Se incluyen las enfermedades que se presentan en el nacimiento o durante la primera infancia. Los estudios paleopatológicos se ven en la dificultad de poder identificar si la patología fue congénita o hereditaria o si la enfermedad se manifestó después del nacimiento. Algunas de las malformaciones que se identifican son la microcefalia vera, macrocefalia, hidrocefalia de la cual no se han registrado muchos casos del periodo Prehistórico, lo que podría deberse a la fragilidad que provoca la enfermedad en el hueso. También se registran otras alteraciones morfológicas, como la craneostenosis, que da lugar a morfología irregular del cráneo. Dentro de las malformaciones sistematizadas se encuentra la acondroplasia, enfermedad hereditaria que da origen a un tipo de

enanismo, en el que sólo las extremidades son cortas. Mientras que la cabeza y el tronco son de tamaño normal. Asimismo, se registran numerosas anomalías en la columna vertebral, como la escoliosis y la espina bífida. En cuanto a las extremidades se presenta el pie equino varo [I.10].

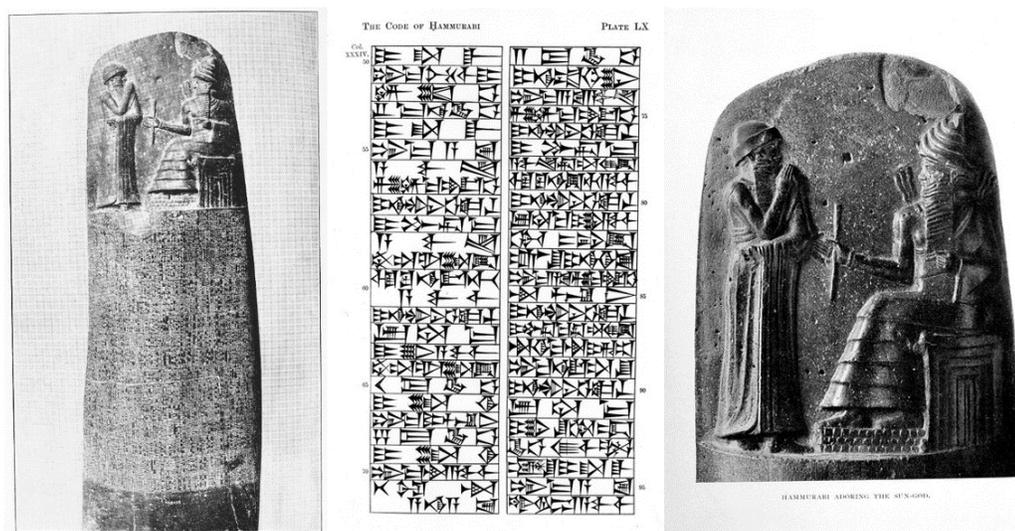


**Figura I.5.-** Cráneo macrocéfalo, vista lateral y frontal [I.10]

### **I.3.- El inicio del desarrollo de la Medicina en las civilizaciones antiguas**

La Edad Antigua fue un periodo marcado por el origen de la civilización, ocurrió a partir de los primeros asentamientos, formando ciudades cerca de valles y ríos, lo que les brindó a los habitantes tierra fértil, que con trabajo y los conocimientos que habían desarrollado les permitió aprovechar los recursos producidos en la Tierra. También fueron importantes actividades como la división del trabajo, el uso de metales y el crecimiento urbano. Con el inicio de la Arquitectura se hicieron calles que conectaban las construcciones, la Escritura con símbolos abstractos fue crucial para consolidar y facilitar la comunicación. Este desarrollo social y cultural ocurrió en un lugar situado entre el río Tigris y el Éufrates, se le llamó Mesopotamia, fue en esta zona que el pueblo Sumerio creó la primera civilización del mundo [I.11]. En cuanto a la Medicina mesopotámica, se practicaba la magia por sacerdotes o adivinos que mediante conjuros protegían contra espíritus malignos y podían interpretar el mal agüero. Por otra parte, los Médicos operaban y suministraban medicamentos, incluso existían manuales con diagnósticos y procedimientos para combatir algunas enfermedades. En 1800 a.C. Babilón alcanzaría la soberanía sobre toda Mesopotamia. El uso del *código Hammurabi* vino con esta unificación, el cual hacía referencia a los tratamientos médicos y la responsabilidad de estos. En el código se especificaba el pago que recibirían los Médicos y los castigos si se equivocaban en el tratamiento o en el caso que el paciente no mejorara. A pesar de que los castigos eran severos, el *código Hammurabi* proporcionó el concepto de mala práctica o mal praxis. En el año 1027 a.C. Babilonia entra en decadencia debido al mal gobierno de reyes

incapaces de hacer frente a las invasiones de los asirios. El territorio cayó bajo dominio de los persas en 539 a. C. [I.12].



**Figura I.6.- Código Hammurabi**

En la misma época, pero ahora situándose en Egipto, la evolución dependió de la adaptación al ambiente desfavorable de aire seco y escasas lluvias. El río Nilo facilitó esta adaptación, la conexión del Nilo con el sistema hidrográfico abisinio y con grandes lagos provocaron la crecida anual del río, como consecuencia el Nilo depositaba sedimentos de origen abisinio abonando cada año las tierras egipcias. El Nilo, al ser navegable permitía la comunicación entre la población [I.13]. La esperanza de vida en el Egipto antiguo tenía un promedio entre los treinta y ocho y treinta y nueve años. Diferentes enfermedades, así como actividades frecuentes y peligros afectaban la salud de los pobladores. La Medicina egipcia en el intento de dar alivio al dolor utilizaba recetas y remedios. La creencia de que la enfermedad era un castigo divino hizo que se conjagara la ciencia con lo místico [I.14]. El *papiro de Ramesseum*, que data de 1980 a. C. y que es el más antiguo de los papiros encontrados hasta ahora, contiene recetas médicas y mágicas. En las cuales indica un método para separar al bebé de la madre al nacer. Así como, explica cómo detectar un embarazo y como deducir el sexo del feto. En 1850 a. C. se puede ubicar el *papiro de Kahoun*, en él se presentan diferentes temas, pero el de mayor incidencia es sobre la Ginecología y Obstetricia. Se describen enfermedades femeninas y sus tratamientos, entre los cuales se indica el uso de pastas y algunas drogas. En 1862 fue hallado en Tebas el primer *papiro quirúrgico* que presentaba casos de Cirugía incluyendo diagnóstico y tratamiento. En él se estudia de forma racional las lesiones, heridas, fracturas y luxaciones de todo el cuerpo. La inspección era adecuada y las pruebas que se hacían

conducían al diagnóstico y a las conclusiones sobre el padecimiento. El segundo papiro con más importancia respecto a su contenido es el *papiro de Edwin Smith*, su datación es del año 1500 a. C., es un texto quirúrgico que contiene 22 páginas en las cuales describe el tratamiento de fracturas en cráneos, contusiones y heridas. Asimismo, se explican métodos para el vendaje, reducción y entablillado de fracturas. Contiene prescripción de cosméticos para el cuidado de la piel y la fabricación de los mismos. Pese a la inclusión de ocho exorcismos en el *papiro de Edwin Smith*, su contenido en general no atribuye las enfermedades a las causas mágicas o divinas. Por lo tanto, su información fue relevante para el futuro desarrollo de ciencia [I.15]. La costumbre de embalsamar cuerpos para momificarlos ayudo a revelar posteriormente las enfermedades que padecían los egipcios, entre ellas se enlista la gota, cálculos en vesícula y vejiga y la sífilis. Las enfermedades más comunes en el sistema músculo-esquelético eran la tuberculosis, la artritis, las infecciones de los huesos y las deformaciones congénitas [I.16]. Existe evidencia sobre el padecimiento de osteogénesis imperfecta que data del año 1000 a. C., se trata de una momia de un infante encontrada en Egipto que actualmente se encuentra en el museo de Londres [I.17].



**Figura I. 7** Momia humana egipcia con osteogénesis imperfecta.

En la historia griega más antigua, no existía una gran diferencia entre lo divino y lo humano. Se relacionaron diferentes divinidades con la Medicina. En primer lugar, *Apolo*, inventor del arte de curar. También se encuentran personajes como *Quirón*, distinguido por sus conocimientos y gran sabiduría y *Asclepios*, cuya popularidad fue muy grande gracias a su habilidad para curar y para elaborar remedios, de acuerdo a la mitología, su habilidad era tal que conseguía incluso resucitar a los muertos. *Hades*, Dios del inframundo reclamó a *Zeus*, quien dio fin a la vida de *Asclepios*

---

lanzándole un rayo. *Asclepios* se consideró después un Dios del Olimpo y recibía gran adoración de enfermos que buscaban sanación [I.18].

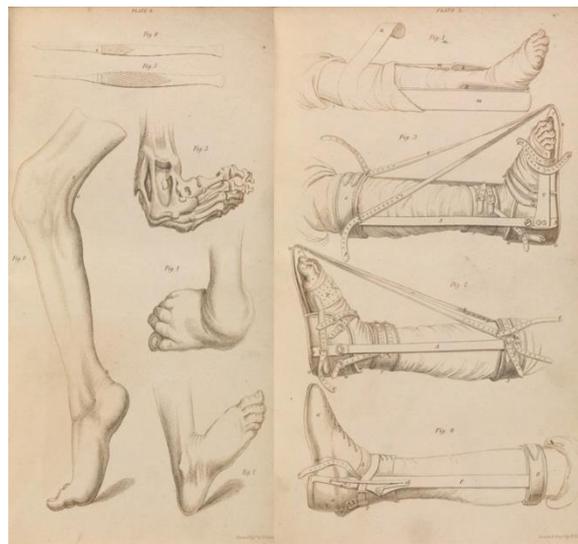
El médico *Alcmeón* nacido en Crotona y quien fue discípulo de *Pitágoras* es considerado el primer Investigador y escritor Médico de la época *pre-hipocrática*. En su obra es notoria la influencia pitagórica, pues describe la existencia de un temperamento psíquico, *el alma*, que está unido al cuerpo. *Alcmeón* describe al cuerpo humano como un microcosmos y que la base de la salud es el equilibrio de los poderes; frío y calor, humedad y lo seco, amargo y dulce, etc. Por lo tanto, la enfermedad se presentaría con el exceso de alguno de estos factores [I.19]. Por otro lado, el ejercicio médico y quirúrgico es observable en las descripciones del poema homérico que se ha relacionado con la serie de libros conocidos como *Corpus Hipocráticos*, nombrándolo así en honor al Médico al que se atribuye la obra. Los escritos del *Corpus Hipocráticos* se redactaron entre el año 420 a. C. y el 350 a. C. y es el primer tratado en el que la Medicina tiene una base científica sólida. Mientras que el escenario en el cual la obra la *Ilíada* se desarrolló fueron conflictos bélicos y después la Edad Oscura. Estos acontecimientos influyeron en la forma en la que la enfermedad se concibe, pues se pensaba que era un castigo divino. La peste es la muestra más clara de esta creencia que de acuerdo a la *Ilíada* fue provocada por las flechas de *Apolo* al haber ofendido *Agamenón* al sacerdote *Crises* por raptar a su hija *Criseida*. Este supuesto del origen divino de la enfermedad se encuentra en diferentes párrafos de la obra *La Ilíada*, en ocasiones enfermado y en otras favoreciendo a los enfermos y curándolos [I.20].

*Hipócrates* descendiente de *Asclepios*, conoció gracias a sus viajes la Medicina practicada en Egipto y la ciencia desarrollada por *Pitágoras*, con estos conocimientos en su regreso a Grecia fundó una escuela en donde ejerció su profesión de Médico y recopiló una serie de libros en los cuales se encuentra una descripción lógica y científica de las causas de toda enfermedad. Además, se muestra mayor conocimiento de la Anatomía, imprescindible para realizar un diagnóstico de la lesión o padecimiento en cuestión [I.21]. *Hipócrates* tenía amplio conocimiento para el tratamiento de fracturas, ideó el *banco Hipocrático* (Figura I.8) basándose en sus conocimientos de tracción y contra-tracción, para el tratamiento de fracturas de tibia desarrollo férulas y procedimientos para aplicar en fracturas abiertas, que incluían pomadas y compresas. También usó vendas impregnadas con resinas y ceras para estabilizar las fracturas [I.22].



**Figura I.8.-** Reducción de luxaciones mediante aparatos

Se describen con un nivel avanzado las luxaciones del codo, del hombro y luxaciones recidivantes, fracturas de clavícula, cadera, columna y dislocación de codo, tomando en cuenta los trastornos nerviosos. Se estudiaban las deformaciones, entre ellas se describe el pie varo congénito o *pie zambo* (Figura I.9), que es una enfermedad congénita del pie en el cual aparece una punta y la planta del pie girada hacia adentro. Es importante señalar en esta época el reconocimiento de enfermedades congénitas y el tratamiento terapéutico prescrito. La corrección de la curvatura era esencial y debía mantenerse durante tiempos prolongados. Las deformaciones de la columna vertebral provocadas por enfermedades, traumatismos o enfermedades congénitas, también se describen en el *Corpus Hipocráticos* [I.23].



**Figura I.9.-** Ilustración del *pie zambo* (*pie equino varo*) y tratamiento para la corrección

Otro de los Médicos más importantes para el mundo antiguo es el griego Galeno, su trabajo estuvo enfocado a la Fisiología. Desarrolló un modelo anatómico humano que en la Edad Media se convertiría en una guía médica y en la base de planes de estudios de las universidades médicas, fue gran intérprete de la *cultura hipocrática*. Aunque algunas de sus ideas eran incorrectas debido a la falta de práctica de disecciones en humanos, que estaban prohibidas en este periodo. En su obra *Galeno* describe *disertaciones anatómicas*, con las cuales amplió el conocimiento sobre anatomía con disecciones que practicaba sobre animales. De forma sistemática estudia el concepto, la estructura del enfermo, la Etiología, los síntomas, clasifica y ordena las enfermedades con causas internas, externas y conjuntas. En la terapia descrita en los textos galénicos se recomienda una buena higiene, la gimnasia, ejercicios respiratorios y la dieta [I.24].

En Italia en el año 753 a. C. surgió una pequeña ciudad; Roma. Los sistemas económicos y culturales de los países conquistados influyeron en la formación de bases sólidas que colocaron a Roma como una potencia social y económica. A partir del Siglo I e inicios de la nueva era Roma pasaba por la última fase de la historia antigua [I.25]. Los romanos no tuvieron grandes avances en la Medicina. Los Médicos que ejercían en Roma eran de origen griego y la profesión era considerada denigrante. Sin embargo, el verdadero aporte de Roma fue la salud pública [I.26]. Instituyeron un sistema de drenaje que se vaciaba en el río Tíbet, se prohibieron los entierros dentro de los límites de la ciudad, los ediles tenían la responsabilidad de mantener limpias las calles y distribuir el agua [I.27].



**Figura I.10.-** Hospital de campaña e instrumentos médicos más usados la antigua Roma

Grandes acueductos proporcionaban millones de litros de agua al día, la distribución en forma general era buena. El agua era usada para consumo humano y en sanitarios, también tenían un

---

sistema de recolección de agua pluvial. Las condiciones sanitarias eran buenas tomando en cuenta que los romanos desconocían la existencia de bacterias. También se abrieron los primeros hospitales militares. Cuando las batallas militares tenían lugar en las cercanías de Roma, los heridos eran transportados a la ciudad para ser atendidos. La expansión territorial dificultó el traslado de pacientes, así que crearon un espacio dentro del campo militar con la única finalidad de atender pacientes. Los hospitales civiles surgieron tiempo después, inicialmente atendían solo a ciudadanos importantes y posteriormente brindaron servicio a la población en general [I.27].

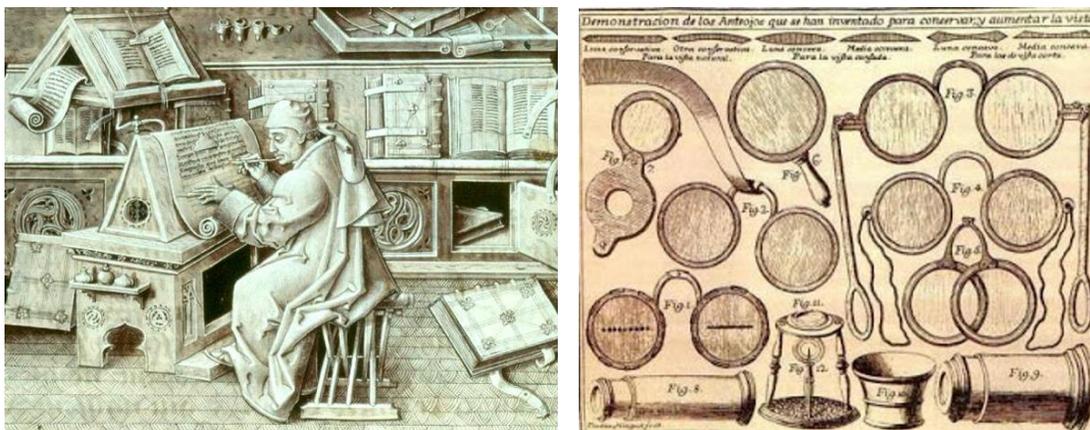
Desde sus orígenes la Ciencia Hindú se ha desarrollado de forma paralela e independiente. La Medicina occidental desarrollada principalmente en Grecia, ha considerado a la Medicina oriental como paliativa. Mientras que la Medicina occidental se ha basado en la cuantificación, la clasificación de enfermedades y descripciones detalladas de las afecciones, la Medicina oriental se ha tornado cualitativa, enfocándose en un equilibrio general. El *Athar veda* es uno de los primeros textos hindús que hablan sobre la Medicina, en él se indica el uso de distintas hierbas para tratar dolencias. El *Athar veda* es uno de los textos sagrados antiguamente llamados *Vedas*. Al analizar los textos védicos de origen hindú se observan tratamientos genéricos, sin importar la naturaleza de la enfermedad e incluyen la práctica del yoga. *Ayurveda*, que significa *conocimiento completo para una vida más larga*, se convierte en un escrito análogo al *Corpus Hipocraticus*. Sus textos más importantes, pertenecen a las escuelas *Charaka* y *Sushruta*. De acuerdo a *Charaka*, la salud y la enfermedad no están predeterminadas y la vida puede prolongarse con el esfuerzo humano. En los textos de *Sushruta*, se encuentra un caso de análisis científico, que consiste en la observación de la preferencia de insectos a la orina de pacientes enfermos de diabetes. Debido a la sobrecarga de azúcar en los fluidos, de esta forma, surge el término orina melosa [I.28]. Durante el periodo brahmánico que abarcó de 800 a.C. al 1000 a.C., la medicina hindú se destacó por su alto nivel en la Cirugía, se practicaba la extirpación de tumores, punción de líquidos acumulados, eliminación de depósitos de pus y sutura de heridas, su práctica en la cirugía plástica era excelente [I.29].

Por otro lado, según la tradición china, tres emperadores dieron origen a los primeros escritos inspirados en Medicina. En primer lugar, el emperador *Fu Xi* y su obra *I Ching*, el libro de las mutaciones, que en esencia menciona que el mundo está en constante cambio y mutación; seguido por *Shen Nong*, autor de *Shen Nong Ben Cao Jing*, que se traduce como; el tratado de materias médicas de *Shen Nong*. Su aportación fue sobre las técnicas de agricultura y las bases para el

desarrollo de la Farmacopea. Finalmente, el popular emperador *Huang Di* o *emperador amarillo*, quien fundamentó la medicina china y la Acupuntura. De los años 722 al 481 a. C., aconteció el periodo Primaveras, en el que inicia el desarrollo de la Medicina gracias a su filosofía, pero es hasta el periodo de los Reinos Combatientes entre los siglos 453 al 221 a. C. que la Medicina china llega a ser Medicina científica. Aunque es muy probable que la Medicina china formara sus principios alrededor de ciencias como la Astronomía y las Matemáticas, la Filosofía fue primordial para el desarrollo Médico [I.30].

#### I.4.- La Edad Media, impulso hacia la medicina científica

Tras la caída de Roma diferentes grupos se asentaron en áreas que conservaban gran tradición cultural romana, de la cual adoptaron algunos elementos y después se convirtieron al cristianismo. Gracias a la unión con la Iglesia Católica, estos pueblos fueron base para la fundación de Europa y se convirtieron en pueblos importantes para la preservación de la cultura romana. Posteriormente el periodo denominado la Baja Edad Media se caracterizó por las cruzadas, que propiciaron la renovación del comercio, la industria y provocaron la crisis del sistema feudal durante los Siglos XI al XV [I.31].



**Figura I.11.-** Monje copista medieval y primeros modelos de gafas en la época medieval

Durante la Edad Media la práctica médica se vio reducida debido a la idea de que las causas de la enfermedad eran castigos divinos, posesiones demoniacas o resultado de brujería. Los monjes cristianos enclaustrados en monasterios a quienes se les permitía aprender y adoctrinar se dedicaron a la elaboración manual de textos médicos, actividad que permitió conservar el saber occidental [I.32]. La precisión que requiere la lectura y la escritura, así como su desarrollo en condiciones paupérrimas causaban el deterioro irremediable de la vista. Los conocimientos de Óptica y los

---

avances en la fabricación de vidrio en el Siglo XIII, dieron paso a la creación de las gafas [I.33]. Por otro lado, la civilización islámica tuvo gran relevancia e influencia al incursionar en la ciencia médica gracias al desarrollo de conocimientos en áreas como la Anatomía, la Oftalmología, la Farmacología, la Cirugía y las ciencias Farmacéuticas. Se puede identificar una jerarquía en los Médicos, la cual encabezaban los Médicos con formación universitaria, seguido por los Cirujanos entrenados en manualidades, barberos Cirujanos y especialistas como Dentistas, Ocultistas y parteras. Otro acontecimiento que tuvo gran impacto en la población europea durante la Edad Media fue la epidemia de la peste bubónica. Algunas ideas extraídas de la Medicina griega clásica intentaban explicar dicha enfermedad con la existencia de miasmas, que eran la contaminación del aire con materia orgánica en descomposición, de esta forma la enfermedad se transmitía por medio de la respiración; se le atribuyó también un origen astrológico. Sin embargo, fue hasta el Siglo XIX que los Bacteriólogos *Kitosato* y *Yersin* descubrieron que la peste bubónica se transmitía por parásitos como las pulgas, que se alojaban en roedores y mediante su picadura transmitían la enfermedad a los humanos [I.34]. Definitivamente el cambio más importante para la obtención del conocimiento científico fue la creación de las primeras universidades. Dentro de los monasterios permanecieron resguardadas obras de la cultura clásica, gracias al trabajo de los copistas. Aunque la práctica médica de los monjes no contaba con gran experiencia, los monasterios se convirtieron en un asilo contra la peste. La Escuela de Salerno se fundó en un hospital antiguo que era operado por monjes benedictinos. Existe la idea de que fueron cuatro Médicos de nacionalidades judía, griega, árabe e italiana quienes la fundaron, aunque este crisol cultural podría ser simplemente una representación simbólica. Las obras con mayor relevancia producidas en la escuela Salernitana fueron el tratado de cirugía de *Ruggero di Fruggardo* en el cual se describe un método de anestesia que consiste en empapar esponjas con opio, beleño y mandrágora. Así como, el poema *Régimen Sanitatis Salernitani* en el cual se recopilan consejos terapéuticos como el lavado constante de manos [I.35]. Poco tiempo después la enseñanza dejó de apegarse a la religión y era necesario que los conocimientos se comprendieran y demostraran como verdades mediante la razón. Inicialmente se usaron los principios platónicos y aristotélicos. La Escuela Médica Salernitana dio paso a universidades con mayor relevancia, que fueron la de Bolonia y París. La universidad de Bolonia tuvo una importante actividad en el área quirúrgica. El libro *La Cyrugia*, escrito en 1275 por *Guglielmo Saliseto*, se consideró el mejor libro de anatomía desarrollado antes del renacimiento, fue gracias a estos conocimientos que la cirugía tuvo un gran progreso. Desde entonces el procedimiento para tratar fracturas y otras lesiones fue más exacto y preciso. Para finales del Siglo

XIV, *Guy de Chauliac* profesor de la Universidad de Monstperrier, describe en su libro el uso de pesas y poleas para la tracción continua en el tratamiento de fracturas de fémur. Asimismo, el desarrollo de material quirúrgico [I.36].

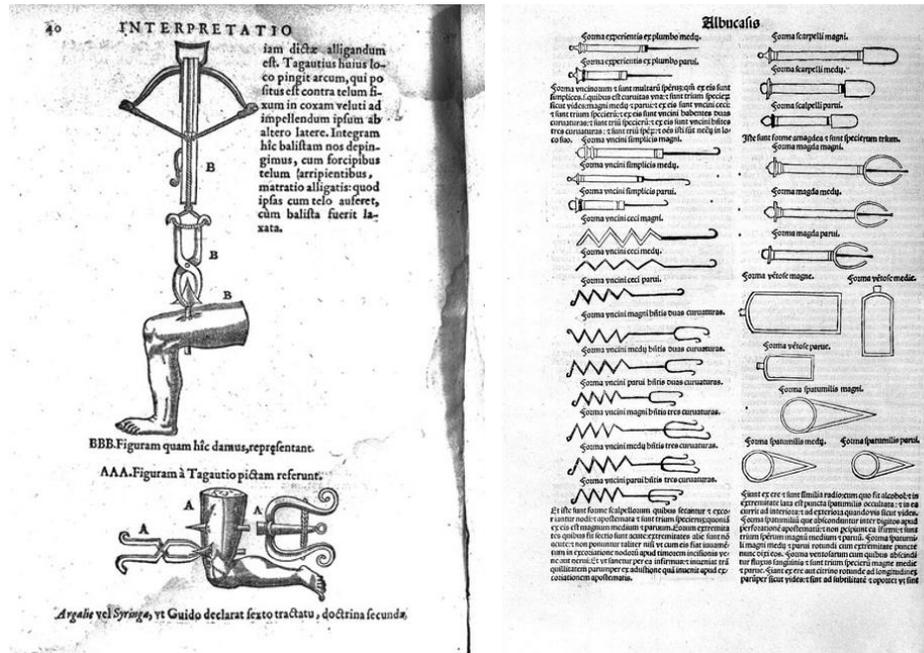


Figura I.12.- Procedimiento y material quirúrgico exhibido en *Chirurgia Magna*

### I.4.1.- La medicina en el Nuevo Mundo

En el Siglo XV las expediciones del imperio español llegaron al Nuevo Mundo en su intento por extender su control enviaron diversas embarcaciones con el objetivo de defender sus territorios. Las exploraciones no se limitaron a la búsqueda de Oro y Plata, también se interesaron por la gran riqueza de la historia natural y la Medicina. La expedición hecha por el Protomédico *Francisco Hernández* a la Nueva España en los años 1571 al 1577 fue con el propósito de estudiar Botánica Medicinal e investigar prácticas de curanderos o yerbateros [I.37]. *Hernández* realizó la primera expedición científico-comercial. Los pueblos mesoamericanos intuyeron conocimientos y una cultura compleja; el desarrollo de la Arquitectura, el Arte, las Matemáticas, la Religión y la Medicina reflejaban su propia cosmovisión. Los mercados en los que era posible encontrar medicina y alimentos, así como animales aún conservaban sus tradiciones. Los Médicos indígenas, llamados *titici* perpetuaban sus conocimientos de forma oral y proporcionaban a los indígenas recursos para la sanación. A pesar de la destrucción de templos y códices a mano de los españoles, la extensa nomenclatura náhuatl de plantas medicinales permanecía en la tradición oral. Después de años de investigación, *Francisco Hernández* recopiló un gran número de manuscritos con la

ayuda de *tlacuilos* (pintores indios). En los cuales quedo plasmada información valiosa sobre el apasionante mundo indígena y su impresionante flora y fauna [I.38]. Los *Hampi-Camayoc* eran los encargados en la cultura Inca de proporcionar remedios y hacer conjuros mediante el uso de plantas medicinales. Practicaban trepanaciones en cráneos con traumas que usualmente sufrían los guerreros después de un combate, usaban la planta de coca antes de alguna operación por su efecto adormecedor [I.39].



**Figura I.13.-** Descripción de las plantas medicinales de la *Enciclopedia Rerum medicarum Novae Hispaniae Thesaurus de Francisco Hernández*

**I.5.- Los grandes aportes durante el Renacimiento**

El Renacimiento fue un movimiento principalmente cultural, tuvo diferentes formas de actividad intelectual, tuvo lugar principalmente en Italia durante el Siglo XV. Las obras que se desarrollaron durante este periodo constantemente se ilustran unas a otras, aunque existía un gran aislamiento intelectual [I.40]. *Paracelso* fue una de las principales figuras pre-copernicanas durante el Renacimiento, aunque la imagen de *Paracelso* fue por mucho tiempo perjudiciada y desacreditada, su influencia y sus aportaciones al conocimiento Médico fueron de gran relevancia, al grado de proponer una confrontación con las ideas galénicas y de esta forma inspirar nuevos principios para el desarrollo de la Medicina y romper con las ideas de la antigüedad. El trabajo de *Paracelso* fue multidisciplinario, pensaba que el Hombre era la analogía del cosmos, de esta forma observaba al hombre como un microcosmos y este tenía lugar en un macrocosmos con características físicas y espirituales, así mismo reconocía el efecto del entorno sobre el hombre. *Paracelso* tenía influencia de la Medicina árabe y judía, en donde la filosofía, la Astronomía y la Alquimia eran fundamentales para los estudios médicos. En este momento la Alquimia, era sólo una pequeña rama para el estudio

de la Farmacología. *Paracelso* se propuso refutar la teoría médica que era enseñada, tuvo gran influencia sobre los estudiantes de Medicina que pronto se convirtieron en sus seguidores. Los paracelsianos, se convirtieron en Médicos reconocidos y se encargaron de la difusión de esta filosofía por toda Europa. Para finales del Siglo XVII, ya se practicaba la terapia química paracelsiana [I.41], haciendo famosa la frase de *Paracelso*; *dosis sola facit venenum*, en donde expresa que el veneno o ciertas sustancias en dosis pequeñas pueden curar padecimientos [I.42].

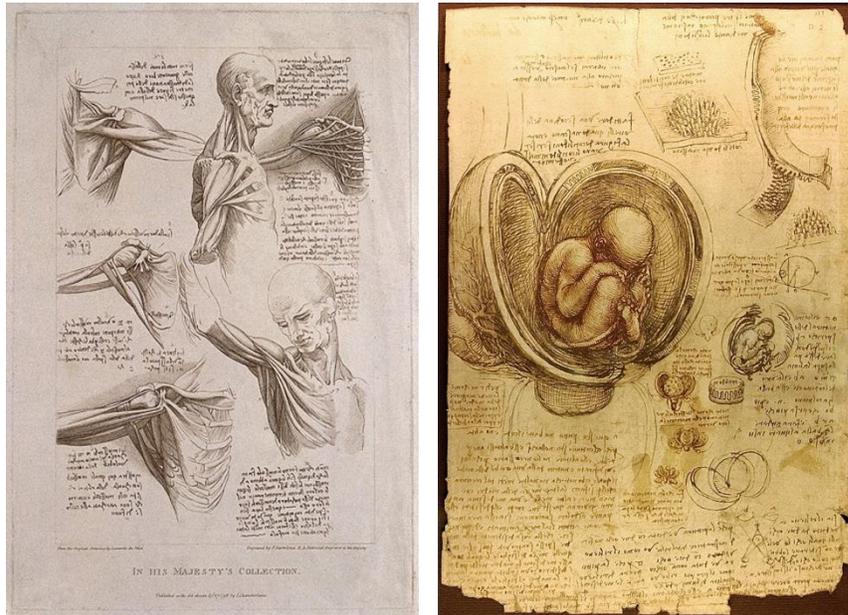


**Figura I.14.-** *Paracelso* y un filósofo tradicional examinando un frasco

### **I.5.1.- Anatomía del cuerpo humano**

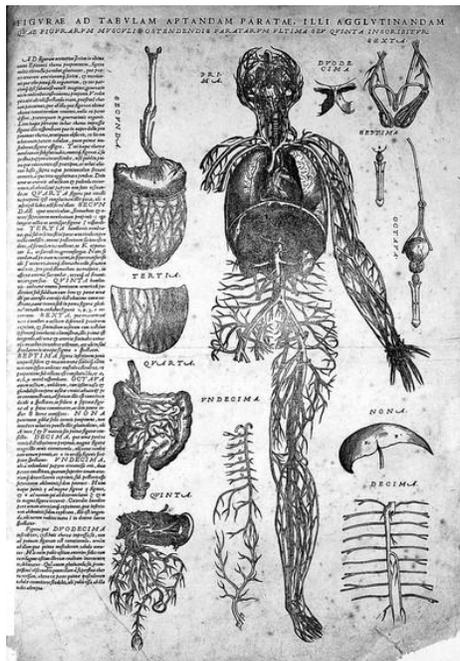
El gran pintor y escultor *Leonardo Da Vinci* formó parte de las personalidades que con su obra difundieron conocimientos médicos. *Da Vinci* trabajó con el médico *Marco Antonio de la Torre*, especialista en Anatomía gracias a su práctica de disecciones en cadáveres. Juntos trabajaron en el desarrollo de un *manual de anatomía y fisiología*, que lamentablemente no se concluyó debido a la muerte del médico, aunque algunos biógrafos afirman que *Da Vinci* continuó haciendo grabados anatómicos que fueron descubiertos hasta muchos años después. En ellos se podía observar a gran detalle el dibujo de nervios ópticos y la conexión del ojo con el cerebro, indicando como se produce la visión. Estudió el corazón y sus válvulas, el estómago, el hígado y los riñones. Los grabados más sobresalientes son los diseños osteomusculares de la cara, tórax, brazos y piernas. *Da Vinci* era gran crítico de la anatomía de *Galeno*, pues estaba llena de errores [I.43]. También estudió las fases embrionarias del ser humano, definiendo por completo la anatomía, desde el sistema óseo hasta los órganos internos, revolucionando las ideas concebidas sobre el origen y formación de los humanos. La obra que alcanzó gran reconocimiento y fama es *El Hombre de Vitruvio*, también conocido

como *Estudio de las proporciones ideales del cuerpo humano*. En la obra se ilustra una silueta en posición frontal en donde se observan proporciones geométricas por excelencia [I.44].



**Figura I.15.-** Ilustración de miembros superiores, tórax, cabeza y cuello, y feto humano

Otra figura importante en la Anatomía fue el Médico *Andrés Vesalio*, graduado de la Universidad de Padua, Italia, que marcó una nueva era de la Anatomía. Pronto se popularizó su práctica de disección de cadáveres en un anfiteatro rodeado de estudiantes de Medicina, explicaba la conformación del cuerpo humano, confirmando o corrigiendo la Filosofía galénica.



**Figura I.16.-** Ilustración de *Humani Corpus Fabrica* realizada por *Andrés Vesalio*

Análisis numérico biomecánico de un fémur con patología osteogénica imperfecta ante una colisión

---

Su gran obra *De Humani Corpis Fabrica*, que se basó en observaciones, fue producto de numerosas disecciones y consta de siete volúmenes en los cuales se aprecia una impresionante precisión y realismo. En cada volumen de su obra la temática es diferente, incluye información sobre el esqueleto, las articulaciones, los músculos, el sistema vascular, nervios y órganos abdominales, excluyendo el páncreas y los genitales. El trabajo de *Andrés Vesalio* fue el pilar para la enseñanza de Anatomía moderna y el desarrollo de la cirugía [I.45].

### **I.6.- El inicio de la Cirugía como ciencia**

A partir del Siglo XIII el número de Cirujanos egresados de las escuelas de Medicina era mayor. El gremio de los Barberos Cirujanos se reducía a aquellos prácticos no Médicos que estaban limitados a intervenciones menores. Sin embargo, se les permitió seguir trabajando hasta 1731 cuando el rey *Luis XV* prohibió dicho ejercicio [I.46]. *Ambrosio Paré*, considerado el *padre de la Cirugía Moderna*, inicio su carrera como aprendiz de Barbero Cirujano, ingreso posteriormente a la Escuela Médica de San Cosme y tuvo la oportunidad de trabajar en el hospital Hotel-Dieu de París. Tiempo después se incorporó al ejército como Médico Cirujano, situación que lo llevó a implementar un tratamiento para las heridas con arma de fuego, consistía en la aplicación de clara de huevo, agua de rosas y esencia de trementina.

Dentro de sus procedimientos estaba la ligadura y sutura de vasos, sustituyendo la cauterización que era muy común. También diseño prótesis de piernas y brazos (Figura I.17). Escribió diversos libros que trataban especialmente sobre obstetricia [I.47]. *Paré* sugirió un tratamiento similar al de la *técnica hipocrática* para la corrección del *pie zambo*, con el uso de vendajes y zapatos correctivos. Así como, prescribió el uso de órtesis posterior a la corrección. Dando un tratamiento adecuado para este padecimiento que durante la Edad Media fue tratado inadecuadamente por Barberos Cirujanos y hueseros [I.48].

El nombre de Ortopedia no era usado hasta la publicación de la obra de *Nicholas Andry*, en donde emplea por primera vez el término ortopedia que deriva del griego *ortos recto* y *paideia educación del niño*. Por lo tanto, el vocablo es privativo del niño. Propuso un método para tratar la curvatura excesiva de la pierna de un niño colocando una placa de Hierro en posición cóncava a la curvatura y atándola a un tallo para corregirla. Fue gracias a su práctica la implementación del emblema de la Ortopedia, que consiste en un árbol torcido y atado con una cuerda a un poste recto [I.49].

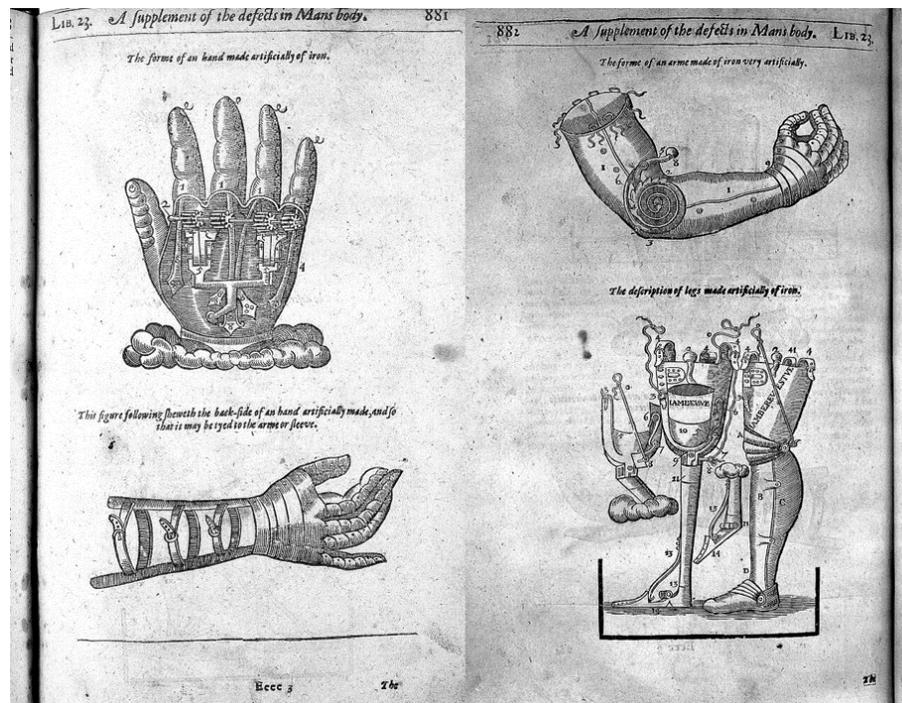


Figura I.17.- Prótesis de pierna, brazo y mano diseñadas por *Ambrosio Paré*

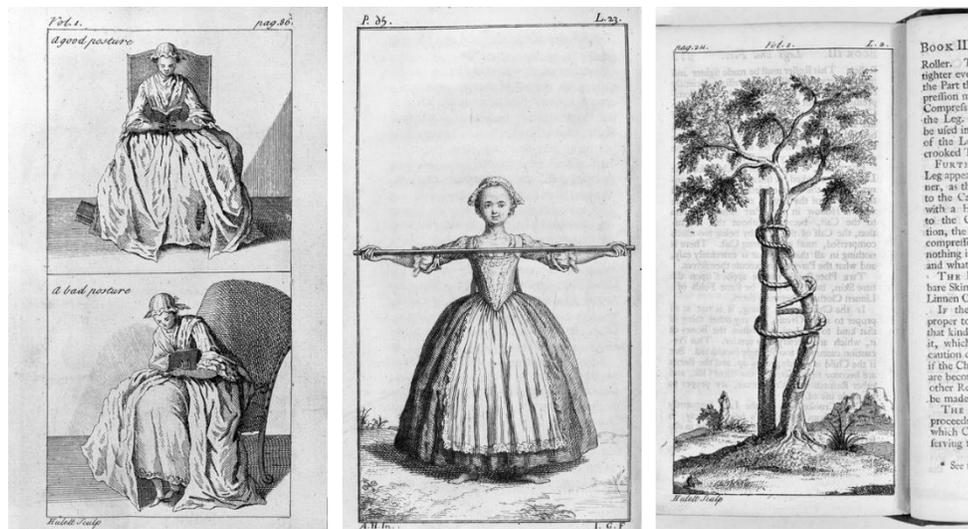


Figura I.18.- Corrección de postura y emblema de la ortopedia

Posteriormente diferentes Médicos aportaron sus conocimientos para el desarrollo de nuevas y mejores técnicas y procedimientos dentro de la Cirugía y la Ortopedia. Como es el caso de *Bartolomé Hidalgo de Agüero*, quien practicó la unión de heridas para que su cicatrización fuera más rápida, más adelante los Cirujanos *Morel* y *Jean Louis Petit* modificaron la técnica de amputación añadiendo un torniquete antes de la operación, reduciendo el número de muertes por hemorragia [I.50].

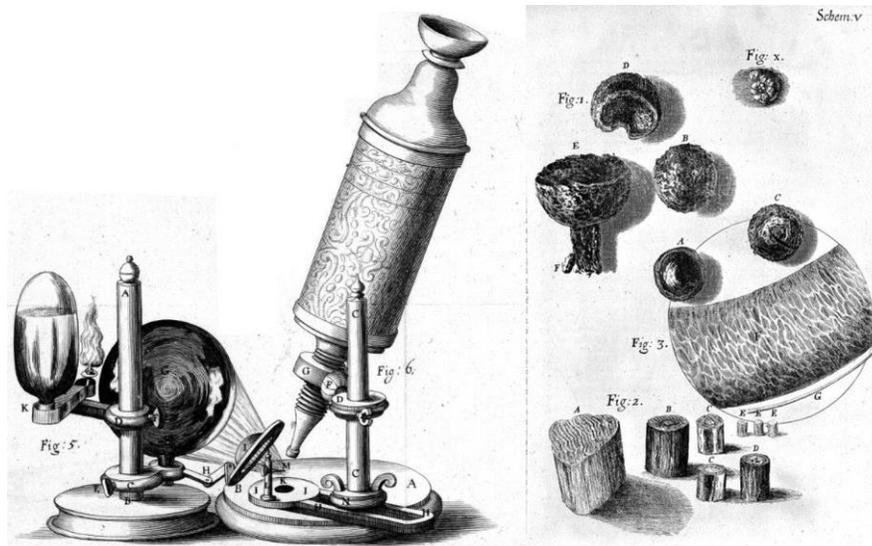
En el año 1780, la Ortopedia se reconoce como una especialidad cuando *Jean André Venel* inaugura el primer instituto para el tratamiento de deformidades esqueléticas [I.51]. En la primera mitad del Siglo XVII surgieron dos corrientes de pensamiento que conducirían al establecimiento del método científico experimental. El Filósofo *Francis Bacon de Verulam* fue el fundador de una de las corrientes fundamentales durante el periodo Barroco (el Empirismo), en el cual la observación sistemática se convierte en un instrumento que aporta explicaciones claras, libres de asuntos metafísicos. Por otro lado, el Filósofo *René Descartes* fundó el Racionalismo, corriente que pretende construir principios para guiar una investigación por medio de la claridad, la intuición y la evidencia. No obstante, de forma independiente ni el racionalismo ni el empirismo tienen herramientas suficientes para guiar una investigación y en las investigaciones de *Galileo Galilei* es en donde convergen estas dos corrientes ejemplificando el método científico [I.52]. Durante la Historia es recurrente el olvido y la repetición de saberes y la Cirugía no fue la excepción. Debido a la importante cantidad de escuelas, la Cirugía italiana mantiene su nivel de progreso. Los Cirujanos más notables son; *Marco Aurelio Severino* por su método de anestesia por congelación y *Cesare Magati* por su experiencia en el cuidado de heridas [I.53].

En cuanto a la Cirugía inglesa, *Sir Percival Pott* publicó una monografía sobre la enfermedad conocida actualmente como escoliosis que presenta lesiones en la columna vertebral formando abscesos y hundimientos en las vértebras (Figura I.19), provocando en muchos pacientes de la época una joroba [I.54]. En el año 1650, los ingleses *Francis Glisson* y *Daniel Whistler* publican una monografía sobre el raquitismo. Pero es hasta el Siglo XX cuando se descubre que la carencia de vitamina D podría ser la causa de esta enfermedad por lo que se recomienda el consumo de aceite de bacalao y la exposición al sol como prevención y tratamiento [I.55]. *Antonio Gimbernant* y *Arbós* fue el encargado de fundar en Madrid en el año 1778 el Colegio de Cirugía de San Carlos convirtiéndose en director de operaciones y álgebra quirúrgica, actualmente llamada traumatología [I.56]. Mientras que la microscopía fue un gran avance para el desarrollo de la Histología, con la producción de vidrio vino el desarrollo de los primeros microscopios, dando acceso al ojo humano a un mundo que era completamente desconocido. *Robert Hooke* observó por primera vez células muertas en un corte que realizó a un corcho, con la ayuda de un microscopio analizó las cavidades formadas en el corcho, a las cuales nombro células (Figura I.20). Sin embargo, fue hasta años después que el anatomista *Marcello Malpighi* observó células vivas mediante el estudio de tejidos vivos. Posteriormente, *Anton Van Leeuwenhoek* descubrió en 1676 las bacterias, que fue un gran

avance para la Biología y la Histología. Paso la mayor parte de su vida mejorando lentes y técnicas para la observación. Así como, la primera observación de un hueso, describiendo una serie de tubos que lo conformaban. Finalmente, el Médico anatomista *Clopton Havers* explicó un sistema que consiste en una estructura con dos poros formados paralelamente, con el supuesto de que su función era transportar aceite medular [I.57].



**Figura I.19.-** Fotografía de niña con escoliosis, columna deformada



**Figura I.20.-** Microscopio de *Robert Hooke* y fisiología de cuerpos diminutos

Otros aportes relevantes para la Histología y la Medicina fueron los estudios del Médico *Niels Stensen*, quien descubrió en la glándula parótida un conducto excretor, igualmente refutó la idea de que el alma se encontraba en la glándula pineal como pensaba *René Descartes* y explicó el

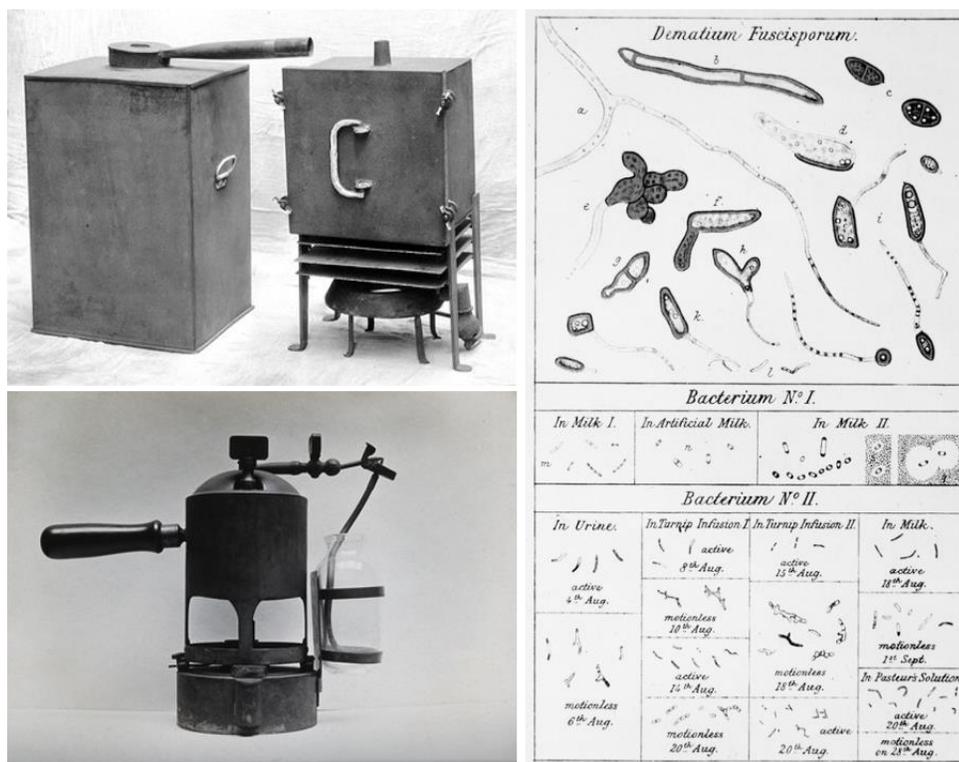
---

funcionamiento del sistema músculo-esquelético con fórmulas matemáticas [I.58]. Gracias al uso del microscopio el sistema neuromuscular y esquelético. Así como, las enfermedades relacionadas a ellos pudieron ser estudiadas con nuevos conocimientos, brindando aportes a la Cirugía ortopédica, que fueron tan importantes dando inicio a la Medicina moderna, considerando que la modernidad es el resultado de conocimientos obtenidos y dando oportunidad al progreso de las diferentes ramas de la medicina. *Stephen Hales* observó en 1727, que el crecimiento de los huesos largos era longitudinal sólo en las extremidades. Posteriormente *Duhamel* y *Haller*, observaron el alargamiento intersticial en el proceso de crecimiento. A mediados del Siglo XVII en la publicación de Anatomía de Cheselden se explica que los huesos comienzan a osificarse alrededor de cada fibra para después alargarse hacia las extremidades y con la adición continua de materia osificante los huesos aumentan su dureza. Pero es hasta 1858 cuando se publica la primera descripción completa del mecanismo básico de crecimiento por *Müller* [I.59].

Con los aportes del científico francés *Louis Pasteur* se daría uno de los cambios científicos y tecnológicos más importantes a nivel mundial. *Pasteur* con sus investigaciones dio inicio al estudio de la microbiología, rama importante para la industria alimenticia, con la práctica de la pasteurización de alimentos y en Medicina brindó conceptos como la asepsia y la esterilización aplicada a métodos y técnicas médicas, posteriormente surgiría la vacunación [I.60].

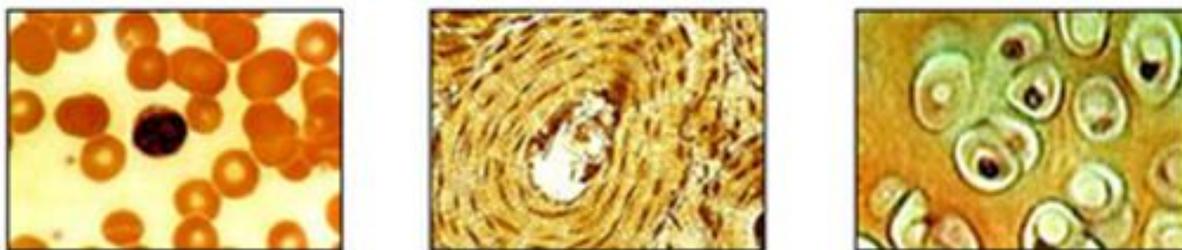
Hasta el Siglo XIX la anestesia era desconocida, los pacientes eran embriagados e inmovilizados, las curaciones se realizaban con hilazas o trozos de tela contaminados, provocando supuración en las heridas. Las operaciones se realizaban en habitaciones sucias, el lavado de manos era poco frecuente y los instrumentos quirúrgicos eran usados en múltiples intervenciones sin ser lavados. El índice de mortalidad era alto debido a las infecciones y a los fuertes dolores pues no se contaba con una anestesia efectiva [I.61]. *Ignacio Semmelweis* comparó en 1846 la mortalidad hospitalaria de mujeres que habían sido atendidas por parteras con el nivel de mortalidad de mujeres atendidas por Médicos, observó que esta última tenía mayor incidencia debido a la escasa higiene y poca frecuencia en el lavado de manos, se indicó a todos los médicos el lavado de manos antes de las intervenciones reduciendo notablemente el nivel de mortalidad [I.62]. En 1880 se desarrolló la *autoclave Chamberland*, se llamó así en honor a su creador *Charle Chamberland*. La autoclave consistía en un recipiente parecido a una olla. En el cual se hervían los instrumentos quirúrgicos. El cirujano inglés *Joseph Lister* concluyó que las bacterias eran las causantes de infecciones en las

heridas y desarrolló el método de asepsia y antisepsia empleando el uso de calor para la desinfección de instrumental quirúrgico, también uso fenol como antiséptico tanto en instrumentos como en el lavado de manos [I.63].



**Figura I.21.-** Caja esterilizadora o autoclave. Así como spray de vapor y apuntes de *Lister*

De gran importancia fue el Científico *William Harvey*, estudió el desarrollo de diferentes animales vivos. Descubrió en sus investigaciones que los vasos sanguíneos estaban llenos de sangre. También hablo de la existencia de válvulas en las venas cuya función es transportar la sangre en dirección al corazón. *Harvey* fundó la fisiología como ciencia y con los aportes de *Pierre Flourens* y *James Paget*, explicaron el proceso de reparación de las fracturas [I.64]. Mientras *John Goodsir*, afirmó por primera vez que las células conformaban todos los tejidos [I.65]. Insistió en la importancia de la célula como centro de nutrición, fue gran observador de la vida celular. Descubrió la formación de callo en la consolidación de fracturas y las células llamadas osteoblastos, las cuales tienen la función de formar el tejido óseo [I.66]. Con estos acontecimientos empezaba a formarse la primera teoría celular. *Rudolf Ludwig Carl Virchow* decía que las células son capaces de multiplicarse solo a partir de sí mismas y que la vida se resume en actividad celular. *Virchow* describió los tejidos cartilaginoso, óseo y conjuntivo [I.67].



Sangre

Tejido óseo

Tejido cartilaginoso

**Figura I.22.-** Vista microscópica de los tejidos sanguíneo, ósea y cartilaginoso

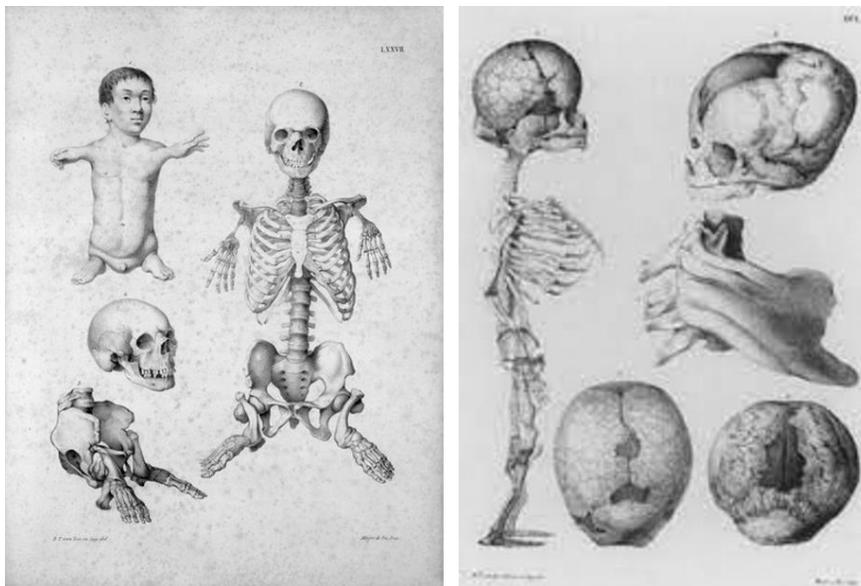
La reabsorción ósea forma parte del proceso de reestructuración del hueso, este remodelado se produce a nivel multicelular. Las células encargadas de esta reabsorción son los osteoclastos que fueron descubiertos en el año 1873 por *Rudolph Albert von Kölliker* [I.67]. Poder comprender la composición estructural ósea fue el objetivo de muchos Investigadores para poder tratar de forma efectiva diferentes patologías.

### **I.7.- La osteogénesis imperfecta, una enfermedad rara**

La investigación histórica sobre la osteogénesis imperfecta es complicada debido a sus numerosos epónimos [I.68]. En el año 900 *Ivar Ragnarsson*, el mítico príncipe danés hijo del rey *Ragnar Lodbrok*, padece esta enfermedad. En la literatura se describen sus *piernas suaves*, razón por la cual su capacidad para caminar era nula y fue transportado en un escudo para poder pelear en las batallas. En la literatura médica del Siglo XVII se encuentran los siguientes epónimos para describir la enfermedad; *mollities ossium*, *osteopsatirosis idiopática*, *osteomalacia congénita* y *fragilitas ossium* [I.69].

El Profesor de Ginecología y Patología *Lobstein* publicó en el año 1833 el libro *Traité d'Anatomie Pathologique*. Se puede encontrar en el segundo volumen la descripción de fragilidad anormal de los huesos, padecimiento al que nombró osteopsatirosis idiopática, que identifico en tres niños de una misma familia. También informó sobre un paciente anciano, quien sufrió 23 fracturas en 30 meses sin dar mayores especificaciones. Posteriormente el Profesor de Anatomía *Willem Vrolik* explica en sus publicaciones *Handbook of pathological Anatomy* y *Tabulae ad illustrandam embryogenesisin hominis et mammalium, naturalem tam abnormem* (Figura I.24) el caso de un recién nacido con hidrocefalia y numerosas fracturas. Menciona que el niño vivió tres días y que sus padres sufrían *lues universalis*, término antiguo para la sífilis. El Profesor *Vrolik* es el primero

en describir ampliamente las características de este padecimiento; explica, al realizar un análisis posterior, que el esqueleto del recién nacido tenía una mineralización deficiente, huesos tubulares ligeramente curvados y delgados. El cráneo presentaba frente ancha, protuberancias y en la parte superior del cráneo observo huesos *wormianos*. Se creía que la osteogénesis imperfecta era un padecimiento postnatal. *Vrolik* fue el primero en atribuir la enfermedad a una razón intrínseca, comprobando después que la alteración era primaria y no degenerativa. En las descripciones de *Vrolik* se hace mención por primera vez al término osteogénesis imperfecta [I.70].



**Figura I.23.-** El esqueleto y cráneo de un infante con osteogénesis imperfecta [I.70]

A finales del Siglo XVII aparecen diversos informes sobre fragilidad ósea anormal y fracturas múltiples. Probablemente la primera descripción científica fue de *Muys* en el año 1751, se trata de un recién nacido con fracturas en las cuatro extremidades. En el año 1788, el Cirujano sueco *Olaus Jakob Ekman* describe en su tesis doctoral el caso de una familia de cuatro generaciones con fragilidad en los huesos y una grave discapacidad. También se describe la extraña condición de *Edmond Axmann* en 1831 quien padecía escleras azules y fracturas sin traumatismo [I.71].

Más tarde se dieron diferentes nombres a la osteogénesis imperfecta, como *síndrome de las escleróticas azules*, *síndrome de Van Der Hoeve* y *distrofia periostal*. En el año 1906, *Looser* intentó clasificar la enfermedad en dos formas; congénita y tardía. Posteriormente refutando el mismo su idea con el argumento de que se trataba de la misma enfermedad. En el año 1949, *Seedorf* clasifica la enfermedad en dos tipos; osteogénesis imperfecta congénita tipo I y osteogénesis

imperfecta tarda, que se subdivide en dos; tipo II, en la cual se produce fractura al nacer y tipo III presentando deformidades menores y fracturas posteriores al primer año de vida. Durante las siguientes décadas, diferentes Médicos e Investigadores hicieron aportaciones relevantes sobre la osteogénesis imperfecta, como la observación de anomalías en la síntesis de colágenos de pacientes, usando microscopia electrónica en 1974. Tres años después *Sykes* encuentra en muestras de pacientes con osteogénesis imperfecta alteraciones en dos tipos de colágeno. En 1983, por primera vez se identifica la alteración genética en uno de los alelos del gen *COL1A1* que codifica parte del colágeno tipo I. Esta investigación dio paso al entendimiento de los mecanismos patogénicos de la osteogénesis [I.71].

Sin embargo, es hasta el año 1979 cuando *Sillence* y colaboradores, establecen otro sistema para la clasificación de la enfermedad. Se realizó esta clasificación después de estudiar a una gran cantidad de pacientes considerando los signos y síntomas que presentaban. Así como, el patrón de herencia. Los avances en genética sobre osteogénesis imperfecta proporcionan suficiente información para una clasificación en correlación del defecto genético con la presentación clínica. En 2009, el *Grupo de Nomenclatura Internacional* para trastornos constitucionales del esqueleto, agregó un nuevo grupo a la clasificación de *Sillence*, el tipo V, en el cual se incluyen características radiológicas diferentes a los otros grupos [I.72].

**Tabla I.1.-** Clasificación expandida de osteogénesis imperfecta [I.75]

Tipo	Herencia	Fenotipo	Defecto genético
<b>Defectos en de colágeno, estructura o procesamiento</b>			
I	AD	Leve	COL1A1
II	AD	Letal	COL1A1 o COL1A2
III	AD	Deformidad progresiva	COL1A1 o COL1A2
IV	AD	Moderada	COL1A1 o COL1A2
XIII	AR	Leve o moderada	BMP1
<b>Defectos mineralización ósea</b>			
V	AR	Variable	IFITMS
VI	AR	Moderada a severa	SERPINF
<b>Defectos en modificación colágeno</b>			
VII	AR	Severa a letal	CRTAP
VIII	AR	Moderada a letal	LEPRE1

Análisis numérico biomecánico de un fémur  
con patología osteogénica imperfecta ante una colisión

IX	AR	Severa	PPIB
XIV	AR		TMEM38B
<b>Defectos en forma de colágeno y cross-link</b>			
X	AR	Severa a letal	SERPINH1
XI/BRKS1	AR	Leve a severa	FK8P10
BRKS2	AR	Moderada a severa	PLOD2
<b>Defectos en desarrollo de osteoblastos con deficiencia de colágeno</b>			
XII	AR	Severa	SP7
XV	AR	Severa	WNT1
XVI	AR	Severa	CREB3L1
XVII	AR	Severa	SPARC
XVIII	AR, link X	Moderada a severa	MBTPS2

### **I.8.- Tratamiento para osteogénesis imperfecta**

El diagnóstico de osteogénesis imperfecta puede presentar dificultades debido a la similitud en la presentación clínica con otras enfermedades, como la osteoporosis idiopática juvenil, *enfermedad de Cushing*, etc. Cuando se ha diagnosticado osteogénesis imperfecta, debe identificarse el cuadro que presenta la enfermedad de acuerdo al grado de fragilidad ósea. El tratamiento para osteogénesis imperfecta tiene el objetivo de reducir el riesgo de fracturas, evitar deformidades y permitir la adaptación del paciente en actividades cotidianas. Para lograr estos objetivos se han probado diferentes tratamientos como el de esteroides anabólicos, hormona del crecimiento o fluoruro de sodio sin obtener un resultado efectivo en el aumento de masa ósea [I.73]. El tratamiento de bifosfonatos endovenosos es el que ha dado mejores resultados en el aumento de masa ósea. El Doctor *Glorieux* fue el primero en desarrollar un protocolo para la administración de pamidronato. Posteriormente, se usó el ácido zoledrónico, cuya ventaja sobre el pamidronato es su aplicación en una sola dosis [I.74]. En el año 2008, un estudio realizado por el Doctor *Lazala* demostró una reducción importante en la incidencia de fracturas en 33 pacientes tratados con pamidronato durante 3 años [I.75].

La disciplina de la Ortopedia interactúa en el cuidado de las fracturas. Así como, en la corrección de deformaciones mediante procedimientos quirúrgicos. Para ello se realizan osteotomías realineadoras que consisten en la colocación de varillas intramedulares con la técnica descrita por

*Sofield y Millar* en 1959. En el año 1977, se describe el *clavo de Bailey Dubow* con la característica de alargarse con el crecimiento del paciente, su ventaja principal es la reducción del número de intervenciones [I.76]. Surgieron complicaciones en el *sistema Bailey-Dubow*, el clavo migraba hacia tejidos blandos y se desconectaba de la parte T. Por lo que fue necesario realizar modificaciones [I.77]. Más tarde, se diseñó el *sistema telescópico intramedular Fassier-Duval*, que actualmente ha sido aprobado por diversas instituciones médicas [I.78]. En cuanto al tratamiento con órtesis, los objetivos se enfocan en la mejora de las capacidades fundamentales del paciente optimizando su independencia y mejorando su adaptación e integración social. Las órtesis usadas en el tratamiento de osteogénesis imperfecta, no son específicas para esta enfermedad como ocurre con otros padecimientos, su función es prevenir o corregir deformidades, brindar soporte y alinear segmentos corporales [I.79].

### **I.9.- La Biomecánica como análisis no invasivo**

La Ingeniería ha buscado desarrollar tecnologías que ayuden a mejorar la calidad de vida de las personas y ha tenido una gran evolución. Desde *Aristóteles* describiendo la estructura corporal y el movimiento, *Leonardo Da Vinci* quien estableció leyes con base en la observación del vuelo de pájaros, corrientes aéreas y acuáticas. *Giovanni Alfonso Boreli* relaciona en su libro las *Leyes de la Mecánica* con los movimientos del sistema esquelético muscular. La Biomecánica toma importancia a partir de los congresos internacionales organizados entre 1960 y 1969. Entre sus organizadores estuvo la *UNESCO* y durante estos años se publica la primera revista especializada en Biomecánica; el *Journal of Biomechanics*. Después en 1970, surge la revista *Modern Trends in Biomechanics*. También se crean institutos de Biomecánica en Zurich y Frankfurt. El desarrollo de la Biomecánica ha sido progresivo, enfocándose principalmente en el aspecto deportivo [I.80]. Hace algunos años la composición, estructura y propiedades mecánicas de los huesos era analizada de forma estática y con métodos destructivos [I.81]. Actualmente los métodos para el análisis experimental de huesos se pueden realizar de forma no invasiva. A partir de osteotomías realizadas a los pacientes. La ventaja de esta metodología es la repetición de las pruebas de forma ilimitada y la confiabilidad de los resultados [I.82].

---

**I.10.- Planteamiento del problema**

El desarrollo psicomotor es un proceso integral en el cual el individuo mejora gradualmente sus habilidades motoras, haciéndolas cada vez más complejas. La osteogénesis imperfecta presenta una amplia lista de características clínicas, aunque la principal característica es la fragilidad ósea, lo cual limita la movilidad en los pacientes, dificultando su integración en la sociedad. El tratamiento para la osteogénesis imperfecta está enfocado en mejorar su calidad de vida, incrementando la independencia de los pacientes. Este tratamiento consiste en prácticas multidisciplinarias que se determinan de acuerdo a las características y necesidades de cada individuo. La reducción de la incidencia de fracturas y la disminución del dolor resultantes de la aplicación de bifosfonatos, hacen que este tratamiento sea uno de los más importantes y efectivos, permitiendo a su vez un aumento de la fuerza muscular mediante el tratamiento posterior con fisioterapia. Realizar un análisis numérico de un biomodelo 3D de una estructura ósea con osteogénesis imperfecta, en este caso un fémur, permite determinar los efectos mecánicos que producen fuerzas externas al ser aplicadas en las estructuras óseas en actividades de la vida cotidiana, logrando determinar posibles fracturas, así como crear protocolos y tratamientos cada vez más efectivos para mejorar el desarrollo de los individuos con osteogénesis imperfecta.

**I.11.- Sumario**

La enfermedad ha acompañado al Hombre desde el inicio de su existencia, la Medicina surgió de la necesidad de brindar solución a estos padecimientos. En el presente capítulo se menciona el desarrollo de la Medicina desde su uso instintivo en la Prehistoria y empírico en las civilizaciones antiguas, que por mucho tiempo se mantuvo relacionado con diferentes creencias. Presentando el inicio de la Medicina Científica con las nuevas perspectivas que brindaron inventos, como el telescopio para poder entender de una forma diferente cada una de las enfermedades. Así como, brindar mejores soluciones a ellas. Posteriormente, se menciona el desarrollo de especialidades de la Medicina que en la actualidad son fundamentales para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades complejas como la osteogénesis imperfecta. Finalmente, se presenta la evolución y desarrollo de los conocimientos sobre la osteogénesis imperfecta. Se describe la clasificación y los tratamientos que se utilizan en la actualidad para mejorar la calidad de vida de las personas con osteogénesis imperfecta.

**I.12.- Referencias**

- 1.- Delgado de Cantú, G. M., *Historia Universal; De la Era de las Revoluciones al Mundo Globalizado*, Ed. Pearson Educación, pp 14-17, 2006.
- 2.- Higham, C., *La Vida en el Paleolítico*, Ed. Akal, pp 8-13, 2011.
- 3.- Rosas, A., *Los Neandertales*, Ed. CSIC, pp 11-15, 2010.
- 4.- Calvo I Trías, M., *Útiles Líticos Prehistóricos; Forma, Función y Uso*, Ed. Ariel, pp 214, 2002.
- 5.- Arias-Cabal, P., *De Cazadores a Campesinos; La Transición al Neolítico en la Región Cantábrica*, Ed. Universidad de Cantabria, pp 18-20, 1991.
- 6.- Eiroa, J. J., *La Prehistoria I; Paleolítico y Neolítico*, Ed Akal, pp 43-44, 1994.
- 7.- Fernández-Martínez, V. M., *Prehistoria; El Largo Camino de la Humanidad*, Ed. Alianza, pp 71-80, 2014.
- 8.- Félix-Sánchez, O., *Paleopatología; Actualizaciones en Osteología*, pp 163-164, 2009.
- 9.- Gargantilla, P., *Breve Historia de la Medicina; Del Chamán a la Gripe A*, Ed. Nowtilus, pp 12-17, 2017.
- 10.- Campillo, D., *Paleopatología; Los Primeros Vestigios de la Enfermedad*, Ed. Fundación Uriach 1838, pp 48-69, 1994.
- 11.- Krebs, R., *Breve Historia Universal*, Ed. Universitaria, pp 10-11, 2000
- 12.- Jaramillo-Antillón, J., *Historia y Filosofía de la Medicina*. Ed. Universidad de Costa Rica, pp 12-15, 2005
- 13.- Padró, J., *Historia del Egipto Faraónico*. Ed. Alianza Editorial, pp 21-27, 2014.
- 14.- Barros, C., *Medicina Egipcia; ¿La Piedra Angular de la Medicina Actual? Egiptología 2.0*, No. 16, pp 50-56, 2019.
- 15.- Ledermann, W., Una mirada crítica sobre la medicina en el antiguo Egipto, *Revista Chilena Infectol*, Vol. 33, No. 6, pp 680-682, 2016.
- 16.- Guerrero, T., Arqueología, en el antiguo Egipto; El origen del arte de embalsamar, *El Mundo*, 16 de agosto 2014.
- 17.- Singh, P. y Seth, A., *Osteogenesis imperfecta; A Tale of 50 Years, Reminiscences from Indian Pediatrics; A Tale of 50 Years*, Ed. Department of Pediatrics, Lady Hardinge Medical College, pp 1073-1074, 2015.
- 18.- Darriba-Rodríguez, P., Mitología, medicina y enfermería en la Grecia antigua, *Cultura de los Cuidados*, Año III, No. 5, pp 33-37, 1999.
- 19.- Codellas, P.S., Alcmeon of Croton: His life, Work, and Fragments, *Section of the History of Medicine*, pp 27-30, 1932.

- 
- 20.- Martínez-Saura, F., La Iliada y el Corpus Hipocraticum, *Espacio, Tiempo y Forma, Serie II; Historia Antigua*, No. 9, pp 169-193, 1996.
  - 21.- Fombella-Posada, M. J. y Cereijo-Quinteiro, M. J., Historia de la historia clínica, *Galicia Clínica*, Vol. 73, No. 1, pp 21-26, 2012.
  - 22.- de Fuente-Sagaz, M. y González-Casanova, J. C., *Historia de la Ortopedia; La Reumatología y la Traumatología al Hospital Plató*, Ed. ISSUU, pp 9, 2016.
  - 23.- Bado, J. L., Historia de la ortopedia, *Libro de Homenaje al Pr. Dr. Julio García Otero*, pp 92-102, 1965.
  - 24.- Mendel, Y., Kaisermann, J. y Pawlowski, M., *Historia de la Medicina*, Ed. Cambridge Stanford Books, 2019.
  - 25.- Kovaliov, S.I., *Historia de Roma*, Ed. Akal, pp 3-7, 2007.
  - 26.- Rojas, W. M., *Historia de la Medicina; Introducción a su Estudio*, 2ª edición, Ed. Corporación para Investigadores Biológicos, 2012.
  - 27.- Fernández-Ferriol, C., Ferriol-Rodríguez, M. R. y Jorge-Fleites, C., Roma; Imperio, cultura y medicina, *Acta Médica del Centro; Revista del Hospital Clínico Quirúrgico Arnaldo Milián Castro*, Vol. 12, No. 2, pp 235-247, 2018.
  - 28.- Gómez-Gutiérrez, A., Del macroscopio al microscopio; Historia de la medicina científica (Epílogo), *Revista Medicina*, Vol. 24, No. 1, pp 61-64, 2002.
  - 29.- Kit, W. K., *El Gran Libro de la Medicina China; Un Enfoque Holista de la Salud Física, Emocional, Mental y Espiritual*, Ed. Urano, pp 21-25, 2003.
  - 30.- Marié, E., *Compendio de Medicina China; Fundamentos Teoría y Práctica*, Ed. EDAF, 2006.
  - 31.- Ferril, A., *La caída del imperio Romano*, Ed. EDAF, pp 17-18, 2007.
  - 32.- López-Pérez, M., La transmisión a la Edad Media de la ciencia médica clásica, *Espacio y tiempo en la percepción de la Antigüedad Tardía*, pp 899-911, 2006.
  - 33.- López, A., Un invento revolucionario en la Edad Media; Las gafas, *Historia; National Geographic*, 30 de mayo del 2017.
  - 34.- Virgili, A., La peste negra; La epidemia más mortífera, *Historia, National Geographic*, 17 de agosto del 2012.
  - 35.- Álvarez, J., La escuela médica salernitana; Precursora de las universidades y de las primeras mujeres en la enseñanza, *Magazine Cultural Independiente*, pp 1-4, 2016.
  - 36.- Llanos-L., O., Historia de la cirugía de la hernia inguinal, *Revista Chilena de Cirugía*, Vol. 56, No. 4, pp 404-409, 2004.

- 
- 37.- Nieto-Olarte, M., *Remedios para el Imperio; Historia Natural y la Apropiación del Nuevo Mundo*. Ed. Uniandes, pp 22-24, 2019.
- 38.- Lozoya, X., *Plantas y Luces en México; La Real Expedición Científica a Nueva España (1787-1803)*, Ed. del Serbal, pp 1787-1803, 1984.
- 39.- Estrella, E., *Historia de la ciencia y de la técnica*, Ed. AKAL, pp 22-24, 1992.
- 40.- Pater, W., *El Renacimiento*, Ed. ICARIA, pp 11-14, 1981.
- 41.- Webster, C., *De Paracelso a Newton; La magia en la creación de la ciencia moderna*, Ed. Breviarios, 2016.
- 42.- Santos, E. S., Paracelso el médico; Paracelso el alquimista, *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, No. 4, pp 53-61, 2003.
- 43.- Crespo-Fajardo, J.L., Los documentos anatómicos de Leonardo Da Vinci, *Bellas artes y trincheras creativas*, pp 163-172, 2004.
- 44.- Valdivia-Herrero, L. G., Escalona-Rabaza, M., García-Orozco, L., Nazario-Dolls, A. M., Sánchez-Miño, J. I., Arzuaga-Martí, Y. B. y Rosero-Moreno, E., La medicina como tema de representación en la historia de la pintura, *Enfermería Investiga; Investigación, Vinculación, Docencia y Gestión*, Vol. 3, No. 2, pp 105-110, 2018.
- 45.- Moore, K. L. y Dalley, A. F., *Anatomía con Orientación Clínica*, 5ª edición, Ed. Médica Panamericana, pp 2, 2008.
- 46.- Lerma-Agudelo, C. H., Arte, humanismo y cirugía; Una visión holística, *Revista Colombiana Cirugía*, Vol. 24, No. 4, pp 207-222, 2009.
- 47.- Noguera-Pálau, J. J., Ambrosio Paré, Ambroise de Laval (Bourg-Hersent/Laval, 1520-París, 1590), *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*, Vol. 86, No. 10, pp 341-342, 2011.
- 48.- Oliván-Gonzalvo, G. y Oliván-Gracia, S., Tratamiento del pie zambo congénito a lo largo de la historia, *Revista Médica Electrónica*, Vol. 43, No. 2, pp 3-4., 2021
- 49.- Ledermann, W., La singular historia del Doctor Gusano-Nicholas Andry de Boisregard y de sus hijas Parasitología y Ortopedia, *Revista Chilena Infectología*, Vol. 29, No. 5, pp 564-569, 2012.
- 50.- Moreno-Franco, D., Cearra-Guezurraga, I., Breve historia del torniquete, *Gaceta Médica de Bilbao*, No. 112, pp 127-131, 2015.
- 51.- Rodríguez-Cabrera, R., Medicina física y rehabilitación con la ortopedia, *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, Vol. 19, pp 30-31, 2007.
-

- 
- 52.- Pierpauli, J.R., Teoría del conocimiento y teoría del estado en la filosofía de René Descartes, *Espiritu LXV*, No. 152, pp 505-522, 2016.
- 53.- García-Sancho, M. L., *Cirugía, Concepto; Hitos históricos*, Ed. Cerasa, pp 1-26, 2010.
- 54.- Vaázquez-Espinoza, E., Lagana y E., Vazquez, F., El mal de Pott en Francisco de Quevedo y Villegas, Alexander Pope y Giacomo Leopardi, *Sociedad Española de Quimioterapia*, Vol. 2, pp 2-9, 2021.
- 55.- Instituto Mexicano del Seguro Social, *Prevención, Diagnóstico y Tratamiento del Raquitismo Carencial; Guía de Práctica Clínica*, Ed. Instituto Mexicano del Seguro Social, 2010.
- 56.- García-Álvarez-García, F., Desarrollo histórico de la traumatología y de la cirugía ortopédica a partir del siglo XV, *Revista Española de Investigaciones Quirúrgicas*, Vol. XX, No. 1, pp 103-110, 2017.
- 57.- Mejía-Verdial, D. A., Paredes-Moreno, F. A., Licon-Rivera, T. S. y Salinas-Gómez, L. R., Histología; Desde su origen hasta la actualidad, *Revista Científica de la Escuela Universitaria de Ciencias de la Salud*, Vol. 3, No. 1, pp 47-57, 2016.
- 58.- Noguera Palau, J.J., Niels Stensen, Copenhage, 1638-Schwerin, 1686, *Archivo de la Sociedad Española de Oftalmología*, Vol. 84, pp 223-224, 2009.
- 59.- Trueta, J. y Morgan, J. D., The vascular contribution to osteogenesis, I; Studies by the injection method, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 42, pp 97-109, 1960.
- 60.- Martínez-Montalvo, M. C., Louis Pasteur en España; Siglo XIX, *Llull; Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, Vol. 28, No. 61, pp 107-130, 2005.
- 61.- Araujo-Rodríguez, F. J., Encinas-Barrios, C., Araujo-O'Reilly, F. J., Ángeles-Torres, M. y Caballero-Martínez, M. V., Asepsia y antisepsia; Visión histórica desde un cuadro, *Apuntes de Ciencia*, No. 2, pp 61-64, 2011.
- 62.- Marcelo, M. C. y Luz, N. T., Semmelweis y su aporte científico a la medicina: Un lavado de manos salva vidas, *Revista Chilena de Infectología*, Vol. 25, No. 1, pp 54-57, 2008.
- 63.- Lederman, W., En memoria de Lister, *Revista Chilena Infectología*, Vol. 25, pp 351-356, 2008.
- 64.- Álvarez, J. P., William Harvey, corazón valiente, *Revista Médica Clínica; Las Condes*, Vol. 23, No. 6, pp 788-790, 2012.
- 65.- Gardner, D., John Goodsir FRS (1814-1867); Pioneer of cytology and microbiology, *Journal of Medical Biography*, Vol. 25, No. 2, pp 114-122, 2017.
- 66.- Britannica, T. E., John Goodsir, *Encyclopedia Britannica*, Ed. Encyclopedia Britannica, 2021.
-

- 
- 67.- Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, I., Alobera-Gracia, M. A., del Canto-Pingarrón, M. y Blanco-Jerez, L., Bases fisiológicas de la regeneración ósea II; El proceso de remodelado, *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, Vol. 11, No. 2, pp 151-157, 2006.
- 68.- Weil, U. H., Osteogenesis imperfecta; Historical Background, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 159, pp 6-10, 1981.
- 69.- Astrom, E., *Bisphosphonate Treatment of Children and Adolescents with Osteogenesis Imperfecta (OI); Effects on Clinical Symptoms and Bone Turnover*, Ed. Department of Woman and Child Health; Karolinska Institutet, pp 1, 2007.
- 70.- Baljet, B., Aspects of the history of osteogenesis imperfecta (Vrolik's syndrome), *Annal of Anatomy*, Vol. 184, No. 1, pp 1-7, 2001.
- 71.- Molina-Gutiérrez, M. A., *Osteogenesis Imperfecta; Correlación Genotipo-Fenotipo*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Medicina, pp 14-16, 2017.
- 72.- Telenchana-Chimbo, P. F., Rivera-Toala, O. J., Coronel-Andrade, E. F. y Jiménez-Pinto, F. F., *Osteogénesis imperfecta; Revisión de la literatura actual*, Revista Ecuatoriana de Pediatría, Vol. 20, No. 1, pp 4-9, 2019.
- 73.- Ibañez, A. y Hodgson, F., Osteogénesis imperfecta, *Revista Médica Clínica; Las Condes*, Vol. 32, No. 3, pp 311-318, 2021.
- 74.- Espíndola-Corres, J. A., Colín-Martínez, Ó., Delgado-Pérez, J. A. y Isunza-Ramírez, A., Tratamiento de la osteogénesis imperfecta pediátrica con ácido zolendrónico, *Revista de Especialidades Médico Quirúrgicas*, Vol. 20, No. 2, pp 178-183, 2015.
- 75.- Gómez-Ardila, F., Lara-Garavito, M. y Álvarez-Quintero, C. E., Aproximación a los enfoques terapéuticos actuales en osteogénesis imperfecta a partir de la biología de la enfermedad, *Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología*, Vol. 25, No. 1, pp 50-58, 2011.
- 76.- Valenzuela-Arce, G., Zárate-Arce, H. y Salvatierra-Frontanilla, I., Osteogenesis imperfecta; Caso clínico y actualización, *Revista; Cuadernos*, Vol. 52. No. 1, pp 1-9, 2007.
- 77.- Ballesteros-González, W., *Impacto Funcional con el Uso de Clavo Telescópico Tipo Fassier-Duval en Pacientes con Osteogénesis Imperfecta*, Tesis Maestría, Universidad del Rosario: Facultad de medicina, pp 19-20, 2015.
- 78.- Rueda-Arreguín, J. L., *Diseño y Manufactura de un Clavo Telescópico Intramedular para Rehabilitación de Miembro Inferior*, Tesis Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI, ESIME, Zacatenco, pp 32-34, 2017.
-

- 
- 79.- Alguacil-Diego, I. M., Molina-Rueda, F. y Gómez-Conches, M., Tratamiento ortésico en pacientes con osteogénesis imperfecta, *Anales de Pediatría*, Vol. 74, No. 2, pp 131-136, 2011.
- 80.- Aguilar-Gutiérrez, M., *Biomecánica; La física y Fisiología*, Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp 15-16, 2000.
- 81.- Ferreti, J. L., From osteology to osteo-myology; Three decades of continuous, original contributions to musculoskeletal biomechanical analysis, *Actualizaciones en Osteología*, Vol. 14, No. 2, pp 125-147, 2018.
- 82.- Ramírez-Vela, V., Torres-San Miguel, C. R., Martínez-Saez, L., Urriolagoitia-Sosa, G., Rueda-Arreguin, J. L. y Urriolagoitia-Calderón, G. M., Análisis numérico de elemento finito de las deformidades angulares del cuello femoral de un paciente infante mexicano con osteogénesis imperfecta tipo III, *Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, pp 139-145, 2018.

---

# **CAPÍTULO 2:**

# **MARCO TEÓRICO**

---

**II.1.- Introducción**

La Osteogénesis Imperfecta, es una enfermedad poco común, debido a su baja incidencia, se clasifica como una de las enfermedades raras, presentándose sin distinción de grupos étnicos, sexo o raza. Se registra que afecta a 1 de cada 10.000 recién nacidos en México hasta el año 2013 [II.1]. Afecta diversos tejidos, provocando principalmente fragilidad ósea, lo cual ocasiona múltiples fracturas. La osteogénesis imperfecta se denomina como una colagenopatía genética, las colagenopatías, afectan al tejido conectivo, lo cual produce síntomas diversos dependiendo del órgano afectado. El colágeno tipo I es la proteína con mayor presencia en la estructura de los huesos y la piel, es un componente estructural, con la función de brindar resistencia a la tracción en los tejidos, así como soporte. Esta deficiencia en el colágeno provoca afecciones en diferentes tejidos y fragilidad ósea debido a la disminución de la masa ósea [II.2].

**II.2.- La Osteogénesis Imperfecta y su clasificación**

La clasificación desarrollada por Sillence, aún permanece vigente en el diagnóstico de este padecimiento, aunque se han realizado modificaciones en la clasificación puesto que los casos clínicos son variados. Aunque en la mayoría de la literatura sobre osteogénesis imperfecta es posible encontrar que la causa de este padecimiento es la mutación de genes localizados en los cromosomas 7 y 17, se han usado técnicas para el análisis de ADN, las cuales demuestran que no todos los tipos de osteogénesis imperfecta presentan mutaciones en dichos genes [II.3]. A continuación, se presenta la descripción de la clasificación por Sillence en el año 1979:

Tipo I: Representa la forma más leve. Las fracturas se presentan en la edad preescolar y se reduce su incidencia durante la pubertad. La estatura es normal, no se presentan deformaciones graves. Se observa rostro en forma de triángulo, deficiencias en la audición y escleras azules. El desarrollo de sus habilidades sociales no se ve afectado. No presenta dentogenesis imperfecta.

Tipo II: debido a la presencia de múltiples fracturas intrauterinas, este tipo representa una forma letal durante el periodo perinatal. Un alto porcentaje de pacientes fallecen en las primeras semanas de vida por falla respiratoria y hemorragia intracraneal. También se presentan escleras azules o grises y macrocefalia.

Tipo III: su afección es moderada a severa, presenta dentogenesis, deformaciones en los huesos largos y se observa el rostro en forma triangular. Talla reducida y deformaciones en la columna.

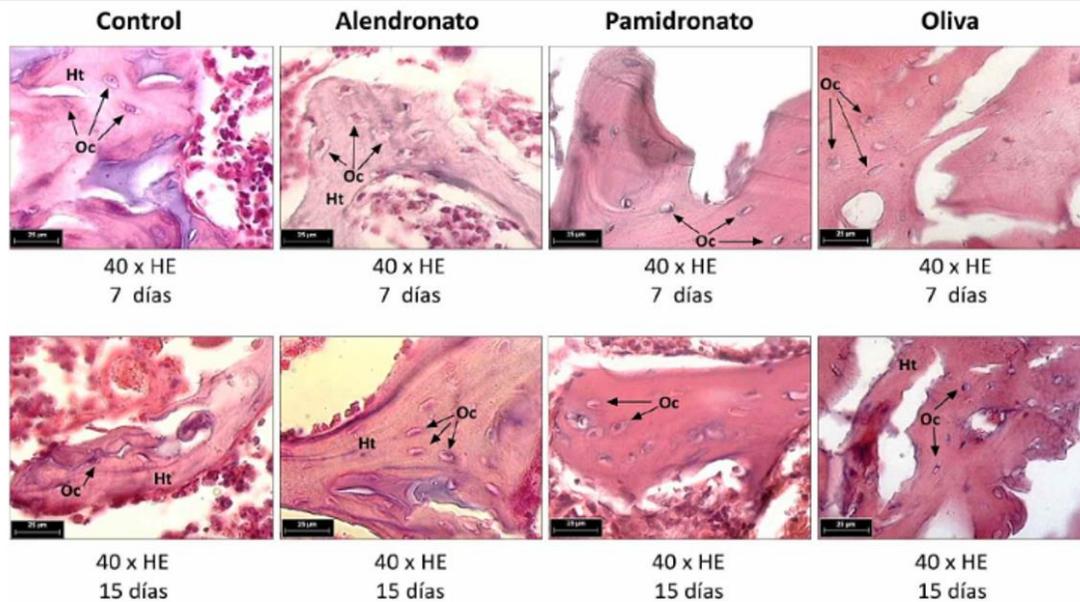
Tipo IV: presenta cuadros clínicos heterogéneos y variados, tanto en la severidad como en las características, las fracturas son comunes en la pubertad y representan signos como: pérdida auditiva y fragilidad en las piezas dentales, así como rostro triangular.

Posteriormente, en el año 2004 se agregaron tres tipos a la clasificación de Sillence, los cuales se determinaron con base en estudios moleculares, radiológicos y morfométricos. Glorieux, determinó que estos tipos no presentan deficiencias en el colágeno tipo I, aunque se observa una notable formación de callo en partes del hueso donde se consolidan las fracturas [II.4].

### **II.3.- Métodos de diagnóstico de Osteogénesis Imperfecta**

Debido a que las características clínicas resultan muy evidentes en algunos tipos de osteogénesis imperfecta, es posible diagnosticar esta enfermedad basándose en las mismas, aunque es importante realizar exámenes bioquímicos y moleculares, ya que se presentan clasificaciones como el tipo I, que no es fácil de diagnosticar y es necesario confirmar el diagnóstico. Si el padecimiento no se identifica correctamente, la enfermedad puede desarrollar afecciones en diferentes órganos internos, provocando problemas secundarios mayores. En casos con antecedentes de familiares positivos con osteogénesis imperfecta es más sencillo diagnosticar la enfermedad en el periodo perinatal, con un examen de ultrasónico rutinario durante el embarazo. Por otro lado, la detección en casos donde no existen antecedentes, es más difícil, incluso puede resultar en un diagnóstico erróneo. Estudios realizados en el año 2012 aseguran que puede detectarse el 90% de las mutaciones de colágeno tipo I con pruebas como la biopsia de colágeno y el análisis del ADN. A continuación, se describen algunos de los métodos utilizados para el diagnóstico de osteogénesis imperfecta [II.5]:

Histomorfometría: es un procedimiento que permite el estudio y análisis de enfermedades metabólicas óseas. Este tipo de estudio requiere que el laboratorista este familiarizado con la osteogénesis imperfecta.



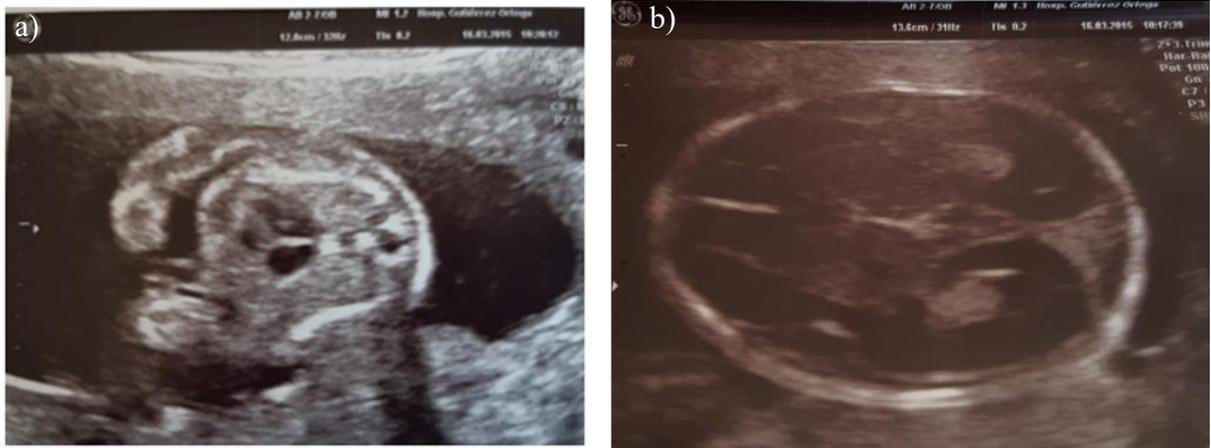
**Figura II.1.-** Cortes histológicos posteriores a un estudio histomorfométrico en huesos con tratamiento de bifosfonatos. [II.6]

Densitometría ósea: esta prueba está disponible para el diagnóstico de osteogénesis imperfecta, sin embargo, los individuos presentan una densidad mucho menor al rango normal.



**Figura II.2.-** Prueba de diagnóstico densitometría ósea.

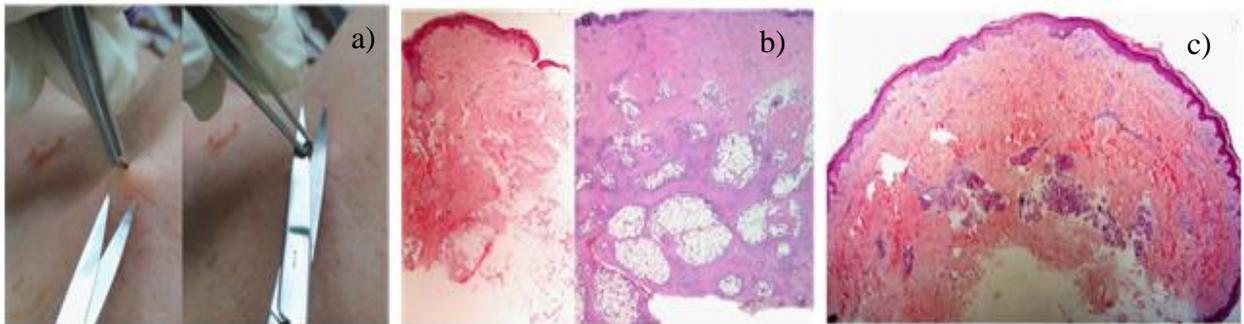
Ultrasonido y ecografías: al tratarse de un método no invasivo, permiten diagnosticar osteogénesis imperfecta tipo I y tipo II en el periodo prenatal. Las anomalías observadas son fracturas, bordes en las costillas, huesos cortos, así como discontinuidad. Las ecografías transabdominales pueden realizarse a partir de la semana 15, mientras que las ecografías transvaginales permiten realizar un diagnóstico desde la semana 14.



**Figura II.3.-** Ecografía para diagnóstico de *OI* tipo 2;

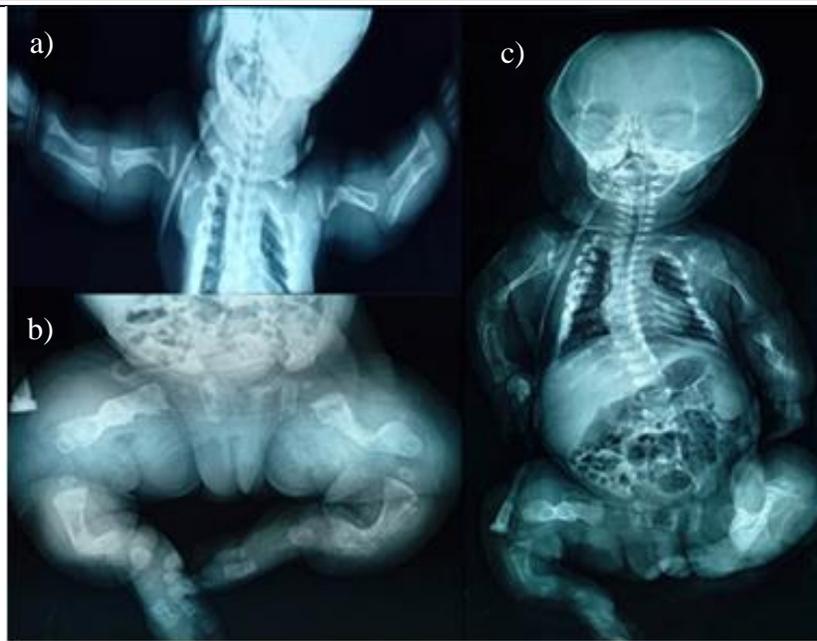
a) Extremidades arqueadas y huesos fracturados, b) Calota fetal hipo mineralizada [II.7]

Análisis de colágeno y diagnóstico genético:



**Figura II.4.-** Biopsia cutánea [II.8]. a) Toma de muestra para análisis de biopsia. b) Lesión desarrollada de eritema nudoso. c) Necrosis epidérmica.

Radiografías de útero: este método permite diagnosticar cuando las pruebas genéticas y la ecografía no han arrojado resultados claros. Con las radiografías es posible observar huesos wormianos, que se presentan en el cráneo formando suturas [II.5]



**Figura II.5.-** Radiografías a pacientes con Osteogénesis Imperfectas. a) Miembros superiores, fractura diafisiaria de húmero izquierdo, deformidades angulares. b) Miembros inferiores con diversas fracturas. c) Radiografía completa anteroposterior expone marcada escoliosis [II.9].

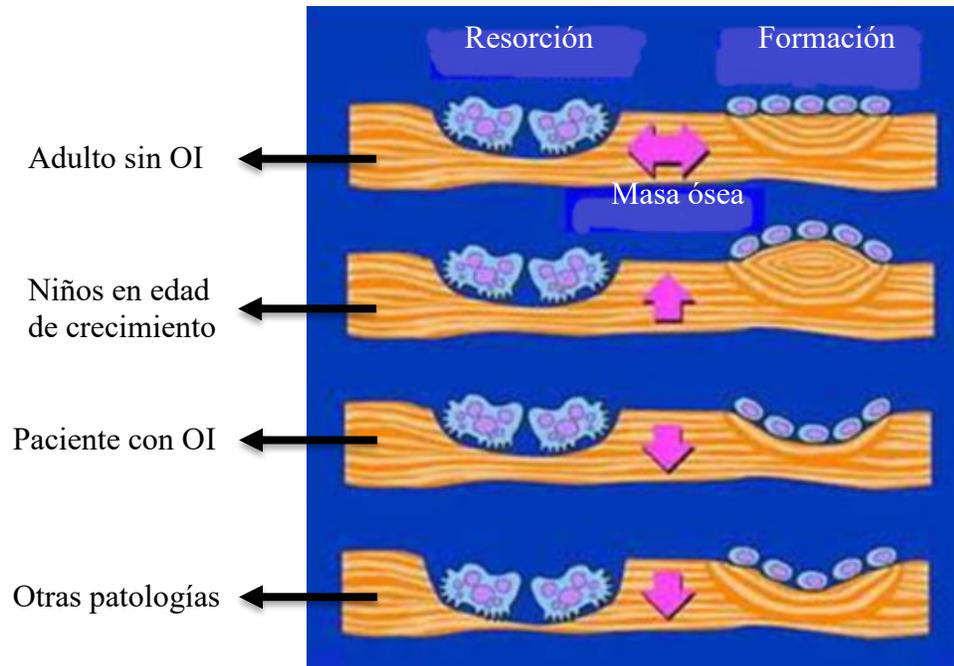
#### II.4.- Tratamiento

El tratamiento se enfoca en mejorar la motricidad especialmente durante la infancia, durante esta etapa es cuando las fracturas presentan mayor incidencia, por lo tanto, las fracturas requieren un tratamiento inmediato. Deben ser correctamente alineadas y tener un protocolo adecuado para ayudar a consolidar las fracturas sin poner en riesgo al infante, ya que la inmovilidad podría provocar nuevas lesiones. Puesto que la osteogénesis imperfecta no tiene cura, el tratamiento se enfoca en el aumento de la densidad ósea mediante la aplicación de fármacos, corrección quirúrgica de las deformidades óseas, así como un tratamiento integral auxiliado por ramas multidisciplinarios, como: la psicología, trabajo social, odontología, fisioterapia, endocrinología y la cirugía ortopédica [II.10].

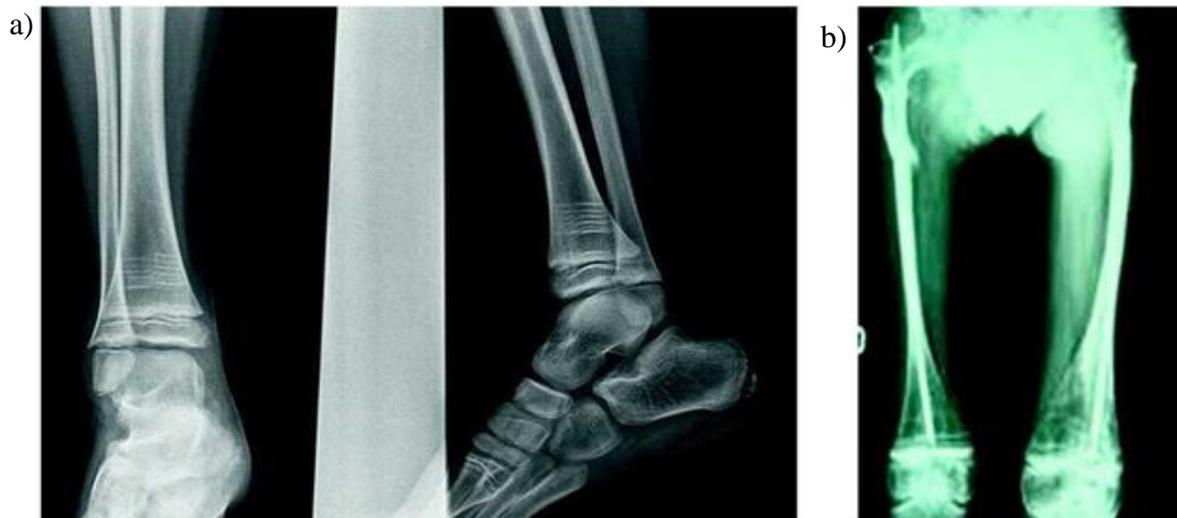
##### II.4.1.- Tratamiento farmacológico

Se ha demostrado que la osteogénesis imperfecta está asociada al aumento de la actividad osteoclástica, incrementando el recambio óseo (Figura II.6), por lo tanto, se deduce que la terapia debe ser enfocada en reducir la actividad osteoclástica y mejorar la formación ósea. A partir de la aplicación de bifosfonatos se observan efectos satisfactorios en el hueso, a nivel histológico, se

analiza el aumento de trabéculas y engrosamiento cortical. Diversos estudios demuestran que en los primeros 4 años de tratamiento con bifosfonatos mejora notablemente la geometría vertebral, sin embargo, la incidencia de fracturas no disminuye [II.11].



**Figura II.6.-** Diagrama de resorción y formación de tejido óseo [II.12].



**Figura II.7.-** Imágenes radiográficas de dos niños con *OI* tratados con bifosfonatos, donde se pueden observar las líneas “cebras” en la zona metafisaria de los huesos largos [II.13].

a) Niño con afectación moderada. b) Niño con afectación grave.

#### II.4.2.- Tratamiento quirúrgico

Las osteotomías consisten en la colocación de clavos intramedulares en huesos largos. La corrección de deformaciones en las extremidades de los pacientes permite su deambulación, mejorando su independencia. Esta terapia se complementa con la rehabilitación física. Los clavos telescópicos disponibles son los de tipo Fassier-Duval y los clavos intramedulares Sheffield [II.11].



**Figura II.8.-** Clavo telescópico intramedular *Fassier Duval*

#### II.4.3.- Tratamiento fisioterapéutico y rehabilitación

El tratamiento fisioterapéutico se enfoca en mejorar la función motora. Estudios reportan mejoras en pacientes con osteogénesis imperfecta tipo I, en miembros inferiores, mientras que los tipos III y IV no presentan mejoras significativas después del mismo periodo de tratamiento. También se observó que las mejoras logradas durante el tratamiento, disminuían tiempo después de finalizar el programa. La terapia también es aplicada en niños inmovilizados. Se realizó un estudio en el cual 4 niños fueron sometidos a la aplicación de vibraciones en el cuerpo entero, lo cual les permitió sentarse y caminar [II.11].



**Figura II.9.-** Tratamiento fisioterapéutico postquirúrgico en osteotomías de fémur

## II.5.- Estructuras óseas

El esqueleto humano está fuertemente relacionado con los músculos, presentando en su anatomía zonas de inserción muscular para facilitar la actividad motora de los individuos. Los huesos constantemente están sometidos a fuerzas que se aplican sobre su superficie, presentando el siguiente patrón: en la parte elástica, la cual es representada por la rigidez del hueso. En este punto, la deformación es temporal, al dejar de aplicar la fuerza, el hueso recupera su forma original. Una deformación permanente se presentaría en la fase plástica, si la fuerza aplicada aumentara. Finalmente, cuando la fuerza excede la resistencia del tejido se produce la fractura. El sistema óseo tiene grandes similitudes con la arquitectura mecánica que no solo corresponde a la forma, sino también en el funcionamiento [II.14]. El hueso está definido por la histología como tejido conjuntivo mineralizado y vascularizado del cual su estructura consiste en laminillas de matriz osteoide calcificada, la disposición de estas laminillas determinara si el tejido es cortical en el cual los conductos de Havers se recubren de laminillas en posición concéntrica, mientras que en el hueso esponjoso está constituido por laminillas oseas en forma de red, delimitando cavidades en las cuales se ubica médula ósea [II.15].

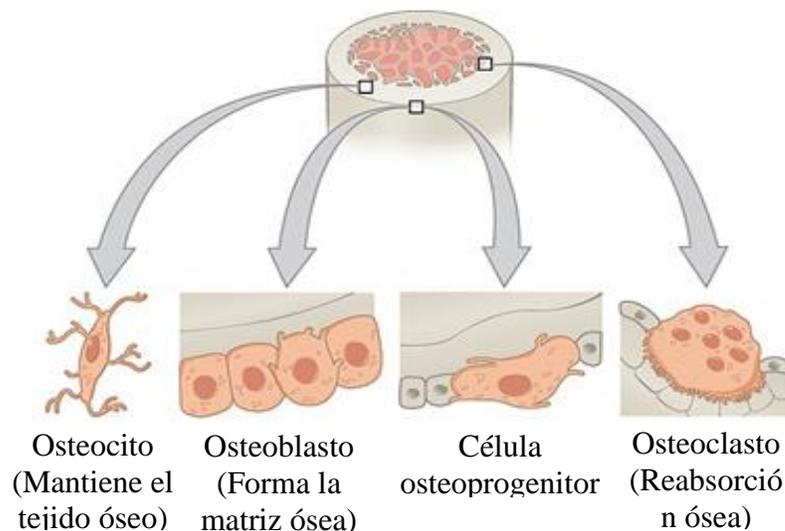
### II.5.1 Células óseas

Las estructuras óseas de conforman por tejido ósea que a su vez se constituye de fosfato cálcico anorgánico y fibras de colágeno tipo I. La osteogénesis, que es el proceso de formación del hueso,

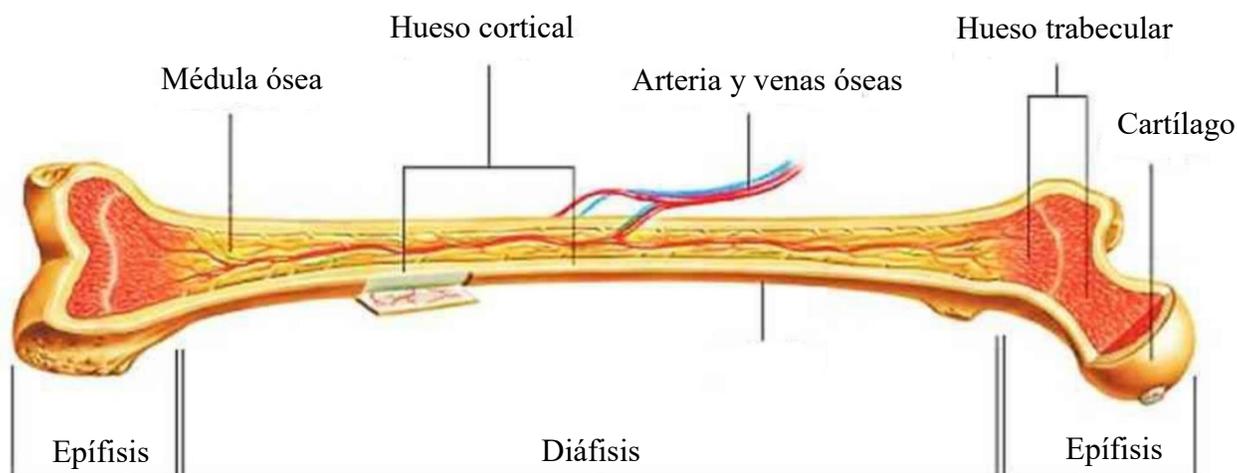
se produce a partir de tejido conjuntivo mediante osteogénesis membranosa en la etapa embrionaria fetal, gracias a la formación de una matriz de cartílago hialino, de esta manera, los huesos largos se forman mediante osificación pericondral, mientras que, en la formación de los huesos del cráneo, la osificación es membranosa. [II.16]. Los huesos no son completamente sólidos, existen pequeños espacios entre los componentes duros. Algunos espacios son conductos de vasos sanguíneos que transportan nutrientes a las células óseas y otras son áreas de almacenamiento de médula ósea roja. En general, el hueso sólido constituye el 80% del esqueleto y el 20% restante es hueso esponjoso [II.17].

El tejido óseo está conformado por las siguientes células:

- Osteocitos: estas células se encuentran en las llamadas lagunas óseas, son células alargadas que presentan numerosas prolongaciones citoplasmáticas.
- Osteoblastos: su función principal es sintetizar los componentes de la matriz ósea, en donde se encuentra el colágeno.
- Osteoclastos: estas células se encargan de liberar calcio del hueso y delimitan las áreas del hueso que posteriormente se reabsorberá [II.18] (Figura II.10).



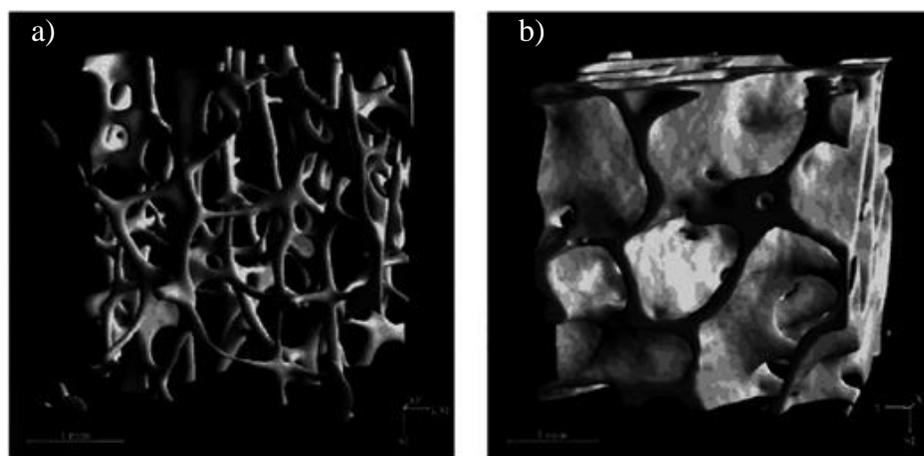
**Figura II.10.-** Diagrama de las células óseas.



**Figura II.11.-** Diagrama del corte transversal de un fémur.

### II.5.2.- Tejido trabecular

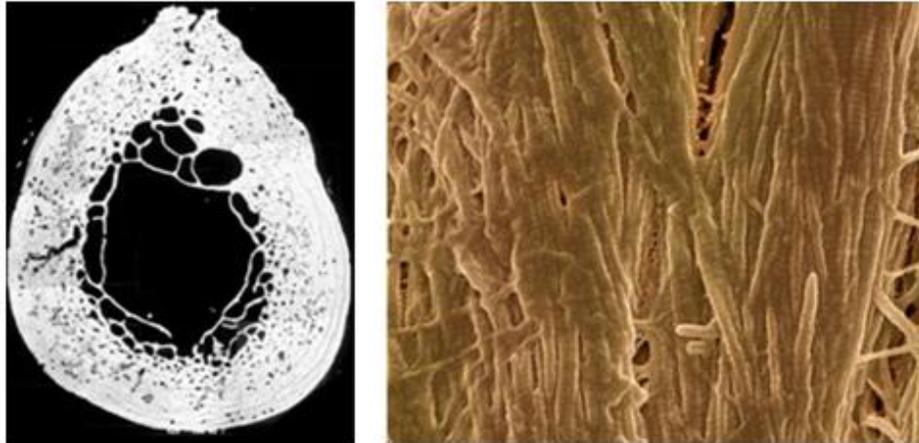
El hueso trabecular contiene en su estructura trabéculas que forman una red interconectada. La función principal del hueso trabecular es absorber las cargas que generan el peso de la parte superior del cuerpo, está distribuido en los extremos de los huesos largos. La magnitud de cargas aplicadas en el hueso, determina la densidad relativa y la arquitectura del hueso. Se ha demostrado que, en áreas sometidas a cargas menores, se desarrollan estructuras de celdas abiertas [II.19].



**Figura II.12.-** Estructuras óseas típicas del hueso esponjoso [II.20].  
a) Columna lumbar. b) Cabeza femoral.

### II.5.3.- Tejido cortical

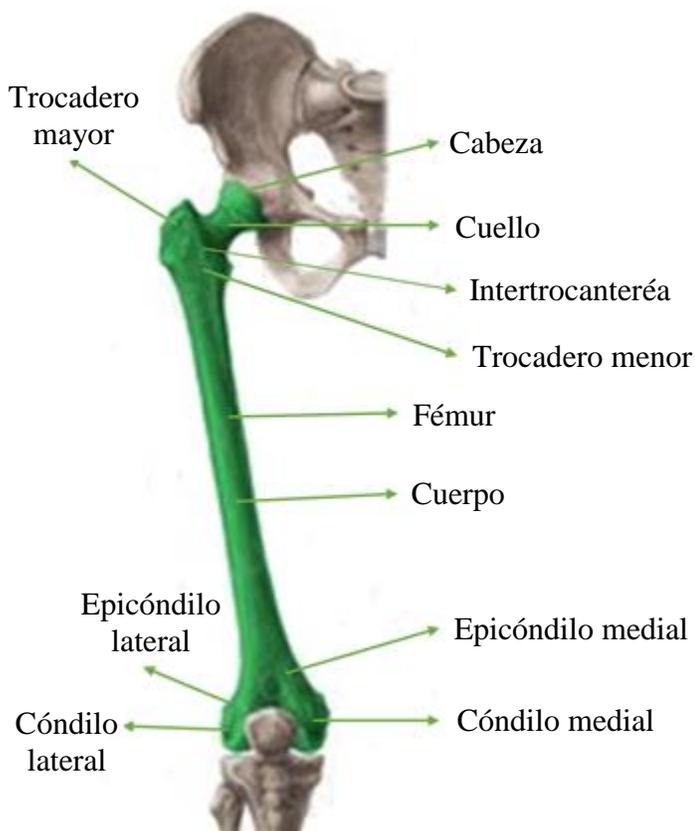
Su estructura está compuesta por una red de conductos finos ordenados de forma longitudinal, llamados canales de Havers, así como conductos transversales o conductos Volkmann. Las diáfisis de los huesos largos están constituidas principalmente por hueso cortical. Dentro de sus características presentan baja porosidad y alta densidad, conformando el 80% del esqueleto [II.21].



**Figura II.13.-** Estructuras óseas típicas del hueso compacto

### II.6.- Anatomía del fémur

El fémur es el hueso más largo del cuerpo, la longitud del fémur corresponde a una cuarta parte de la estatura de un individuo. Este hueso es el responsable de sostener el peso del cuerpo de un individuo en las actividades de la vida cotidiana. Su extremo proximal se une con la articulación del hueso coxal. Los fémures izquierdo y derecho convergen, formando un ángulo  $Q$ , el cual permite el alineamiento de las rodillas. Este ángulo generalmente tiene un valor de  $15^\circ$ , aunque en mujeres suele ser mayor, debido a que la pelvis es más ancha. El fémur humano tiene contacto con dos articulaciones, en su extremo proximal, el acetábulo del fémur conforma la articulación de la cadera, mientras que, en el extremo distal, el fémur tiene contacto con la tibia formando la articulación de la rodilla [II.22].



**Figura II.14.- Anatomía del fémur**

## II.7.- Sumario

En este capítulo se describen las manifestaciones clínicas del padecimiento Osteogénesis Imperfecta, así como, sus clasificaciones de acuerdo a la literatura de Sillence. También se explican los métodos de diagnóstico de este padecimiento y los tratamientos a los cuales son sometidos los pacientes. Se abordan las características del tejido cortical y el tejido trabecular y finalmente se representa con un diagrama la anatomía de un fémur saludable.

## II.8.-Referencias

- 1.- Guaglione-Cabrera, A., Sánchez-Durán, M. A. y Martínez-Asención, J. P., Osteogénesis imperfecta tipo II; Reporte de un caso con una supervivencia mayor a cuatro meses, *Revista Mexicana de Ortopedia Pediátrica*, Vol. 15, No. 2, pp 111-117, 2013.

- 2.- Concepción-Zavaleta, M., Cortegana-Aranda, J., Aguiar-Villanueva, D., Zavaleta-Gutierrez, F., Osteogénesis imperfecta. Reporte de caso, *Revista Peruana de Pediatría*, Vol. 67, pp 223-226, 2014.
- 3.- Plotkin, H. y Glorieux, F.H., ¿Qué hay de nuevo en la osteogénesis imperfecta?, *Archivo Argentino de Pediatría*, Vol. 99, pp 127-130, 2001.
- 4.- Oswaldo-Lazala, M.D., y Solaque, H., Terapia con bifosfonatos en osteogénesis imperfecta, *Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología*, Vol. 23, No. 2, pp 104-114, 2009.
- 5.- Solano-Barona, A.C., Jaramillo-Cañadas, D.D., Moreira-Cusme, K.G., Jácome-Vera, K.G., Osteogénesis imperfecta, *Revista Científica de Investigación actualización del mundo de las Ciencias*, Vol. 3, No. 1, pp 3-21, 2018.
- 6.- Escudero, C., Virga, C., Aguzzi, A., y De Leopardi, A., Análisis histomorfométrico de la asociación de aceite de oliva y bifosfonatos en la remodelación ósea periimplantaria, *Int. J. Odontodtomal*, Vol. 11, No. 4, pp 481-485, 2017.
- 7.- Mejias-Quintero, M.E., Osteogénesis Imperfecta. A propósito de un caso tipo II, *Revista Chilena de Obstetricia*, Vol. 83, pp 86-92, 2018.
- 8.- Llamas-Velasco, M. y Paredes B., La biopsia cutánea; Bases fundamentales; Parte I, *Revista de Dermatología Practica*, Vol. 103, No. 103, pp 12-20, 2012.
- 9.- Centeno-Leguía, D., Atauje-Trillo, C. J., Osteogénesis imperfecta; Diagnóstico y manejo de una enfermedad huérfana en un hospital regional peruano; A propósito de un caso, *Revista Médica Hered.*, Vol. 32, pp 113-118, 2021
- 10.- Oswaldo-Lazala, M.D., Osteogénesis imperfecta, *Ortopedia, Sociedad colombiana de cirugía ortopédica y traumatología SCCOT*, pp 87-94, 2011.
- 11.- Gutiérrez, D. P., Molina, G. M., Prieto, T. L., Parra, G. J. y Bueno, S. A., Osteogénesis imperfecta: nuevas perspectivas, *Revista Española de Endocrinología Pediátrica*, Vol. 4, pp 107-117, 2013.
- 12.- Plotkin, H., Osteogenesis imperfecta: mitos y leyendas., *Congreso de AHUCE*, pp 5, 2003.
- 13.- Salom, M., Vidal, S. y Miranda, L., Aplicaciones de los bifosfonatos en la ortopedia infantil, *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, Vol. 55, No. 4, pp 302-3011, 2011.
- 14.- Tracy-Melendez, A., Anatomía humana: Su historia y aplicacion, *Facultad de Ciencias de la Salud, texto guía anatomía humana*, pp 8-9, 2017.

- 
- 15.- Fernández-Tresguerres, Hernández-Gil, I., Alobera-García, M.A., Del Canto-Pingarrón, M., Blanco-Jerez, L., Bases fisiológicas de la regeneración ósea I. Histología y fisiología del tejido óseo, *Histología y fisiología del tejido óseo*, pp 47-51, 2005
  - 16.- Waschke, J., Koch, M., Kürten, S., Schulze-Tanzil, G. y Spittau, B., Sobotta. Texto de anatomía, *Elsevier*, 2018.
  - 17.- Seeley, R., Stephens, T. y Tate, P., *Anatomy and Physiology*, 6ª edición, Ed. McGraw Hill, pp 171, 2003.
  - 18.- Mesón-Andrés, S., *Análisis del comportamiento biomecánico de un fémur humano*, Trabajo de grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, pp 7-9, 2014.
  - 19.- Puche, R.C., El tejido esponjoso y su evolución por medio de imágenes, *Actualizaciones en Osteología*, Vol. 9, No. 3, pp 277-287, 2013.
  - 20.- Álvarez-San Martín, R. y Velutini-Kochen, J. A., Anatomía de la cabeza femoral humana: consideraciones en ortopedia; Parte II; Biomecánica y morfología microscópica, *International Journal of Morphology*, Vol. 29, No. 2, pp 371-376, 2011.
  - 21.-, Escuela Superior de Ciudad Sahagun de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica, pp 3, 2018.
  - 22.- Marco-Esteban, M., *Análisis experimental y numérico de la fractura de fémur humano*, Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, pp 89, 2017.

---

# **CAPÍTULO 3:**

# **MODELADO**

---

### III.1.- Introducción

Las estructuras óseas son tejidos dinámicos y metabólicamente activos, son ampliamente vascularizados con una excelente capacidad de autorreparación, pueden alterar sus propiedades y configuración en respuesta a cambios en la demanda mecánica. Las propiedades estructurales y mecánicas inherentes al hueso le permiten proteger órganos internos. También proporciona uniones cinemáticas rígidas y lugares de inserción muscular, facilitando la acción muscular y el movimiento corporal [III.1]. Estas estructuras están representadas por geometrías complejas, lo que hace poco viable su simplificación al analizarlas. Por esta razón se han desarrollado técnicas que permiten obtener reconstrucciones en tres dimensiones (3D). El biomodelado es un término que refiere a la capacidad de reproducir las características morfológicas de una estructura anatómica en un modelo físico. Los biomodelados se generan a partir de imágenes volumétricas tomadas a través de un proceso de segmentación, como lo son la tomografía axial computarizada (TAC) o la resonancia magnética (RM) [III.2]. A pesar de las similitudes con el comportamiento real del hueso, los biomodelos representan una abstracción matemática de la estructura ósea, lo que conlleva ciertas limitantes y dificultades al ser desarrollados. Para obtener resultados precisos es imprescindible que el modelo final represente con fidelidad la anatomía estudiada. Por lo tanto, se deben analizar los tejidos óseos desde tres aspectos diferentes debido a su dinamismo. Inicialmente se debe estudiar su estructura y morfología, posteriormente el material constituyente y, por último, el sistema biológico del que forma parte [III.3].

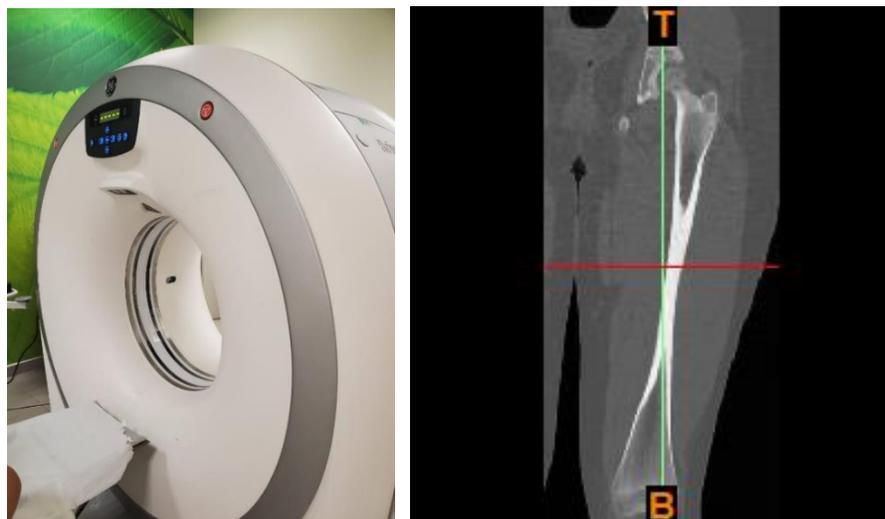
### III.2.- Metodología para el desarrollo de un biomodelado [III.4]

A continuación, se presenta de manera general el procedimiento para desarrollar un modelo numérico de un sistema biológico, en este proyecto se trata del fémur izquierdo de un infante saludable.

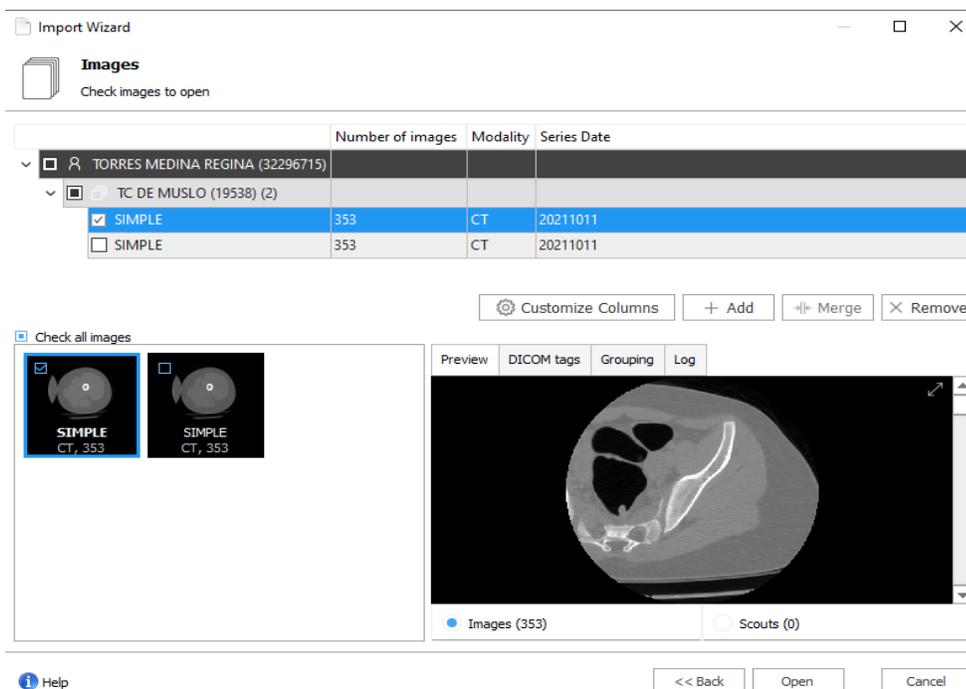
#### III.2.1.- Obtención de imágenes en formato DICOM [III.4]

Un tomógrafo computarizado está conformado por detectores, el tubo de Rx emite un haz que atraviesa al paciente. El haz atenuado remanente emerge de dicho tubo y posteriormente es recibido por el detector. Mientras el sistema efectúa un movimiento circular. La información obtenida en los detectores se reconstruye en un ordenador como una imagen digital en archivo DICOM (*Digital Imaging and Communication On Medicine*). Para la obtención de imágenes se decidió realizar una tomografía axial computarizada TAC, se utilizó un tomógrafo *General Electric*. El estudio se

realizó en la Clínica Salud Digna Puebla (*CAPU*). Se obtuvo una carpeta con un total de 353 imágenes en formato *DICOM*. El paciente fue de género femenino, 10 años de edad, 1.32 m de altura y un peso corporal de 35 kg, aparentemente saludable.



**Figura III.1.-** Equipo para realizar tomografía y tomografía



**Figura III.2.-** Importación de archivos *DICOM* para su procesamiento

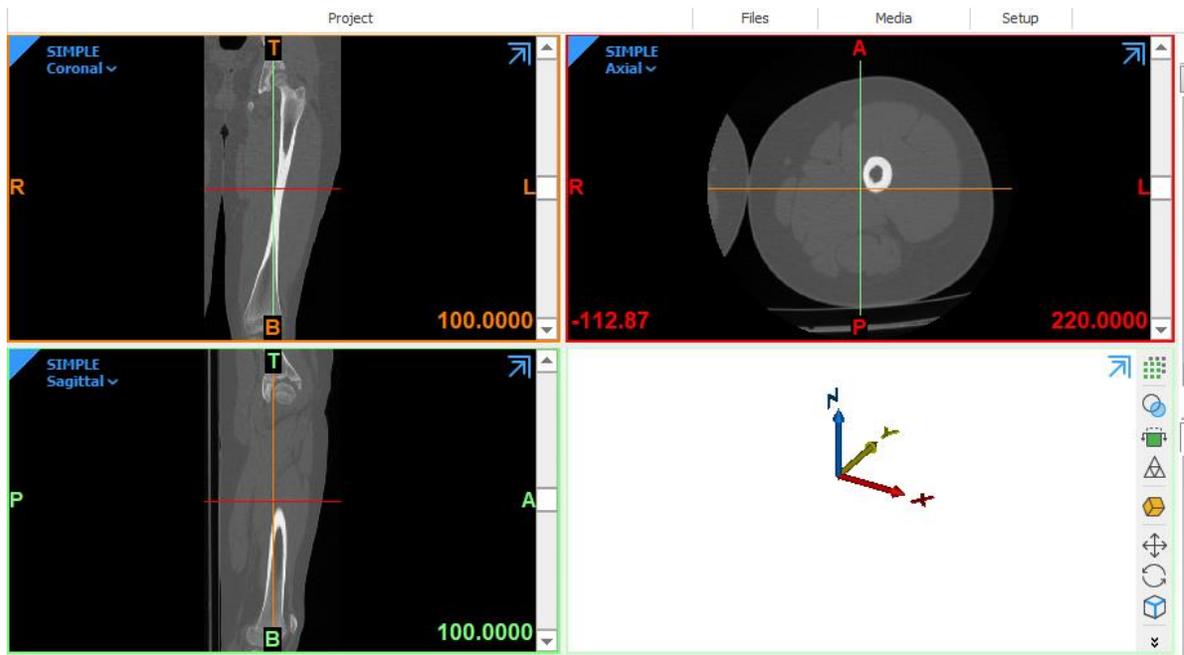
### III.2.2.- Importación de imágenes [III.4]

El procesamiento de las imágenes *DICOM* para la generación de un modelo 3D se realizó en el programa *MIMICS*<sup>®</sup> (Figura III.2). Se optó por este programa debido a su capacidad de

procesamiento y a la variedad de herramientas especializadas para la obtención de modelos computarizados que garantizan la biofidelidad requerida. Se importaron los 353 cortes del fémur izquierdo del infante de 10 años de edad.

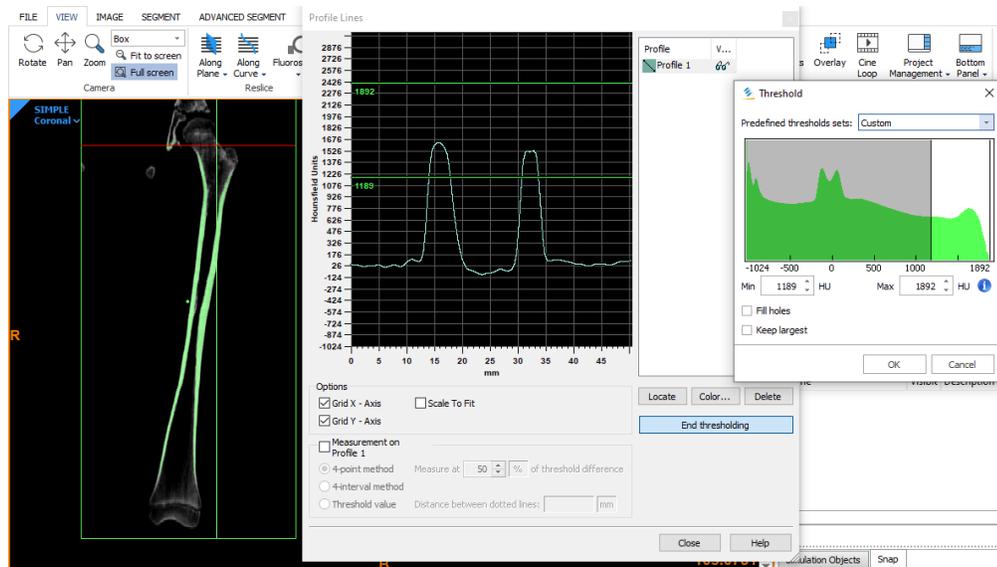
### III.2.3.- Procesamiento de imágenes [III.4]

Posterior a la importación de las imágenes *DICOM*, el programa muestra tres ventanas en donde se observan los planos frontal, sagital y transversal, así como una cuarta ventana en donde se podrá visualizar el modelo *3D*.



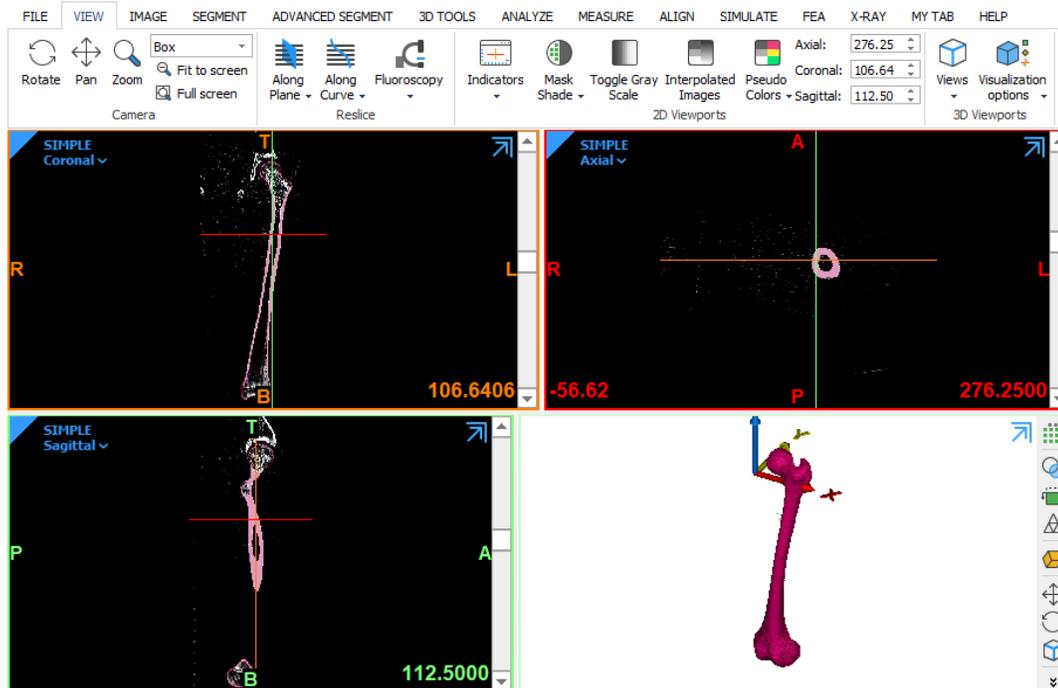
**Figura III.3.-** Visualización de las imágenes tomográficas en planos sagital, axial y coronal

El primer paso para el procesamiento es generar una máscara, la cual permitirá trabajar con la anatomía que se estudiará. Cada parte de la anatomía tiene una representación dentro de la escala de grises. En este caso, el área de interés es el hueso cortical y el hueso trabecular. La herramienta *Profile Lines*, se emplea para realizar la máscara del hueso cortical, seleccionando manualmente los valores dentro del umbral de la escala de grises, con los cuales se obtiene una máscara homogénea, aislando las anatomías con umbrales diferentes al seleccionado. Después de obtener la máscara primaria, es necesario delimitar el área de interés, con la herramienta *Crop Mask* se delimita con un recuadro, abarcando el área del fémur y posteriormente con la herramienta *Slip Mask*, se recorta la conexión que existe entre la parte proximal del fémur y la articulación de la cadera.



**Figura III.4.-** Desarrollo de la máscara del hueso trabecular con la herramienta *Profile Lines*

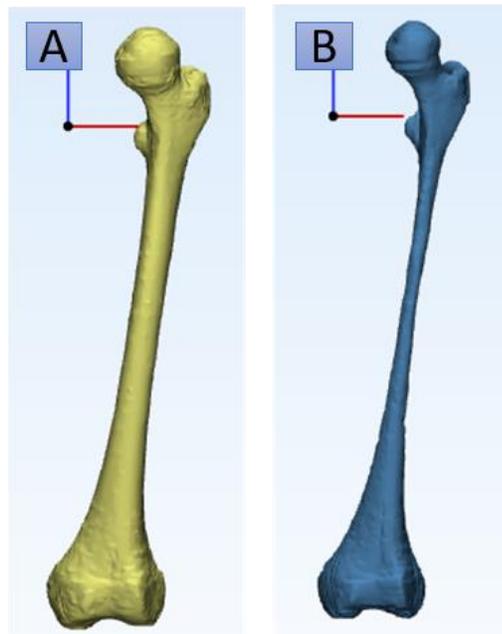
La herramienta *Profile Lines* proporciona una máscara con la cual se partirá hacia un modelo sólido, hasta este punto existen vacíos en la máscara, lo cual impedirá crear un modelo 3D que sea funcional. El programa computacional *Mimics*<sup>®</sup> proporciona herramientas con las cuales se pueden generar mascarar automáticamente, no obstante, estas mascarar subestiman el grosor del hueso cortical. Por lo tanto, se optó por rellenar la máscara del hueso cortical de forma manual en cada uno de los cortes, con la herramienta *Edit Mask*, seleccionando la opción *Draw*.



**Figura III.5.-** Modelo del hueso cortical obtenido a partir de archivos DICOM.

Análisis numérico biomecánico de un fémur con patología osteogénica imperfecta ante una colisión

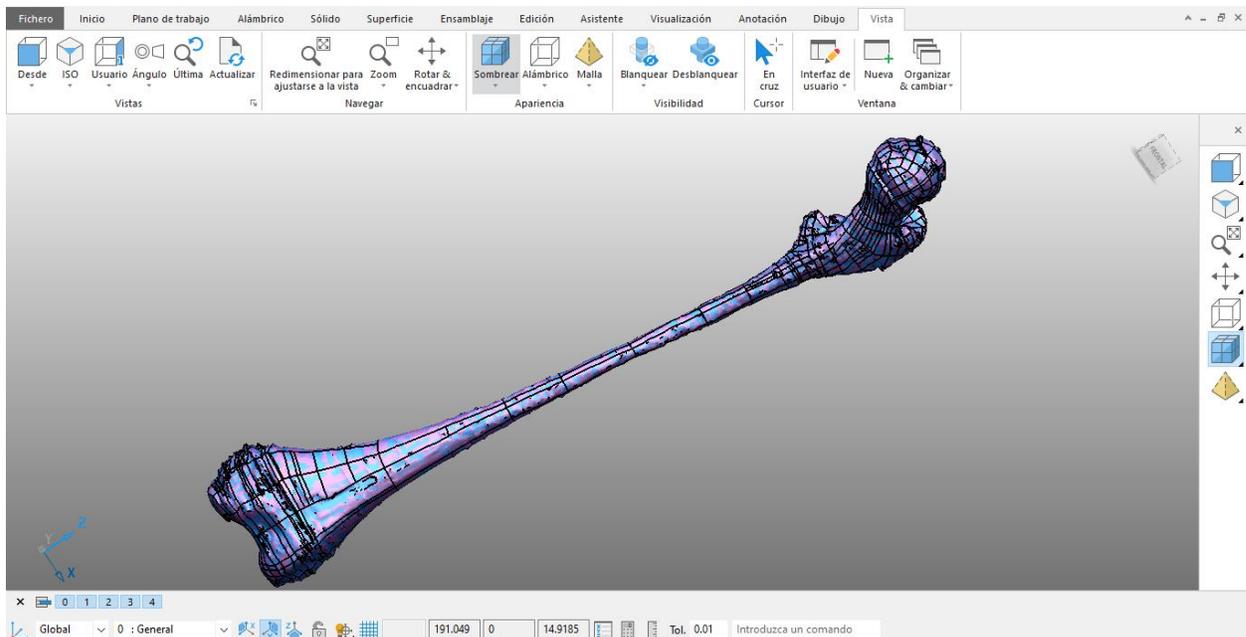
Al terminar el modelo se aplicaron los filtros *Wrap* y *Smooth* para refinar la superficie y rellenar vacíos. Cuando la superficie se observó uniforme, se procedió a generar la máscara del hueso trabecular con una operación booleana, realizando la función de dividir la máscara. Para ellos, se genera una máscara que completara el espacio dentro del hueso cortical, considerando todo el interior como tejido trabecular. Con la operación booleana se realiza una resta que permite diferenciar entre la estructura interna y la externa partiendo del tejido cortical. Posteriormente, se utiliza la herramienta *Split Mask* para generar la máscara que representa al tejido trabecular. Una vez generada esta máscara se puede observar que tiene mínimos errores que se corrigieron de forma manual para obtener un cuerpo sólido, al cual también se le aplicaron los filtros *Wrap* y *Smooth* para perfeccionar la superficie. Finalmente, se exportan ambos modelos tridimensionales en formato *\*stl*, para realizar su solidificación en un programa *CAD*.



**Figura III.6.-** Representaciones tridimensionales en formato *\*stl* de los biomodelos obtenidos.  
A) Tejido cortical. B) Tejido trabecular.

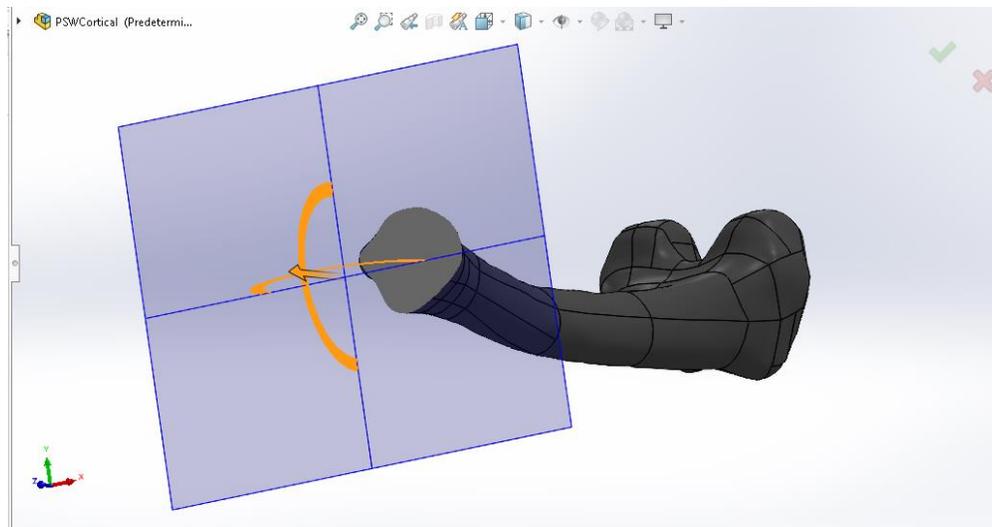
#### III.2.4.- Implementación del modelo sólido del hueso cortical y trabecular del fémur [III.4]

El modelo tridimensional en formato *\*stl*, no cuenta con una geometría, ya que está conformado por puntos. Para poder realizar un análisis por el *MEF*, es necesario contar con un modelo conformado por geometrías cerradas. Para este fin se utilizó el programa *PowerShape® Student Edition*, que permite hacer una corrección de las superficies aplicando filtros. Así como, la generación de un discretizado con el cual se realiza la solidificación del modelo.



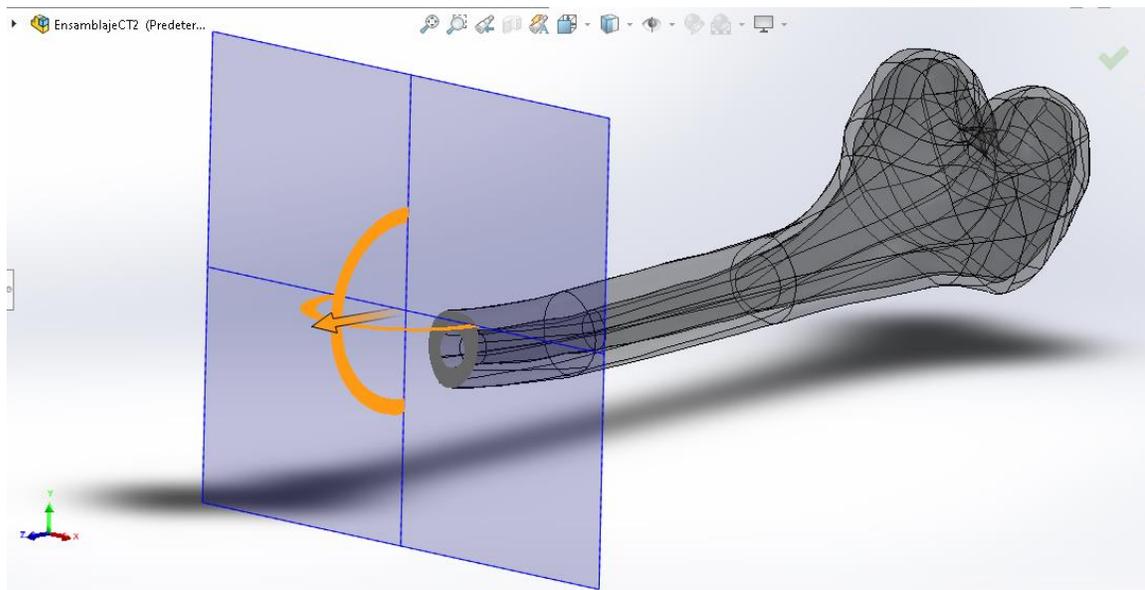
**Figura III.7.-** Discretizado del tejido trabecular del fémur con el programa *PowerShape*<sup>®</sup>

Al finalizar se importa el modelo solidificado en formato \*. *parasolid*, el cual es identificado por programas *CAD*. Así como, programas de análisis por el método de elementos finitos. El programa computacional *SolidWorks*<sup>®</sup> se utilizó posteriormente para comprobar que los modelos realizados son funcionales, inicialmente se realizó un diagnóstico de importación en el cual se verifica que no existan caras ni separaciones defectuosas en la geometría del modelo. Posteriormente, se realizó un corte transversal en los modelos en donde se observa que el interior del mismo es sólido.



**Figura III.8.-** Visualización del corte transversal del tejido cortical para comprobar que es un modelo sólido funcional

Después de comprobar que ambos modelos son funcionales se genera en el programa *SolidWorks*<sup>®</sup> una cavidad en el tejido cortical para representar correctamente la geometría del hueso. Esta acción se realiza en la sección de ensamble fusionando el tejido cortical y el trabecular.



**Figura III.9.-** Cavidad generada en el tejido cortical al fusionarlo con el tejido trabecular en el programa *SolidWorks*<sup>®</sup>

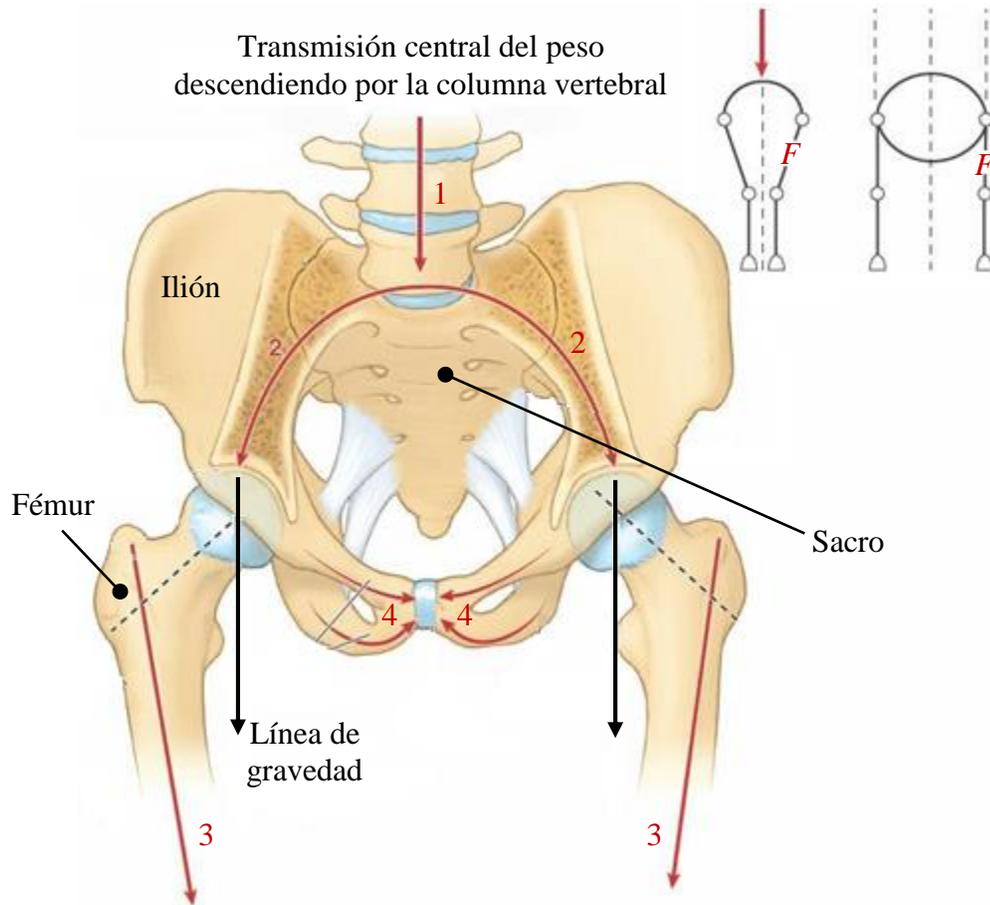
### III.3.- Análisis numérico del modelo 3D del fémur izquierdo de un infante [III.5]

El análisis numérico se desarrolló en el programa computacional *Ansys Workbench*<sup>®</sup>, el procedimiento se realizó en el siguiente orden:

- Definición de la geometría del modelo.
- Definición de las propiedades mecánicas.
- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado.
- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo.
- Solución del modelo.
- Obtención y visualización de resultados.

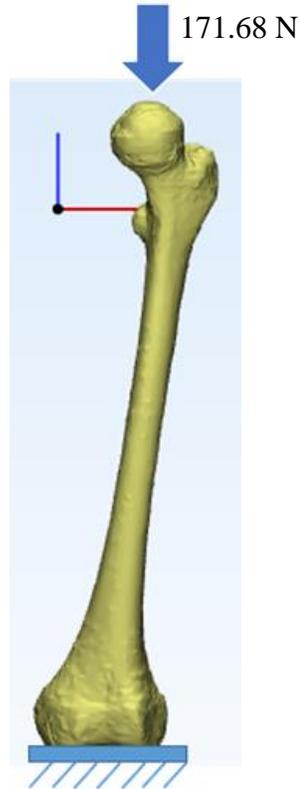
El análisis numérico se aplicó en dos casos de estudio, en ambos se parte de una posición de bipedestación, las cuales son bipodal y unipodal. Se considera para los dos casos una restricción en todos los grados de libertad ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $Rot_x$ ,  $Rot_y$  y  $Rot_z$ ) en el extremo distal del fémur. La estructura ósea que se desea analizar es el fémur. Por lo tanto, se consideró para el primer análisis al paciente en una posición de bipedestación, esta posición es esencial para la movilidad y la

marcha. Los estudios cinéticos han demostrado la acción de fuerzas notables sobre la articulación de la cadera durante la ejecución de actividades simples. Por esta razón es importante entender los factores implicados en la producción de estas fuerzas. Durante la bipedestación en apoyo bipodal, la línea de gravedad del cuerpo suprayacente pasa posterior a la sínfisis púbica y debido a que la articulación de la cadera es estable se puede conseguir una bipedestación erecta sin contracción muscular a través del efecto estabilizador de la capsula articular y de los ligamentos capsulares [III.6].



**Figura III.10.-** Cintura pélvica y articulaciones relacionadas, transferencia del peso

Sin actividad muscular que produzca momentos alrededor de la articulación de la cadera, el cálculo de la fuerza de reacción articular se simplifica para el análisis del primer caso. La magnitud de la fuerza sobre cada cabeza femoral durante la bipedestación en apoyo bipodal es la mitad del peso del cuerpo suprayacente. El peso del paciente es de 35 kg, de esta manera, la fuerza que se aplicará sobre la cabeza femoral izquierda, será de 171.68 N.



**Figura III.11.-** Diagrama de cuerpo libre del fémur izquierdo en posición de bipedestación bipodal con carga aplicada y condiciones de frontera

#### **III.4.- Análisis del fémur izquierdo de un infante en posición de bipedestación bipodal**

A continuación, se presentan las generalidades para realizar el análisis en posición bipedestación bipodal.

##### **III.4.1.- Geometría del modelo**

Los dos modelos se exportaron en formato *\*.parasolid*, se realizó un estudio para comprobar el funcionamiento del modelo.

##### **III.4.2.- Propiedades mecánicas del modelo**

Se agregaron dos materiales a la librería de *Workbench* para representar el tejido cortical y el trabecular, se consideraron los materiales como isotrópicos, homogéneos y continuos (Tabla III.1).

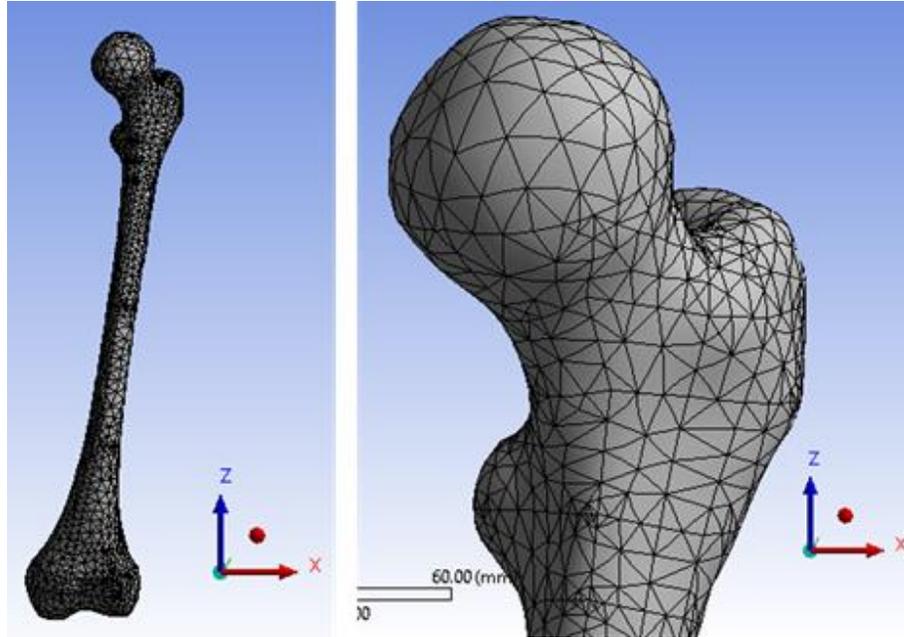
##### **III.4.3.- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado**

Para poder realizar una simulación numérica en el biomodelo debe generarse un discretizado de elementos tridimensionales, con el propósito de realizar el análisis por el método de elementos

finitos. El discretizado que se generó sobre la superficie del biomodelado se compone de elementos triangulares de distintos tamaños y se realizó de manera libre, ya que la geometría es irregular. El tamaño de los elementos presenta un arreglo no específico y un tamaño promedio de 5.00.

**Tabla III.1.-** Propiedades mecánicas de los materiales [III.7]

Tejido	Módulo de <i>Young</i> (MPa)	Relación de <i>Poisson</i>
Hueso cortical	15000	0.3
Hueso trabecular	600	0.2



**Figura III.12.-** Discretizado del modelo del sistema biológico en el ANSYS Workbench®

**III.4.4.- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo**

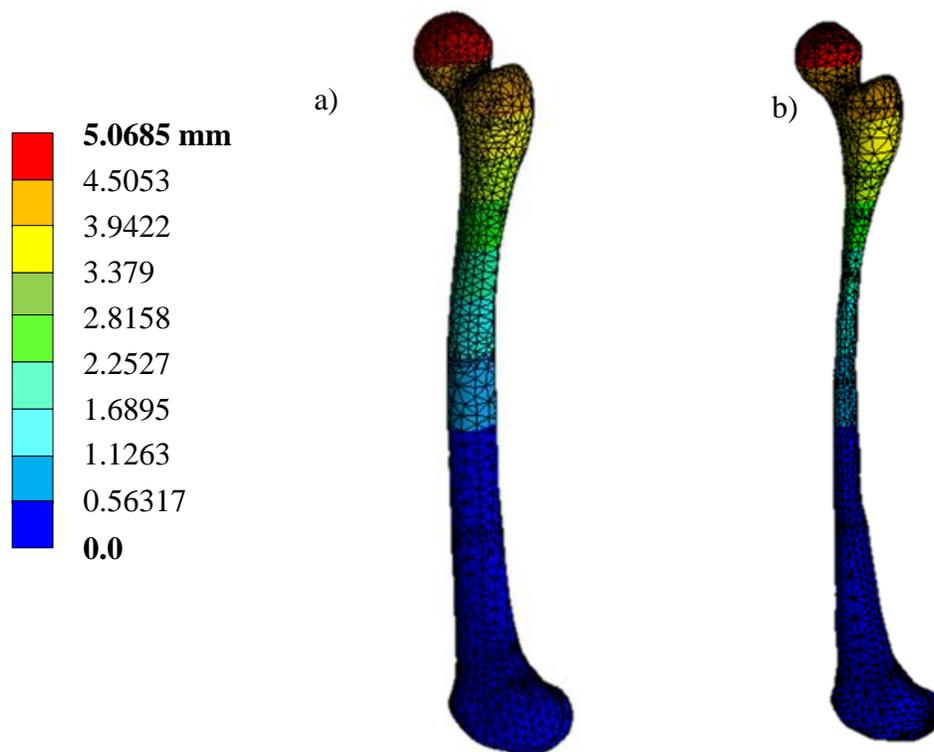
Después de que el modelo se discretizo, se restringen todos los grados de libertad ( $U_x, U_y, U_z, Rot_x, Rot_y$  y  $Rot_z$ ) en el extremo distal del fémur. También se aplicó una fuerza equivalente a 171.68 N en el extremo proximal sobre la cabeza femoral (Figura III.13). Es muy importante mencionar que la carga se aplica de manera vertical sólo para verificar el funcionamiento del modelo en el programa computacional.

**III.4.5.- Solución del modelo**

Al finalizar los pasos del procedimiento, el modelo está listo para resolver el análisis con las condiciones propuestas. Se obtuvieron los siguientes resultados; elongaciones, esfuerzos (nominales, von-Mises, cortantes, principales) y las deformaciones unitarias.



**Figura III.13.-** Aplicación de carga y de condiciones de frontera en el modelo 3D



**Figura III.14.-** Elongación total. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

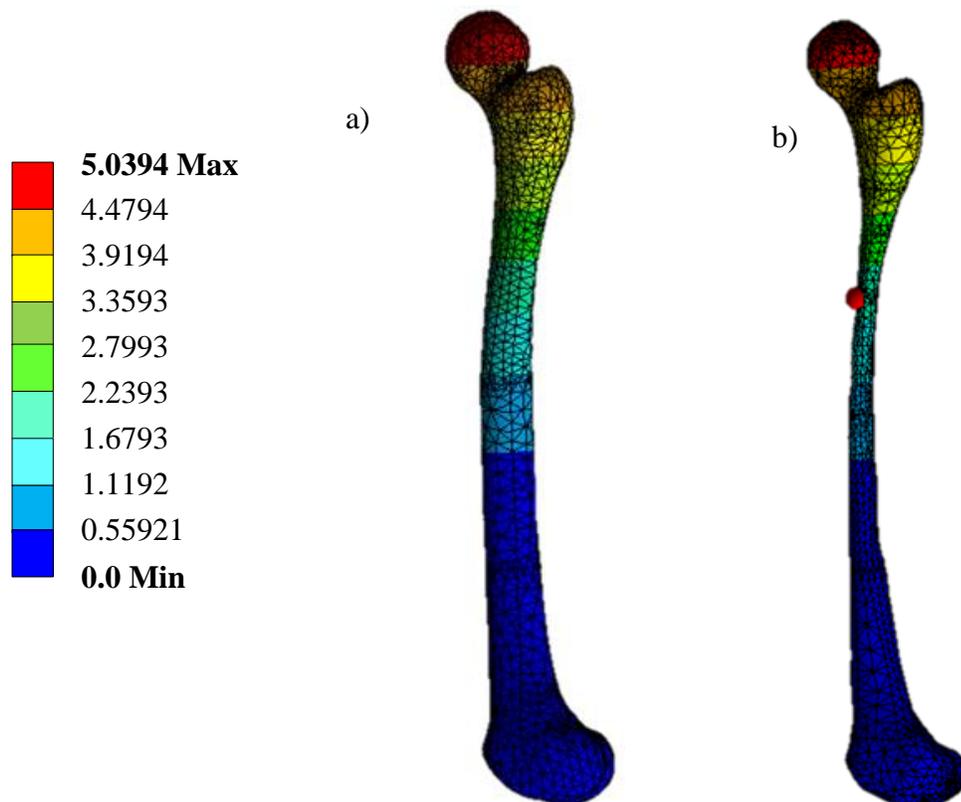


Figura III.15.- Elongación nominal eje x. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

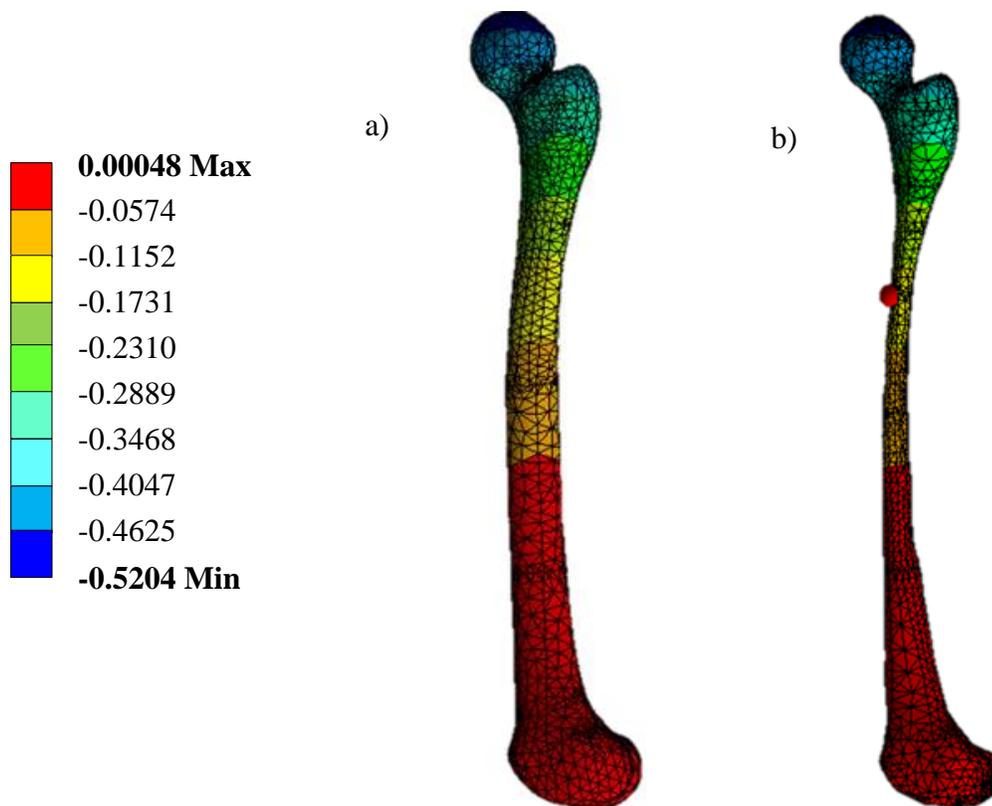
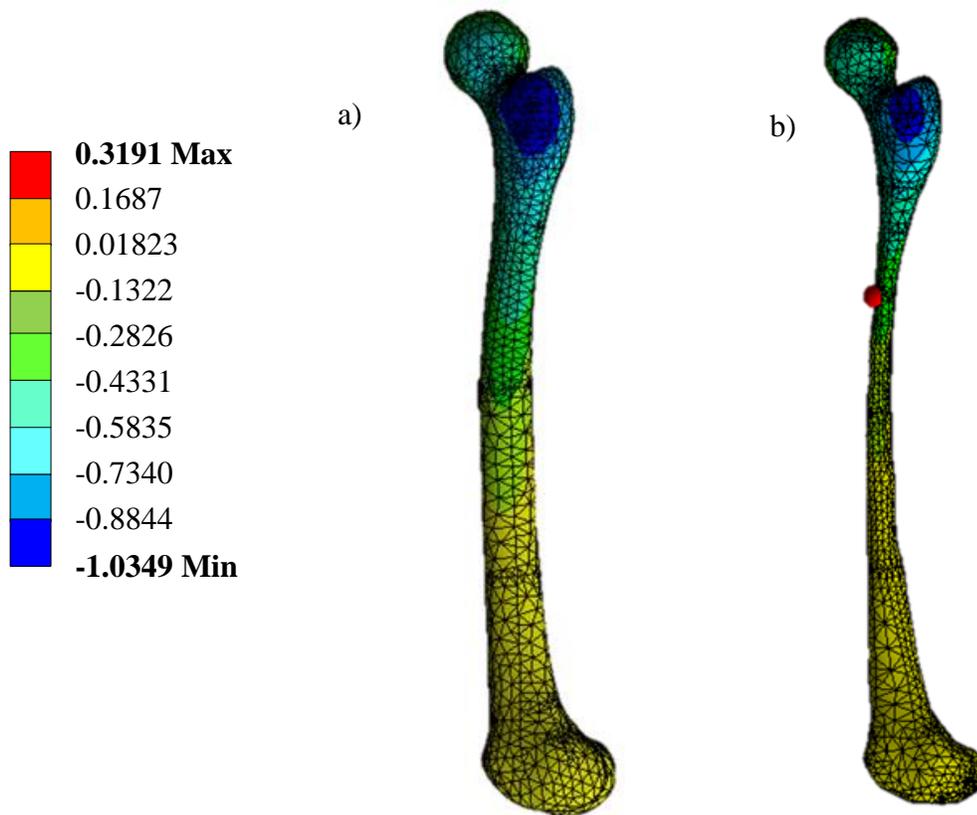
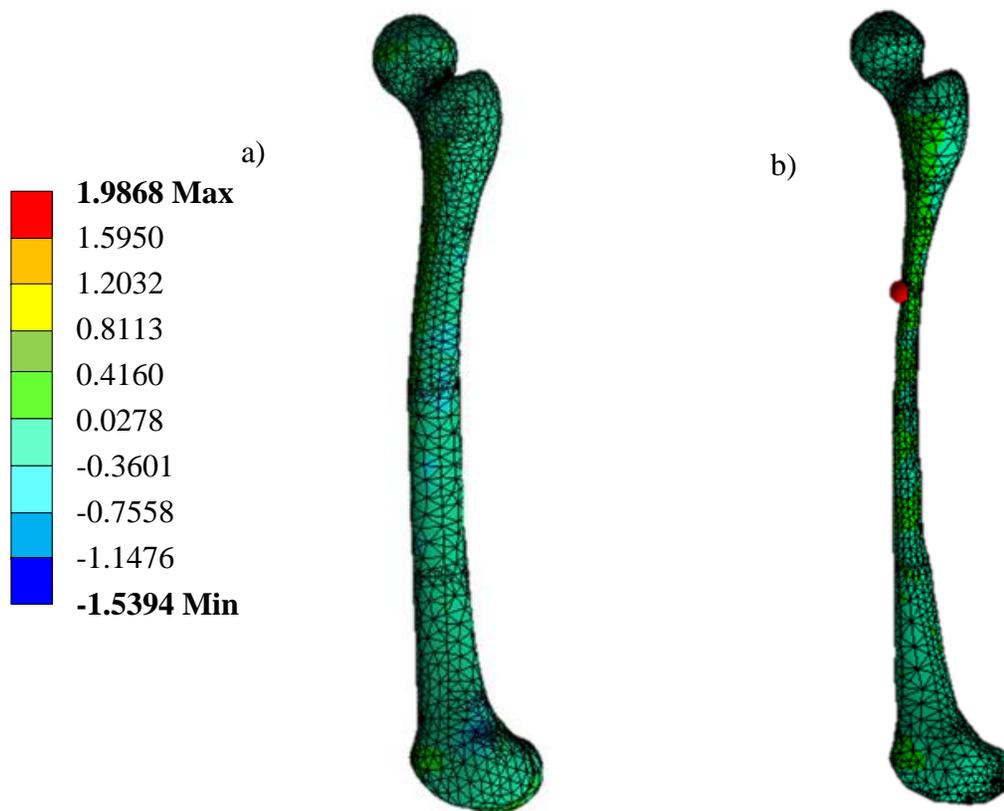


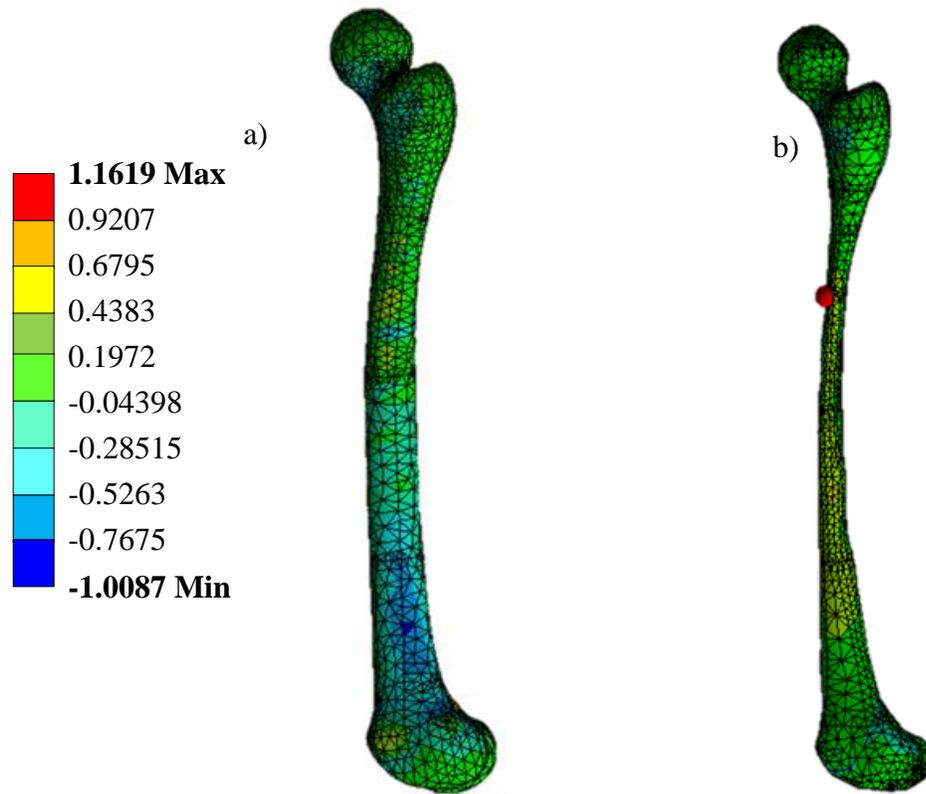
Figura III.16.- Elongación nominal eje y. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



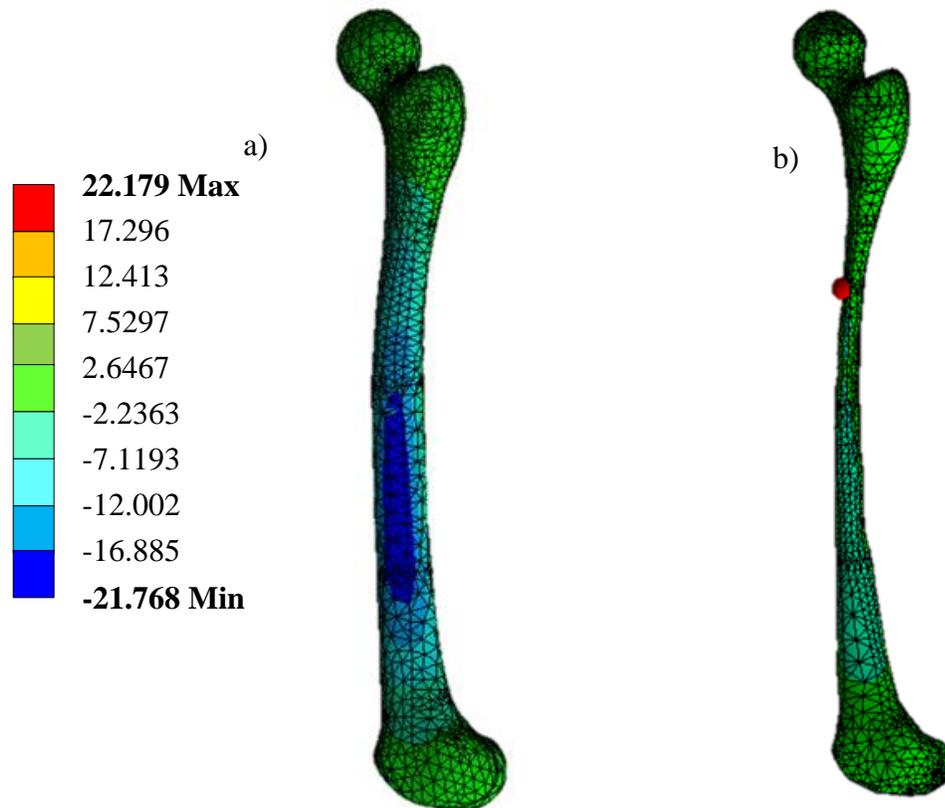
**Figura III.17.-** Elongación nominal eje z. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



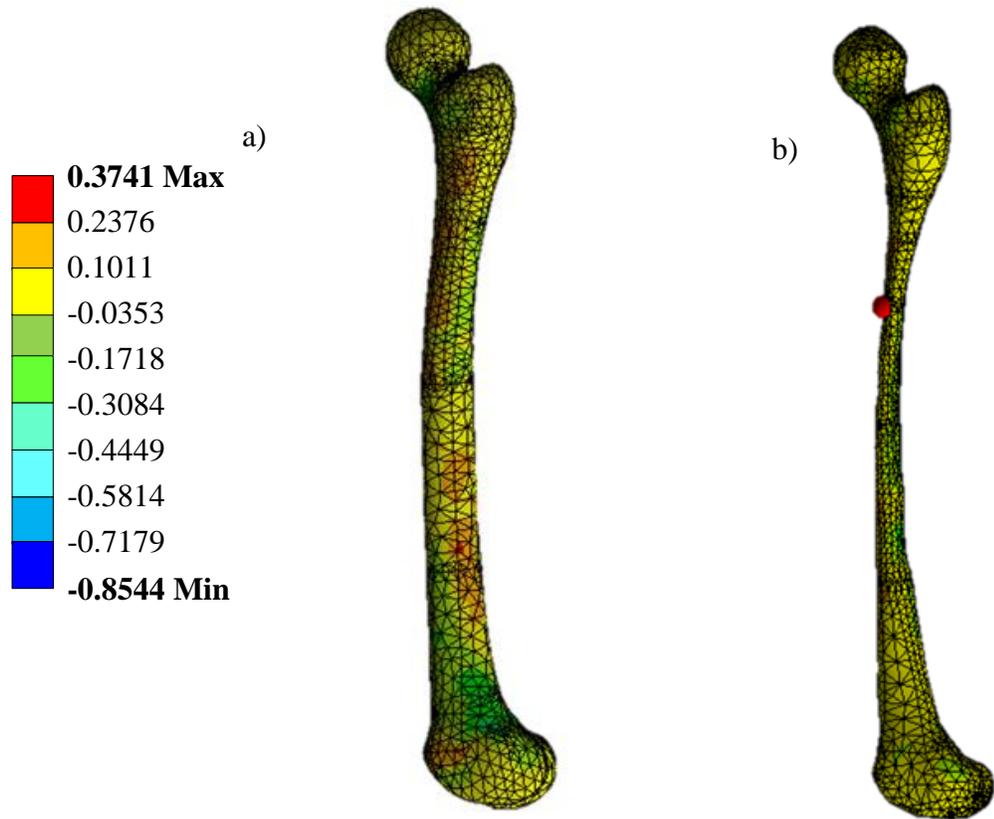
**Figura III.18.-** Esfuerzo nominal eje x. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



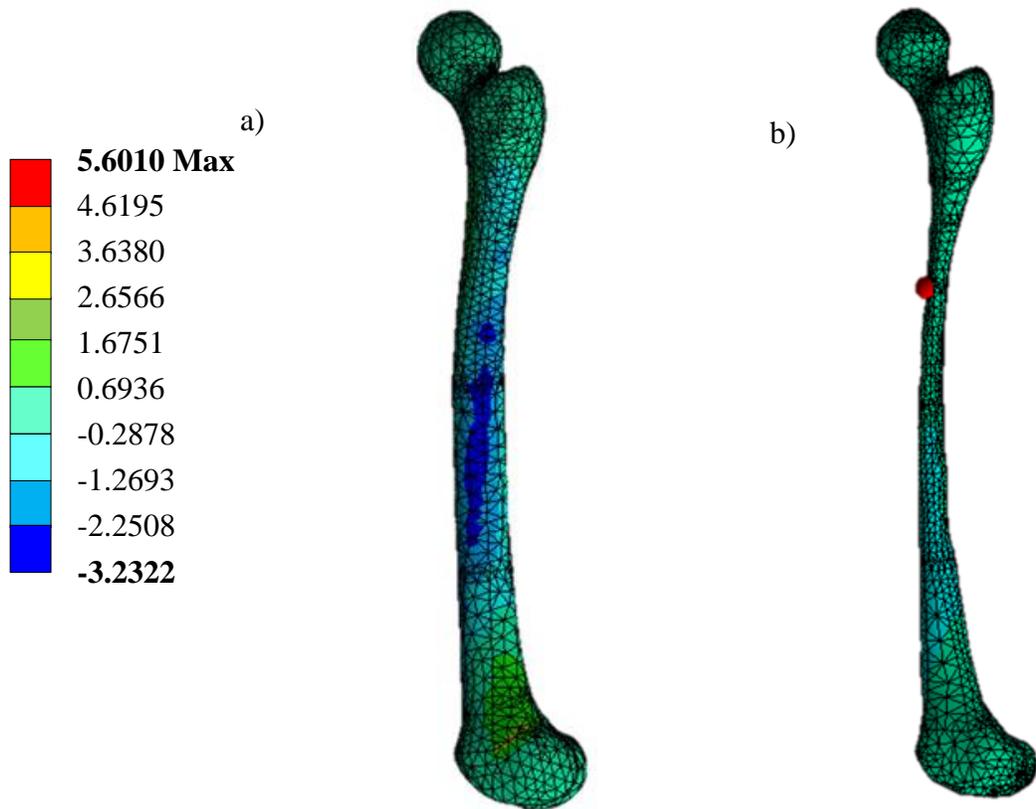
**Figura III.19.-** Esfuerzo nominal eje y. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



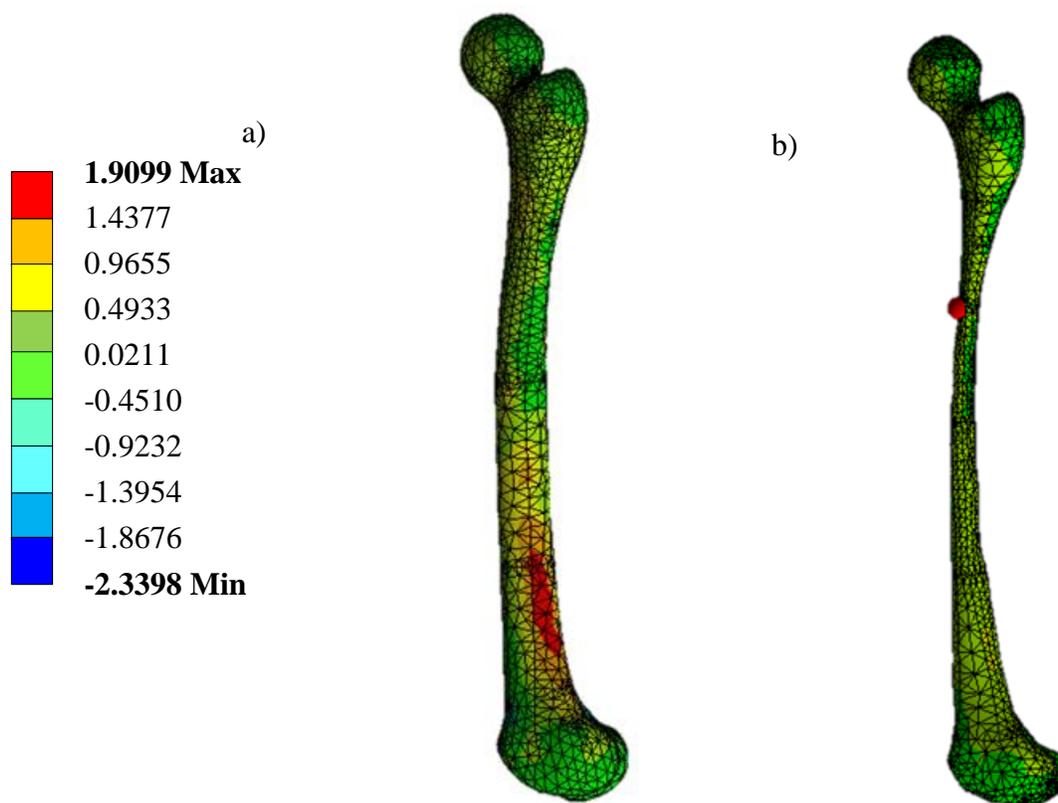
**Figura III.20.-** Esfuerzo nominal eje z. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



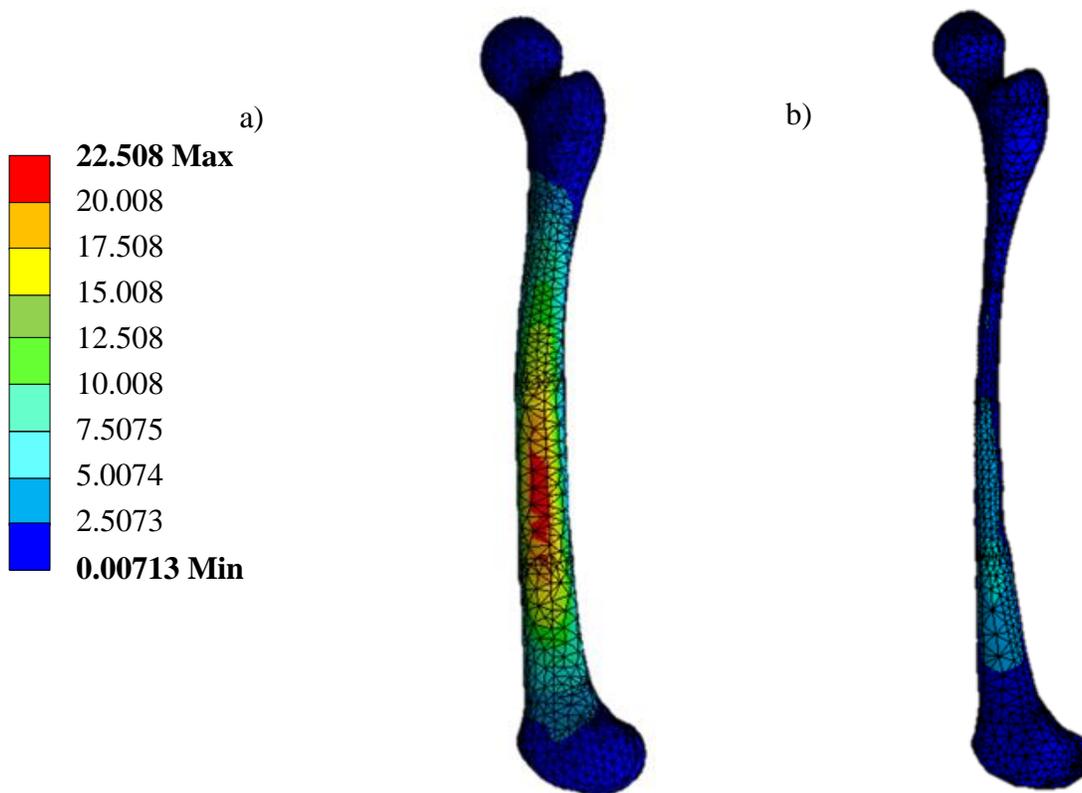
**Figura III.21.-** Esfuerzo cortante plano xy. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura III.22.-** Esfuerzo cortante plano xz. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura III.23.-** Esfuerzo cortante plano yz. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura III.24.-** Esfuerzo de falla teoría de von Mises. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

**Tabla III.2.- Resultados del análisis**

Valor	Resultados	
	Máximo	Mínimo
Deformación unitaria total	5.0685	0
Deformación unitaria eje x	5.0394	0
Deformación unitaria eje y	0.00048	-0.5204
Deformación unitaria eje z	0.3191	-1.0349
Esfuerzo nominal eje x (MPa)	1.9868	0
Esfuerzo nominal eje y (MPa)	1.1619	-1.0087
Esfuerzo nominal eje z (MPa)	22.179	-21.768
Esfuerzo cortante plano xy (MPa)	0.3741	-0.8544
Esfuerzo cortante plano xz (MPa)	5.6010	-3.2322
Esfuerzo cortante plano yz (MPa)	1.9099	-2.3398
Esfuerzo von Mises (MPa)	22.508	0.00713

### III.5.- Sumario

En este capítulo se describió la metodología para elaborar un biomodelo de un fémur aparentemente sano de un paciente pediátrico. Se generaron dos modelos que representan la anatomía del hueso cortical y el hueso trabecular, los cuales fueron perfeccionados en diferentes programas computacionales para lograr tener modelos funcionales con superficies uniformes para ser transformadas posteriormente en un discretizado volumétrico para su uso en un programa computacional de solución numérica por medio de *MEF*. Se exportó el modelo a *ANSYS Workbench*<sup>®</sup> en donde se realizó un estudio de prueba para comprobar que el modelo arrojaba resultados.

### III.6.- Referencias

- 1.- Mesón-Andrés, S., *Análisis del comportamiento biomecánico de un fémur humano, Trabajo de grado*, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, pp 5-6, 2014.
- 2.- Flores-Renteria, M. A., Ortiz-Domínguez, M., Cruz-Aviles, A. y López-Sánchez, F., La mecánica del hueso, una revisión de los modelos de remodelación óseo; *La mecánica del hueso, Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, Vol. 5, No. 9, pp 1-15, 2018.

- 
- 3.- Fuerte-Hernández, A., Rodríguez-Cañizo, R. G., Susarrey-Huerta, O., Merchán-Cruz, A. E., Salvador-Pineda, J. M. y Pérez-Hernández, E., Aplicación de metodología de modelado de utilizando tomografías computarizadas para su análisis numérico, *Revista Facultad de Ingeniería*, No. 72, pp 116-126, 2014.
  - 4.- Federación de Enseñanza, Introducción a la tomografía computarizada (TC), *Revista Digital para Profesores de la Enseñanza*, No. 5, pp 1-8, 2009.
  - 5.- Maya-Anaya, D., *Análisis Numérico de Efectos por Cargas en Huesos del Antebrazo*, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, 2019.
  - 6.- Nordin, M. y Frankel, H., *Biomecánica Básica del Sistema Musculoesquelético*, Ed. Mc Graw-Hill, pp 211-222, 2004.
  - 7.- Ramírez-Vela, V., *Análisis Numérico de Fractura en Huesos Largos en Pacientes Afectados con Osteogénesis Imperfecta*, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 55, 63, 2017.

---

---

# **CAPÍTULO 4:**

# **ÁNÁLISIS**

# **NUMÉRICO 1**

---

### IV.1.- Introducción

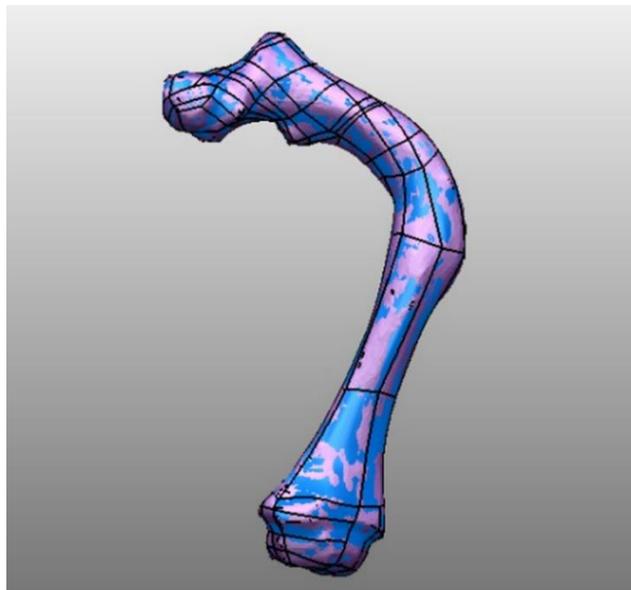
La osteogénesis imperfecta (*OI*) presenta variables manifestaciones clínicas, la principal es la fragilidad ósea, la cual resulta en lesiones como fracturas ante fuerzas internas y externas, provocadas por traumatismos mínimos o en ocasiones inexistentes. Uno de los principales objetivos, desde el punto de vista terapéutico es mejorar la capacidad funcional del paciente. Con frecuencia se observan deformidades y complicaciones a nivel musculo-esquelético, situación que obstaculiza el desarrollo de actividades de la vida cotidiana. La terapia con bifosfonatos ha sido un avance importante en el tratamiento de esta enfermedad, ya que ha permitido realizar mejores programas de fisioterapia, reduciendo el rango de fracturas y el dolor óseo en pacientes. Es común que los pacientes con *OI* presenten debilidad muscular a nivel de la cintura pélvica, lo que provoca rotación externa de cadera. Así como, contracturas en flexión y abducción debido a deformidades femorales. La fractura de huesos largos implica un periodo de inmovilización, factor que provoca la aparición de osteoporosis, resultando fracturas nuevas, así como temor al retomar la actividad física [IV.1]. La calidad de vida en sujetos con *OI*, se ve limitada debido a la disminución de las funciones motoras. Un tratamiento integral para la rehabilitación física es muy importante durante la infancia, que es cuando se establecen los fundamentos para el funcionamiento de la vida. La cirugía con enclavado intramedular telescópico, el tratamiento con bifosfonatos. Asimismo, el uso de ortesis y productos de apoyo, mejoran la capacidad funcional del sujeto, permitiendo su independencia e integración social [IV.2].

### IV.2.- Modelado del fémur izquierdo de un infante con *OI*

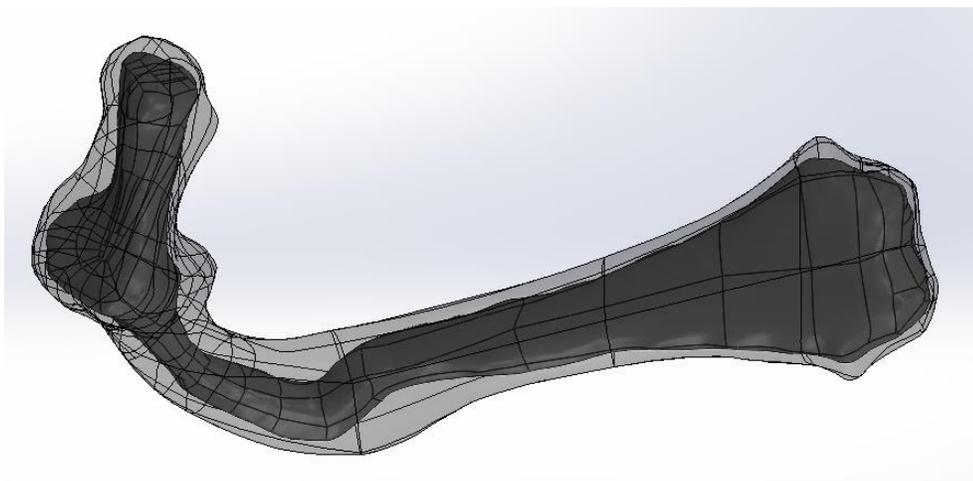
Para realizar el modelado del fémur de un paciente con *OI*, se implementa el mismo procedimiento descrito en el Capítulo III, mediante la importación imágenes en archivo *DICOM* se genera un modelo 3D en el programa *MIMICS*<sup>®</sup>, seleccionando la sección de interés para crear una máscara que represente la escala de grises del tejido cortical y trabecular (Figura IV.1). Una vez que se han generado los archivos *\*stl* del tejido cortical y trabecular, son importados al programa *PowerShape*<sup>®</sup> *Student Edition*, con el objetivo de crear modelos sólidos, para ello se crea una malla de forma manual sobre toda la superficie del modelo 3D y posteriormente aplican filtro como el suavizado de la superficie permitiendo la optimización y corrección de errores en el mismo (Figura IV.2). Finalmente se obtiene un archivo en formato *\*.parasolid*, el cual es importado al programa *SolidWorks*<sup>®</sup> para verificar que el modelo es sólido y no presentara errores en el análisis numérico ejecutado en el programa *Ansys Workbench*<sup>®</sup> (Figura IV.3).



**Figura IV.1.-** Desarrollo de la máscara del hueso cortical



**Figura IV.2.-** Discretizado del tejido cortical del fémur con el programa *PowerShape*®



**Figura IV.3.-** Tejido cortical y trabecular para comprobar que es un modelo sólido funcional

---

**IV.3.- Análisis numérico del modelo 3D del fémur izquierdo de un infante con *OI***

El análisis numérico se desarrolló en el programa computacional *Ansys Workbench*<sup>®</sup>, el procedimiento se realizó de la forma descrita en el Capítulo III en el siguiente orden:

- Definición de la geometría del modelo.
- Definición de las propiedades mecánicas.
- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado.
- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo.
- Solución del modelo.
- Obtención y visualización de resultados.

Para realizar el análisis numérico en el fémur izquierdo de un infante aparentemente sano en el Capítulo III, se consideró una posición de bipedestación. En el análisis realizado en este capítulo se aplicarán las mismas condiciones de frontera, restringiendo en todos los grados de libertad ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $Rot_x$ ,  $Rot_y$  y  $Rot_z$ ) en el extremo distal del fémur.

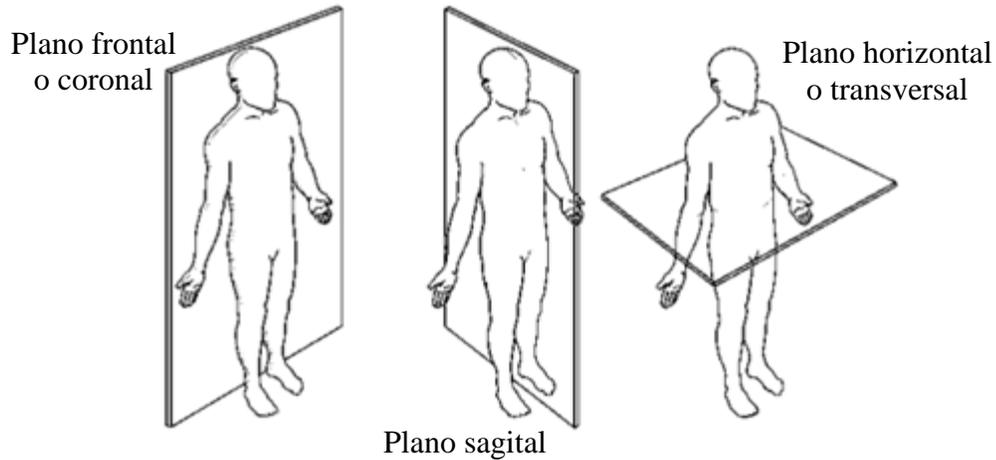
La aplicación de fuerzas se realizará sobre la articulación de la cadera, cambiando la magnitud de la misma debido a que el peso del paciente es diferente. El análisis se realiza con el objetivo de encontrar un comparativo de las características mecánicas del hueso sano y el hueso afectado con *OI*. Por lo tanto, se considera un caso hipotético en donde el paciente con *OI* permanece en posición de bipedestación.

**IV.4.- Equilibrio de los segmentos corporales**

Las funciones de los segmentos corporales no se deben estudiar individualmente, pero sus movimientos sí. La presencia de una deformación en algún nivel se ve compensada siempre por los segmentos próximos, por ejemplo, un *genu valgo*, se acompaña generalmente de un pie aducto y una anteversión persistente del cuello del fémur provoca una torsión externa de la tibia. La curva anterior del fémur se compensa con la colocación hacia atrás de los cóndilos femorales. En condiciones normales existe un equilibrio entre las estructuras con conservación de una situación estaticodinámica. Cuando no se logran estas compensaciones, es decir, no se equilibra la función, existen alteraciones funcionales.

#### IV.5.- Planos anatómicos de la cadera

La cadera tiene tres ejes de movimiento y tres grados de libertad, es la articulación proximal del miembro inferior y tiene la función de orientar en todas las direcciones del espacio (Figura IV.4).



**Figura IV.4.-** Planos anatómicos del cuerpo

El eje transversal se sitúa en el plano frontal, alrededor del cual se ejecutan los movimientos de flexo-extensión. El eje anteroposterior se encuentra en el plano sagital, que pasa por el centro de la articulación, alrededor del cual se efectúan los movimientos de abducción-aducción. Finalmente, el eje vertical, que se confunde con el eje longitudinal del miembro inferior cuando la cadera está en una posición de alineamiento. Este eje longitudinal permite los movimientos de rotación externa y rotación interna. Los movimientos de la cadera los realiza una sola articulación: la coxofemoral, en forma de enartrosis muy coaptada.

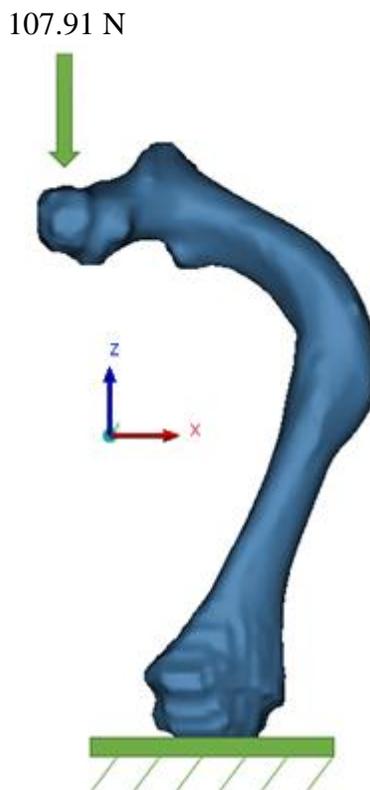
#### IV.6.- Superficie articular durante la bipedestación

Las superficies de la articulación coxofemoral son esféricas, la cabeza femoral está constituida por los 2/3 de una esfera de 40 a 50 mm de diámetro. Los tres ejes de la cadera pasan por su centro geométrico. La cadera está alineada cuando permanece en posición de bipedestación, la cabeza femoral no se recubre por completo con el cótilo, la parte superior del cartílago permanece descubierta en condiciones normales (Figura IV.5) [IV.3]. En el caso del paciente con *OI*, se observa una cadera coxa vara, pues el ángulo que se forma entre el cuello y la diáfisis del fémur se ve disminuido. No se considera actividad muscular que produzca momentos alrededor de la articulación de la cadera, el cálculo de la fuerza de reacción articular se simplifica para el análisis. La magnitud de la fuerza sobre cada cabeza femoral durante la bipedestación en apoyo bipodal es

la mitad del peso del cuerpo suprayacente. El peso del paciente es de 11 kg, de esta manera, la fuerza que se aplicará sobre la cabeza femoral izquierda, será de 107.91 N (Figura IV.6).



**Figura IV.5.-** Articulación coxofemoral en posición de bipedestación



**Figura IV.6.-** Diagrama de cuerpo libre del fémur izquierdo afectado con OI en posición de bipedestación bipodal con carga aplicada y condiciones de frontera

#### IV.7.- Análisis del fémur izquierdo de un infante con *OI* en posición de bipedestación bipodal

A continuación, se presentan las generalidades para realizar el análisis en posición bipedestación bipodal. Sin embargo, es importante resaltar que es una posición que una persona con esta enfermedad no podrá sostener. No obstante, se realiza el análisis como un marco comparativo contra el hueso de una persona sana.

##### IV.7.1.- Geometría del modelo

Al igual que en el Capítulo II, los dos modelos fueron generados de la misma manera y se exportaron en formato \*. *parasolid*, se realizó un estudio para comprobar el funcionamiento del modelo.

##### IV.7.2.- Propiedades mecánicas del modelo

Se agregaron dos materiales a la librería de *Workbench* para representar el tejido cortical y el trabecular, los cuales tienen valores diferentes a los materiales considerados para el análisis del hueso sano en el Capítulo III, se consideraron los materiales como isotrópicos, homogéneos y continuos (Tabla IV.1).

##### IV.7.3.- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado

Para poder realizar una simulación numérica en el biomodelo debe generarse un discretizado de elementos tridimensionales, con el propósito de realizar el análisis por el método de elementos finitos. El discretizado que se generó sobre la superficie del biomodelado se compone de elementos triangulares de distintos tamaños y se realizó de manera libre, ya que la geometría es irregular. El tamaño de los elementos presenta un arreglo no específico y un tamaño promedio de 1.00 mm, en el Capítulo III el tamaño promedio de los elementos fue de 5.00 mm, los elementos del discretizado para el análisis del fémur con *OI*, fue más pequeño debido a que la geometría del hueso requiere mayor detalle.

**Tabla IV.1.-** Propiedades mecánicas de los materiales [IV.4]

Tejido	Módulo de <i>Young</i> (MPa)	Relación de <i>Poisson</i>
Hueso cortical	12000	0.28
Hueso trabecular	3000	0.3



**Figura IV. 7.-** Discretizado del modelo del sistema biológico en el ANSYS Workbench®

#### **IV.7.4.- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo**

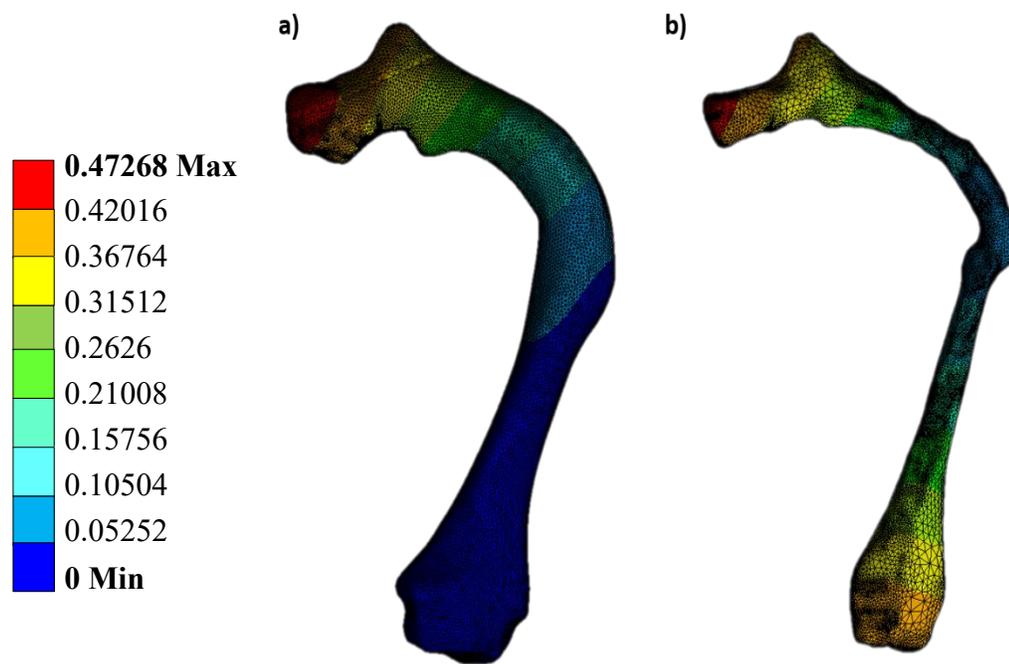
Después de que el modelo se discretizó, se restringen todos los grados de libertad ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $Rot_x$ ,  $Rot_y$  y  $Rot_z$ ) en el extremo distal del fémur. También se aplicó una fuerza equivalente a 107.91 N en el extremo proximal sobre la cabeza femoral.

#### **IV.7.5.- Solución del modelo**

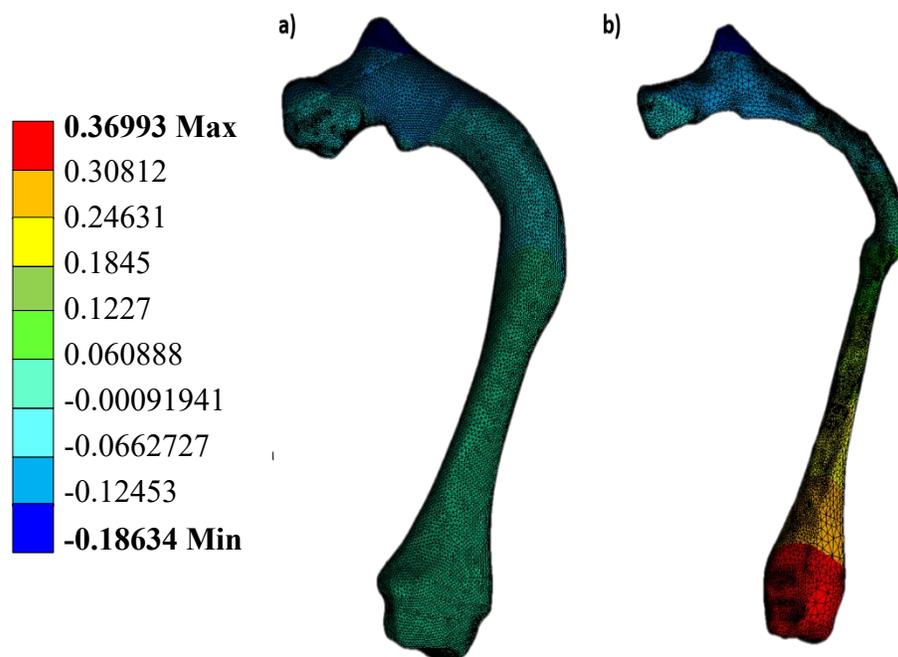
Al finalizar los pasos del procedimiento, el modelo está listo para resolver el análisis con las condiciones propuestas. Se obtuvieron los siguientes resultados; elongaciones, esfuerzos (nominales, von-Mises, cortantes, principales) y las deformaciones unitarias.

#### **IV.7.6.- Resultados obtenidos**

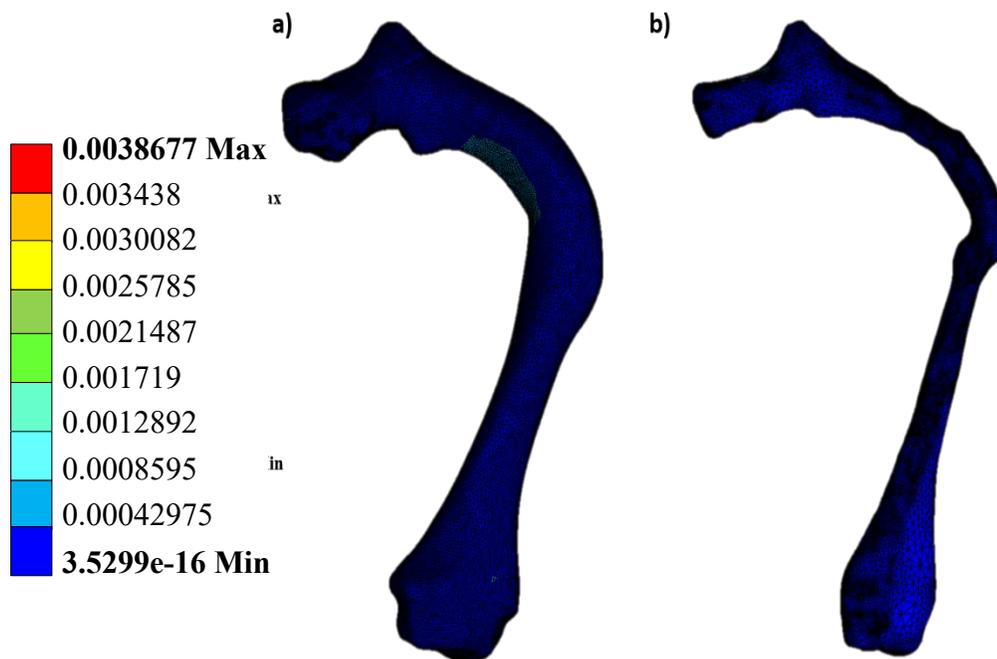
A continuación, se presentan los resultados obtenidos.



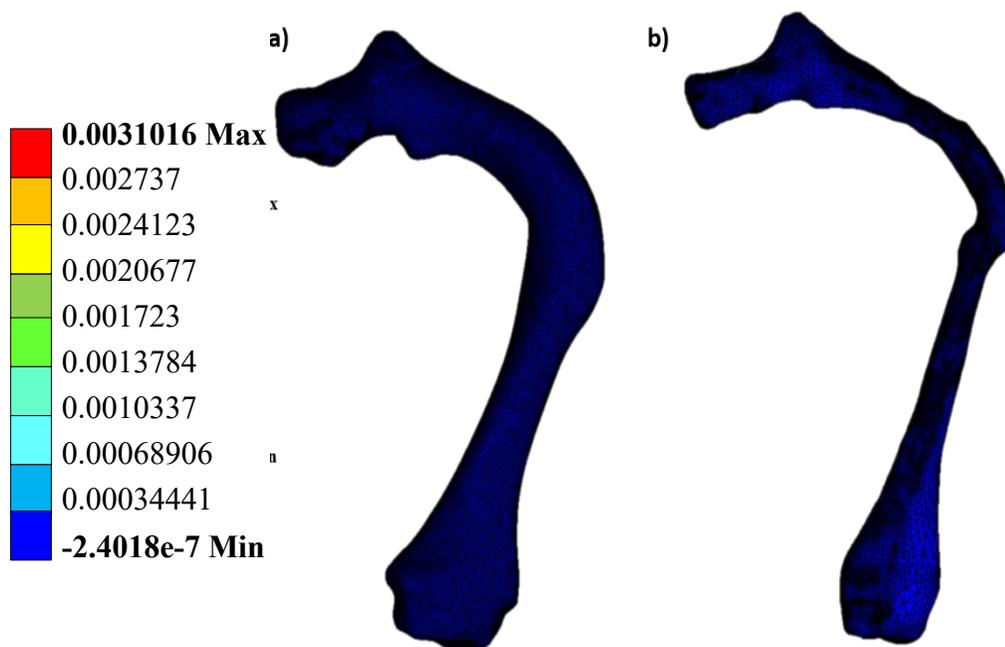
**Figura IV.8.-** Desplazamiento total (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



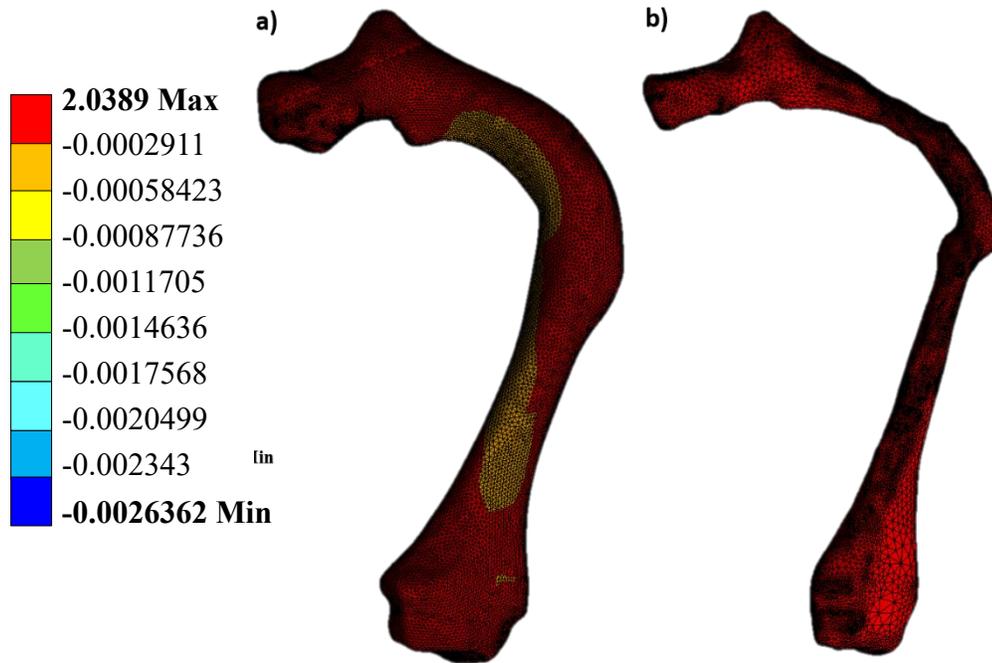
**Figura IV.9.-** Deformación direccional en mm. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



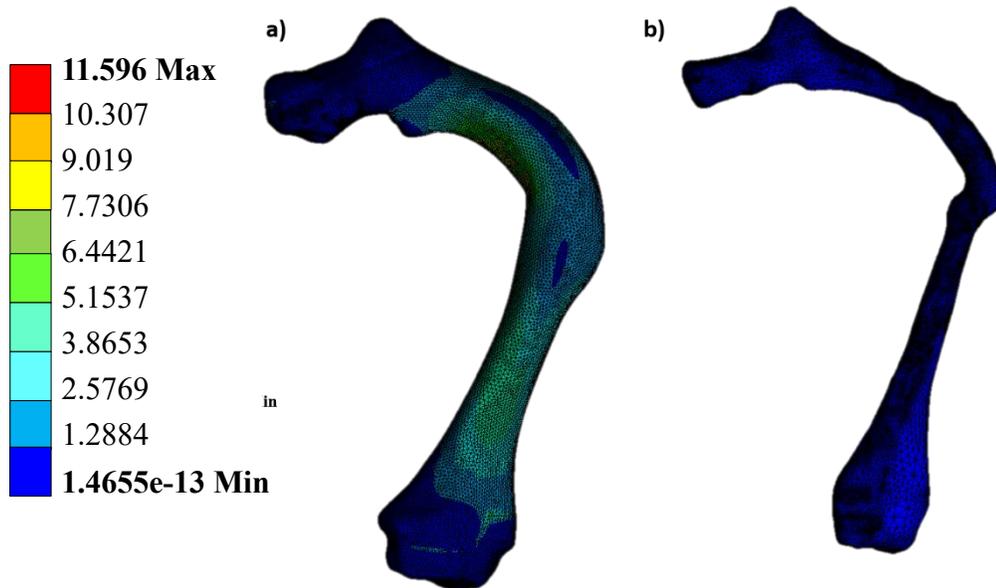
**Figura IV.10.-** Deformación elástica equivalente (Von-Mises) a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



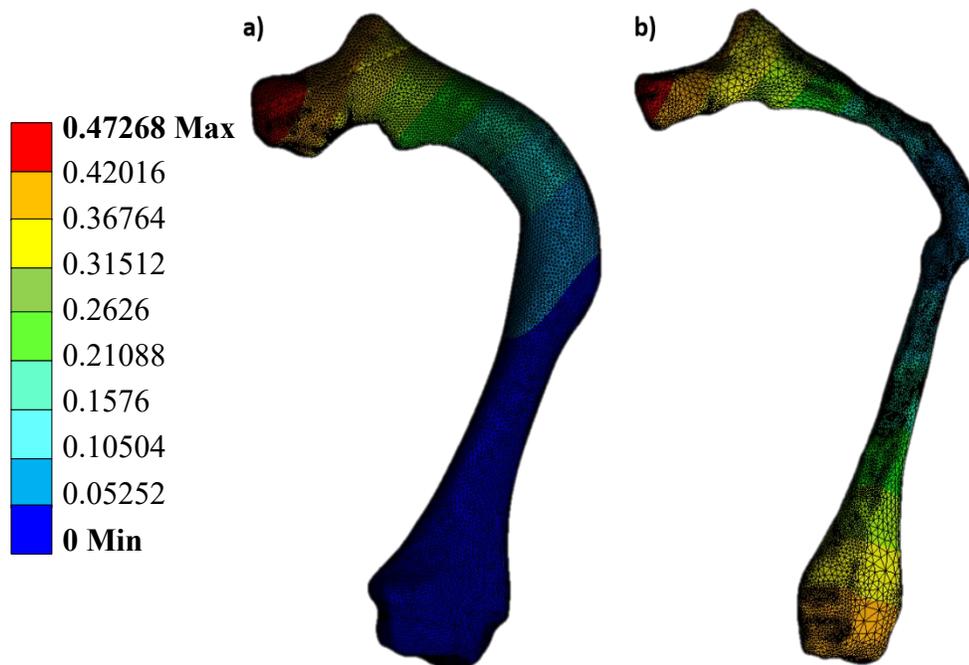
**Figura IV.11.-** Deformación elástica principal máxima. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



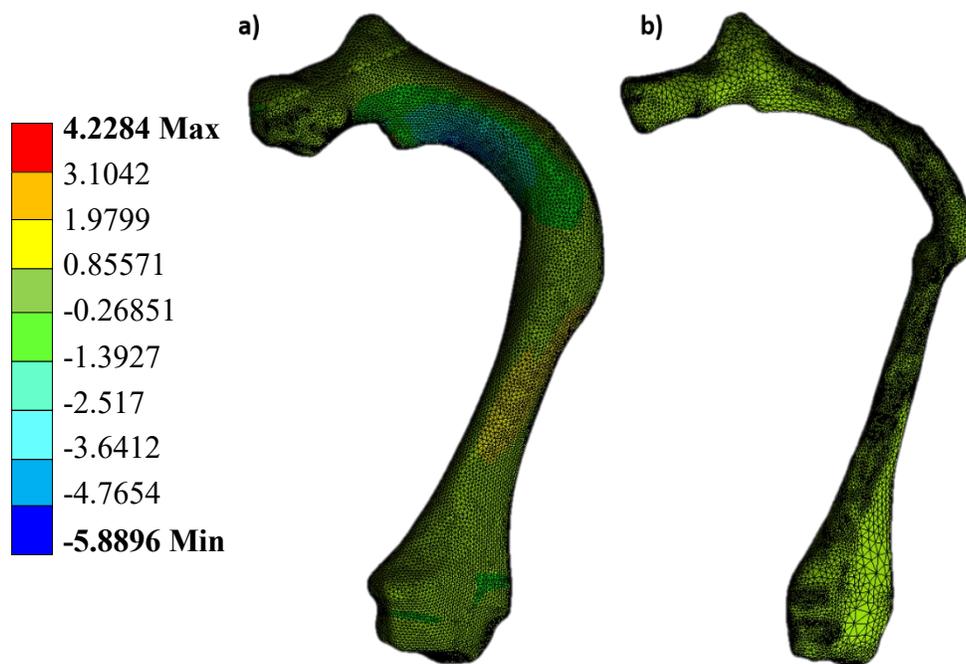
**Figura IV. 12.-** Deformación elástica principal mínima. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



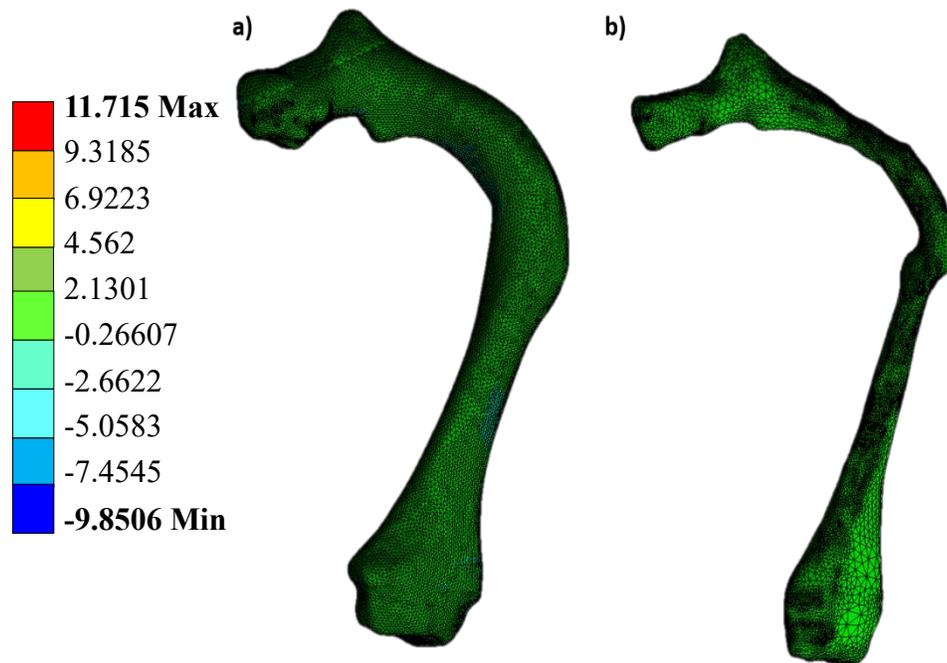
**Figura IV. 13.-** Esfuerzo von Mises (MPa) a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



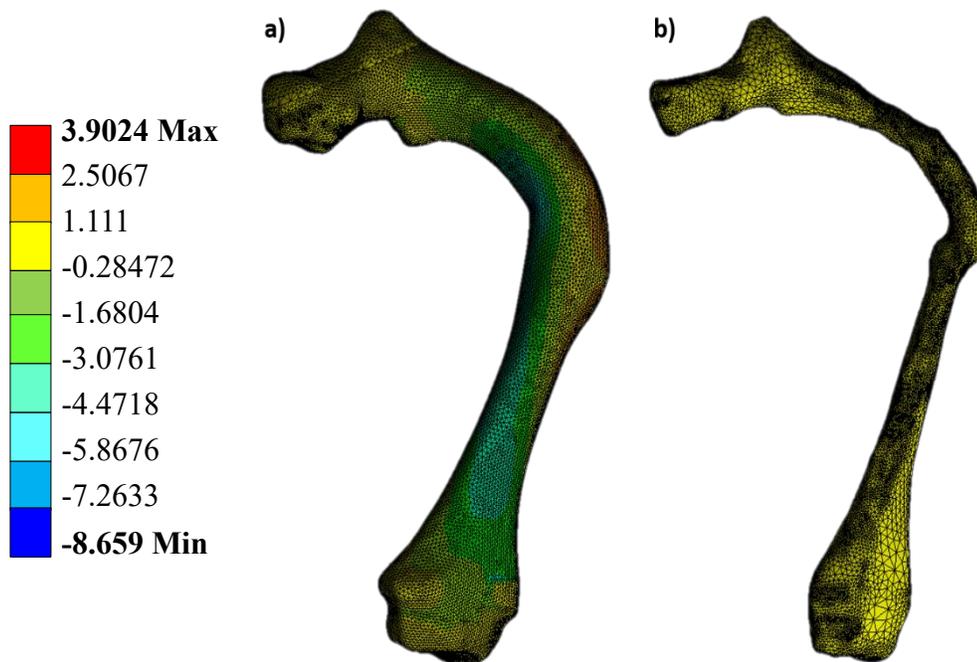
**Figura IV. 14.-** Desplazamiento. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



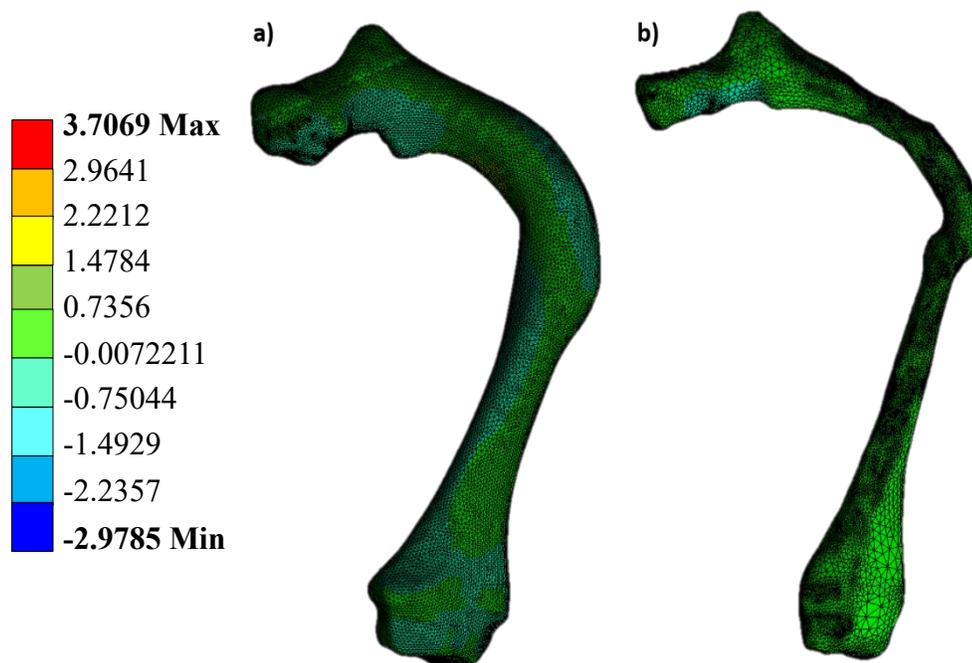
**Figura IV. 15.-** Esfuerzo nominal eje x (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



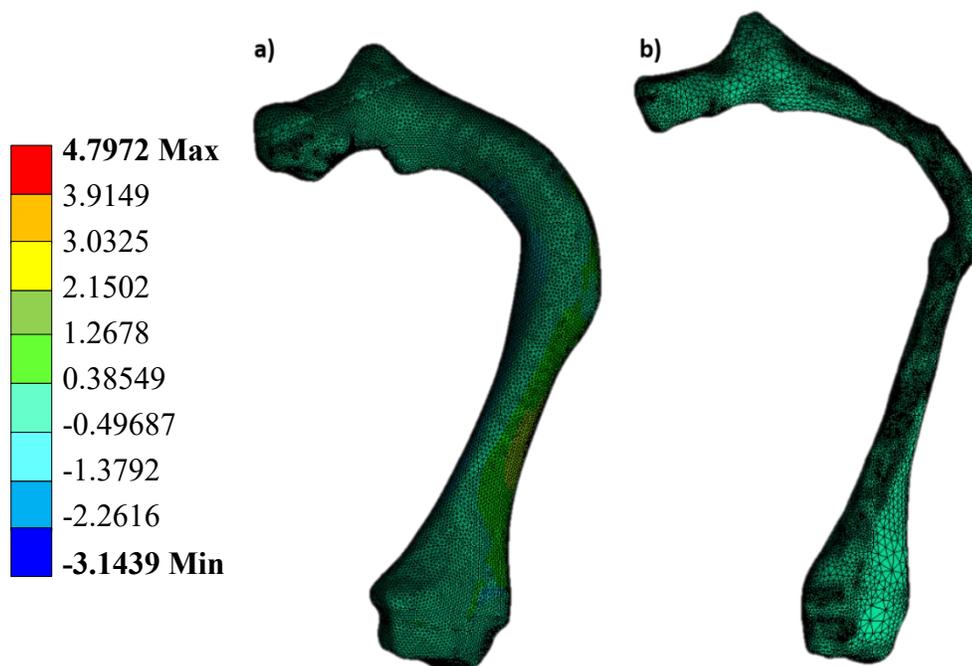
**Figura IV. 16.-** Esfuerzo nominal eje y (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



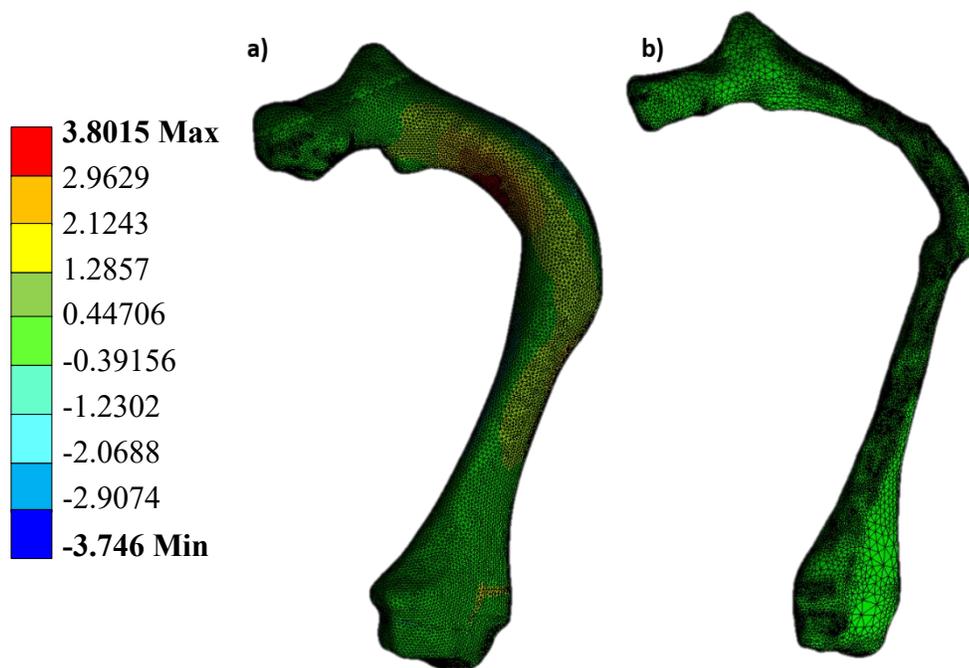
**Figura IV. 17.-** Esfuerzo nominal eje z (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



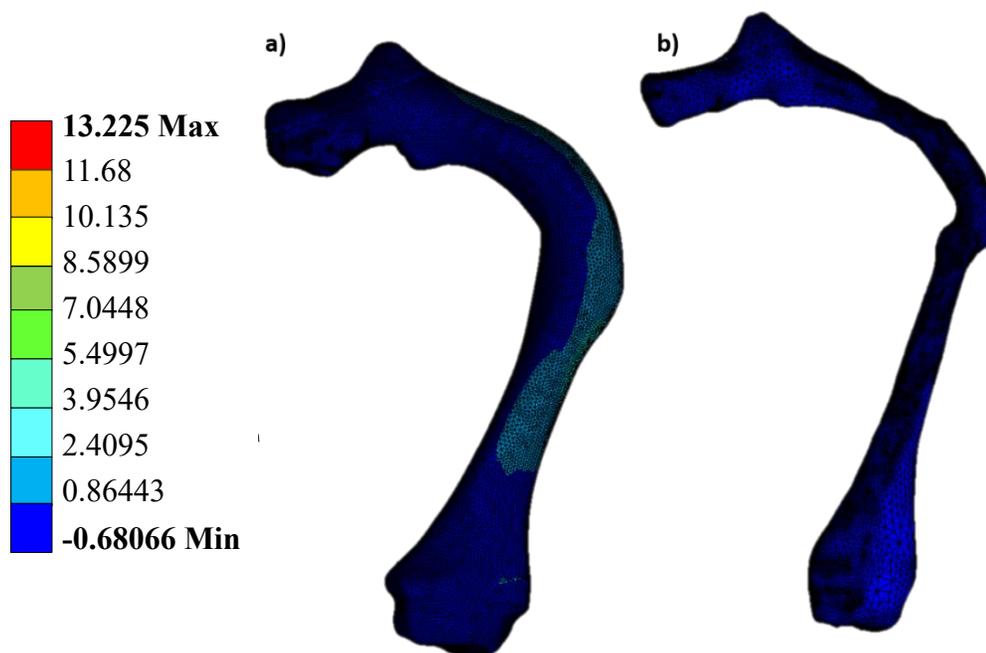
**Figura IV. 18.-** Esfuerzo cortante plano xy (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



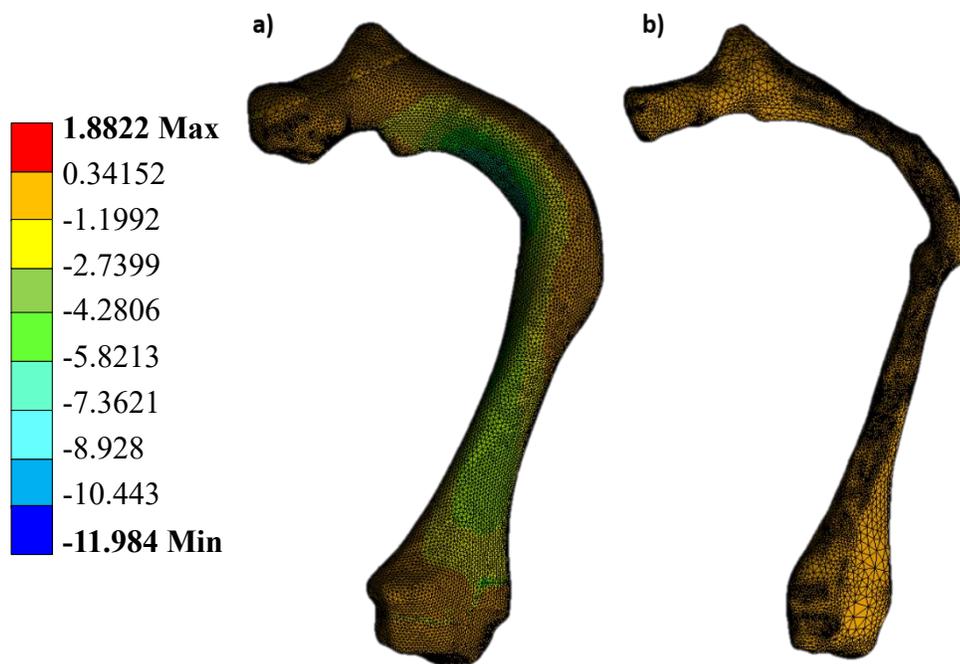
**Figura IV. 19.-** Esfuerzo cortante plano yz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



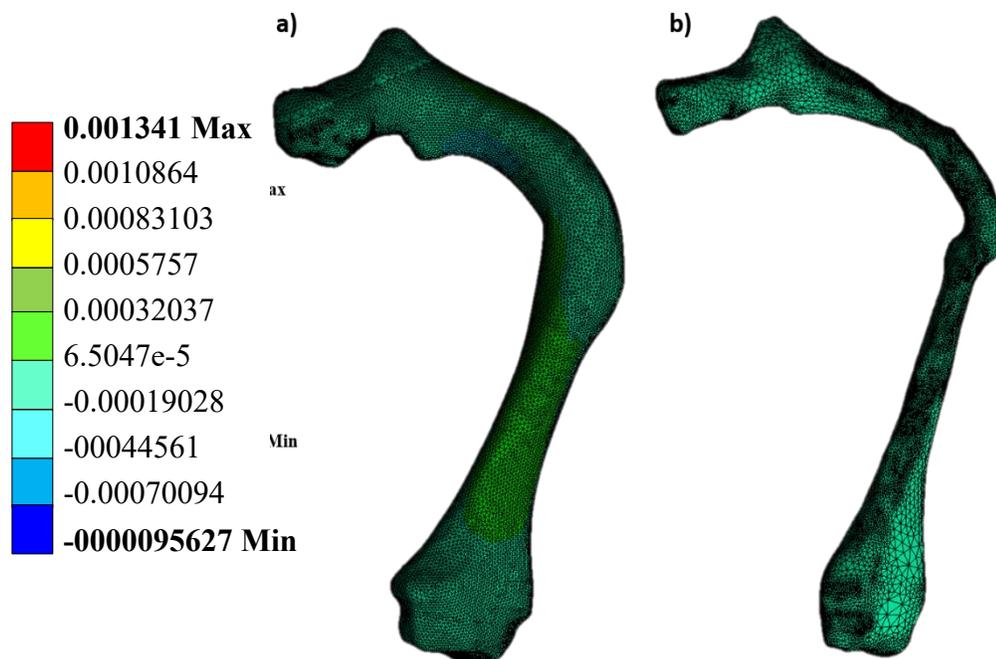
**Figura IV. 20.-** Esfuerzo cortante plano xz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura IV. 21.-** Esfuerzo principal máximo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura IV. 22.-** Esfuerzo principal mínimo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura IV. 23.-** Desplazamiento en eje x (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

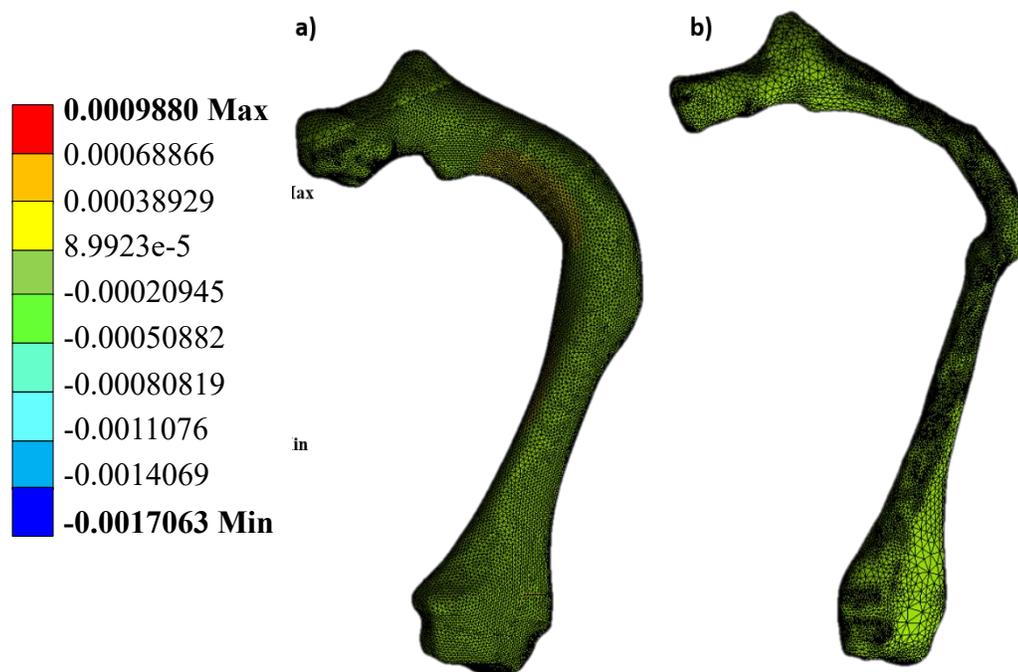


Figura IV. 24.- Desplazamiento en eje y (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

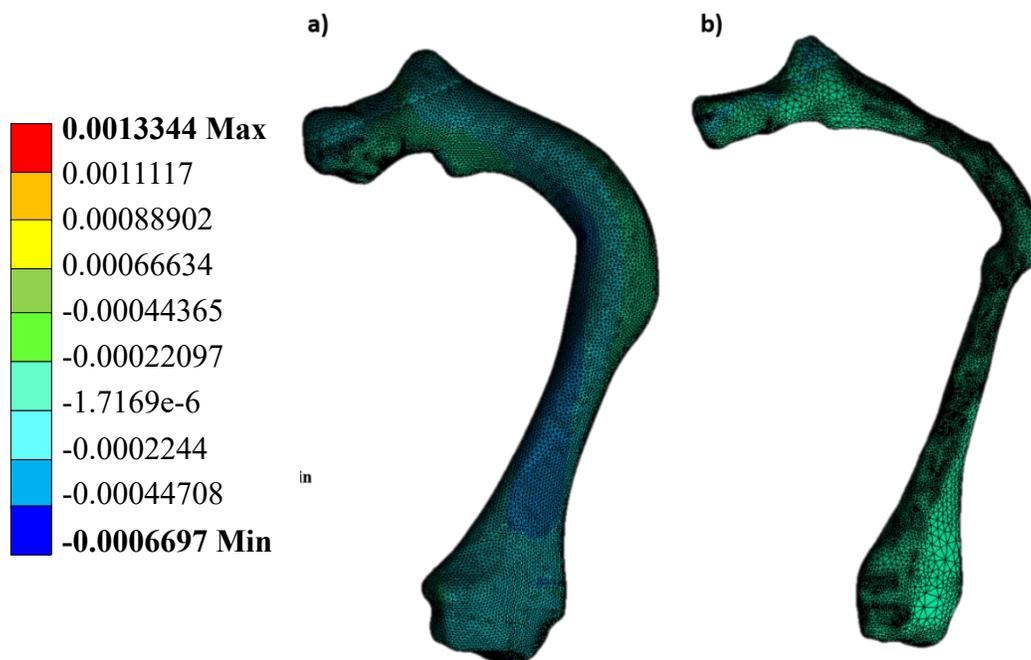


Figura IV. 25.- Desplazamiento en eje z (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

**Tabla IV.2.- Resultados del análisis**

Valor	Resultados	
	Máximo	Mínimo
Desplazamiento total (mm)	0.47268	0
Desplazamiento en eje x (mm)	0.0013417	-0.000956
Desplazamiento en eje y (mm)	0.00098804	-0.0017063
Desplazamiento en eje z (mm)	0.0013344	- 0.00066977
Deformación unitaria total	0.47268	0
Deformación unitaria eje x	0.36993	-0.18634
Deformación unitaria eje y	0.18956	-0.39208
Deformación unitaria eje z	0.06637	-0.26667
Esfuerzo nominal eje x (MPa)	4.2284	-5.8896
Esfuerzo nominal eje y (MPa)	11.715	-9.8506
Esfuerzo nominal eje z (MPa)	3.9024	-8.659
Esfuerzo cortante plano xy (MPa)	3.7069	-2.9785
Esfuerzo cortante plano xz (MPa)	3.8015	-3.746
Esfuerzo cortante plano yz (MPa)	4.7972	-3.1439
Esfuerzo von Mises (MPa)	11.596	1.4655e-13
Esfuerzo principal máximo	13.225	-0.68066
Esfuerzo principal mínimo	1.882	-11.984

#### IV.8.- Sumario

En este capítulo se describió la metodología para elaborar un biomodelo de un fémur de un paciente con Osteogénesis Imperfecta. Se generaron dos modelos que representan la anatomía del hueso cortical y el hueso trabecular, los cuales fueron perfeccionados en diferentes programas computacionales para lograr tener modelos funcionales con superficies uniformes para ser transformadas posteriormente en un discretizado volumétrico para su uso en un programa computacional de solución numérica por medio de *MEF*. Se exportó el modelo a *ANSYS*

---

*Workbench*® en donde se realizó un análisis numérico del fémur en posición de bipedestación para realizar un comparativo entre los resultados del fémur sano analizado en el Capítulo III.

#### IV.9- Referencias

- 1.- Alguacil-Diego, I. M., Molina-Rueda, F. y Gómez-Conches, M., Tratamiento ortésico en pacientes con osteogénesis imperfecta, *Anales de Pediatría*, Vol. 74, No. 2, pp 131.e1-131.e6, 2011.
- 2.- Forlino, A., Cabral, W. A., Barnes, A. M. y Marini, J. C., New Perspectives on osteogenesis imperfecta, *Nature Reviews Endocrinology*, Vol. 7, pp 550-557, 2011.
- 3.- Miralles-Marrero, R. C. y Puig-Cunillera, M., *Biomecánica Clínica del Aparato Locomotor*, Ed. -Masson, pp 7-8, 2000.
- 4.- Ramírez-Vela, V., *Análisis Numérico de Fractura en Huesos Largos en Pacientes Afectados con Osteogénesis Imperfecta*, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 55, 63, 2017.

---

---

# **CAPÍTULO 5:**

# **ÁNALISIS**

# **NUMÉRICO 2**

### V.1.- Introducción

Es muy importante para mantener una buena calidad de vida de los pacientes con Osteogenesis Imperfecta su inclusión en la sociedad. La movilidad representa para los pacientes independencia durante la niñez y la adolescencia. La posición de sedestación es usual en los pacientes con Osteogenesis Imperfecta, así como el uso de silla de ruedas, facilitando así el bienestar social y la calidad de vida.

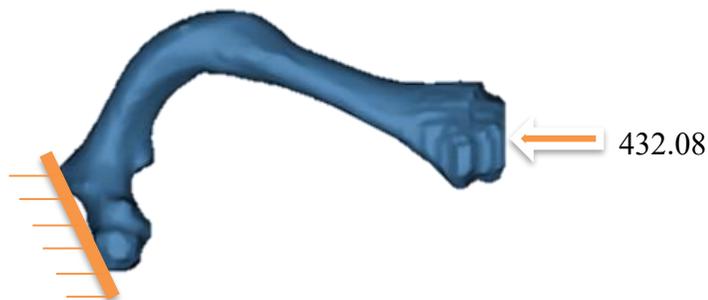
### V.2.- Modelado del fémur izquierdo de un infante con *OI*

El modelado que se emplea para el análisis desarrollado en este capítulo es el mismo que se utilizó en el capítulo IV.

### V.3.- Análisis numérico del modelo 3D del fémur izquierdo de un infante con *OI*

El análisis numérico se desarrolló en el programa computacional *Ansys Workbench*<sup>®</sup>, el procedimiento se realizó de la forma descrita en el Capítulo III en el siguiente orden:

- Definición de la geometría del modelo.
- Definición de las propiedades mecánicas.
- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado.
- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo.
- Solución del modelo.
- Obtención y visualización de resultados.



**Figura V.1.-** Diagrama de cuerpo libre del fémur izquierdo afectado con *OI* en posición de sedestación con carga aplicada y condiciones de frontera

#### V.4.- Análisis del fémur izquierdo de un infante con *OI* en posición de sedestación

A continuación, se presentan las generalidades para realizar el análisis en posición sedestación.

##### V.4.1.- Geometría del modelo

Los dos modelos, el que representa el tejido cortical y el trabecular, fueron generados de la misma manera, como se explica en el Capítulo III y se exportaron en formato \*. *Parasolid*. Se realizó un estudio para comprobar el funcionamiento del modelo.

##### V.4.2.- Propiedades mecánicas del modelo

Se representó el tejido cortical y el trabecular, en los cuales se tomaron en cuenta los mismos considerados para el análisis del hueso en el Capítulo IV, se consideraron los materiales como isotrópicos, homogéneos y continuos (Tabla V.1).

##### V.4.3.- Definición del tipo de elemento finito y generación del discretizado

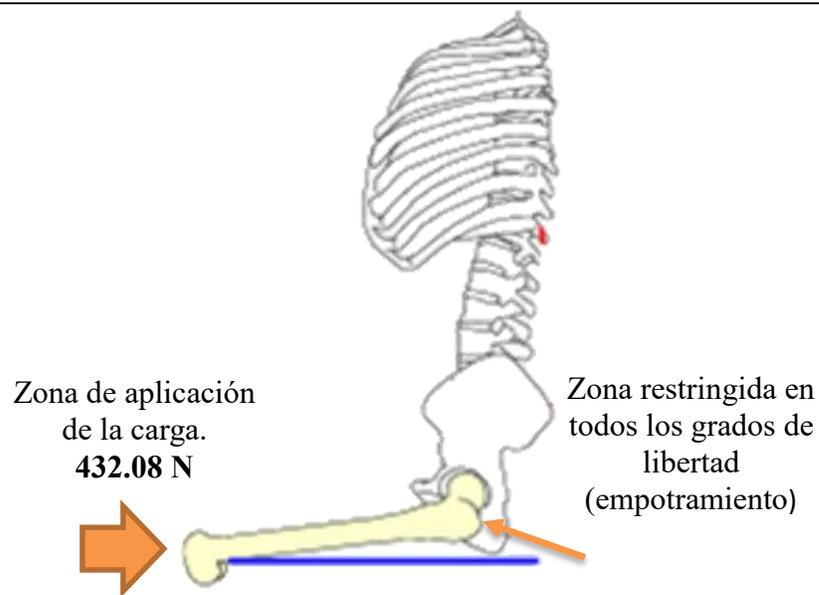
El discretizado que se generó sobre la superficie del biomodelado se compone de elementos triangulares de distintos tamaños y se realizó de manera libre, ya que la geometría es irregular. El tamaño de los elementos presenta un arreglo no específico y un tamaño promedio de 1.00 mm, como se representó en el Capítulo IV.

**Tabla V.1.-** Propiedades mecánicas de los materiales [V.1]

Tejido	Módulo de <i>Young</i> (MPa)	Relación de <i>Poisson</i>
Hueso cortical	12000	0.28
Hueso trabecular	3000	0.3

##### V.4.4.- Definición de condiciones de frontera y aplicación del agente externo

Después de que el modelo se discretizó, se restringen todos los grados de libertad ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $Rot_x$ ,  $Rot_y$  y  $Rot_z$ ) en el extremo proximal del fémur. También se aplicó una fuerza aleatoria equivalente a 432.08 N en el extremo distal, que representa una fuerza equivalente a 4 veces el peso del paciente estudiado, representando una colisión en este punto, mientras el paciente permanece en posición de sedestación.



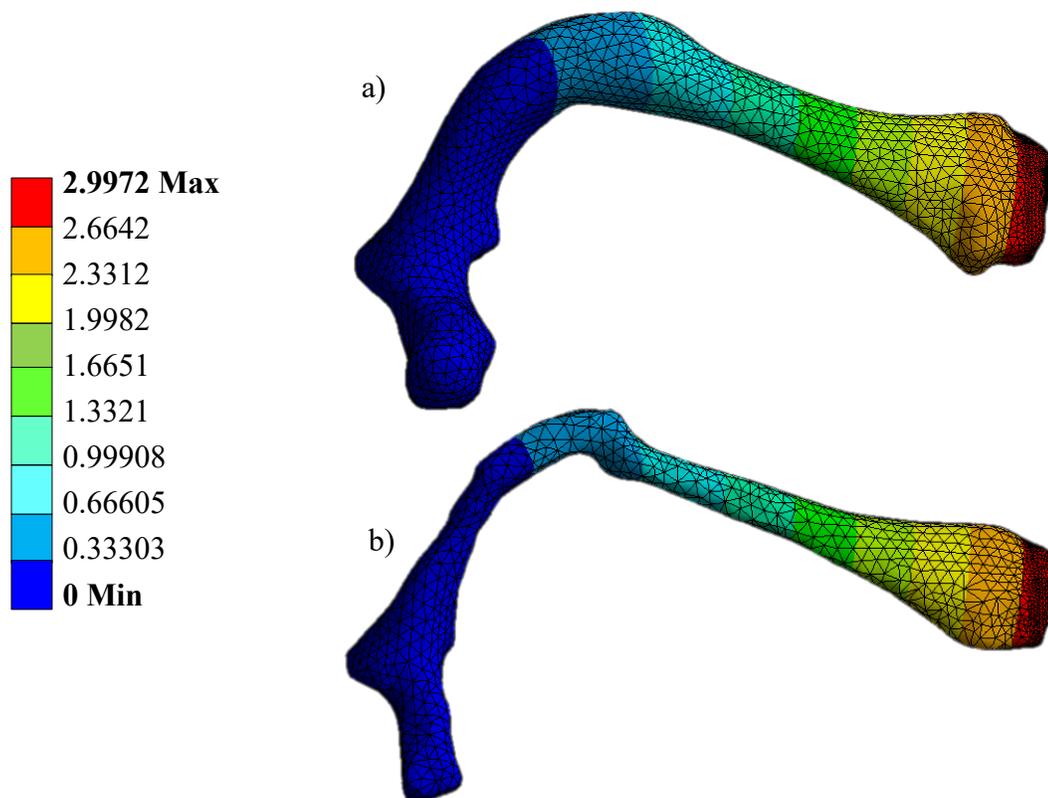
**Figura V.2.-** Representación de la posición de sedestación en el momento de la colisión

#### **V.4.5.- Solución del modelo**

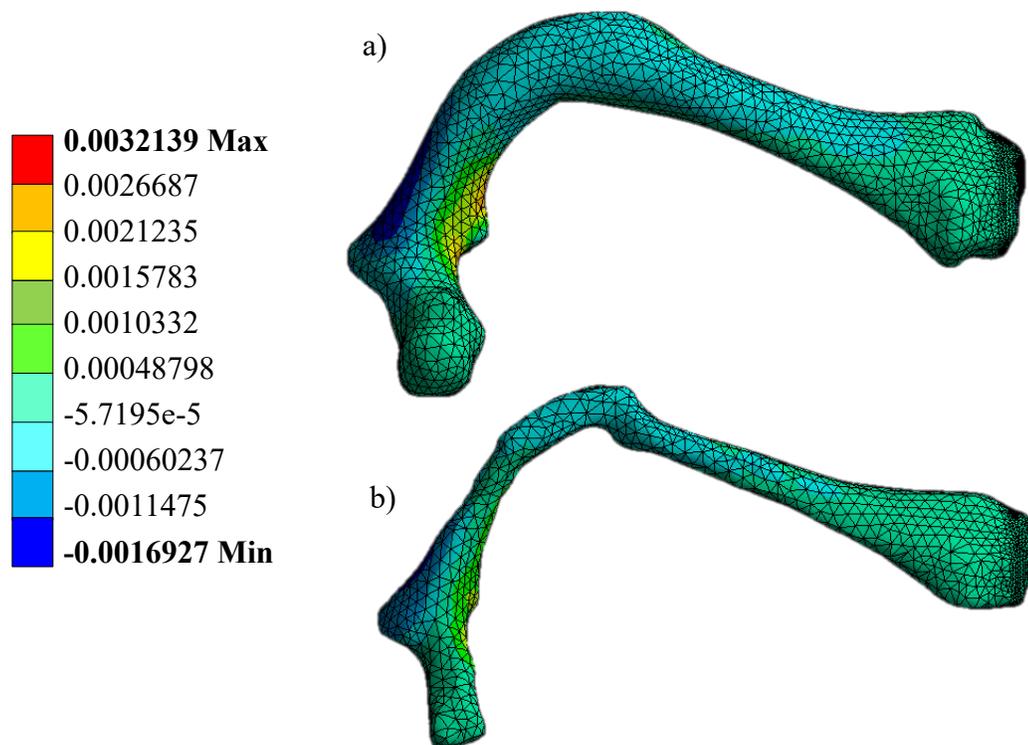
Al finalizar los pasos del procedimiento, el modelo está listo para resolver el análisis con las condiciones propuestas. Se obtuvieron los siguientes resultados; elongaciones, esfuerzos (nominales, von-Mises, cortantes, principales) y las deformaciones unitarias.

#### **V.4.6.- Resultados obtenidos**

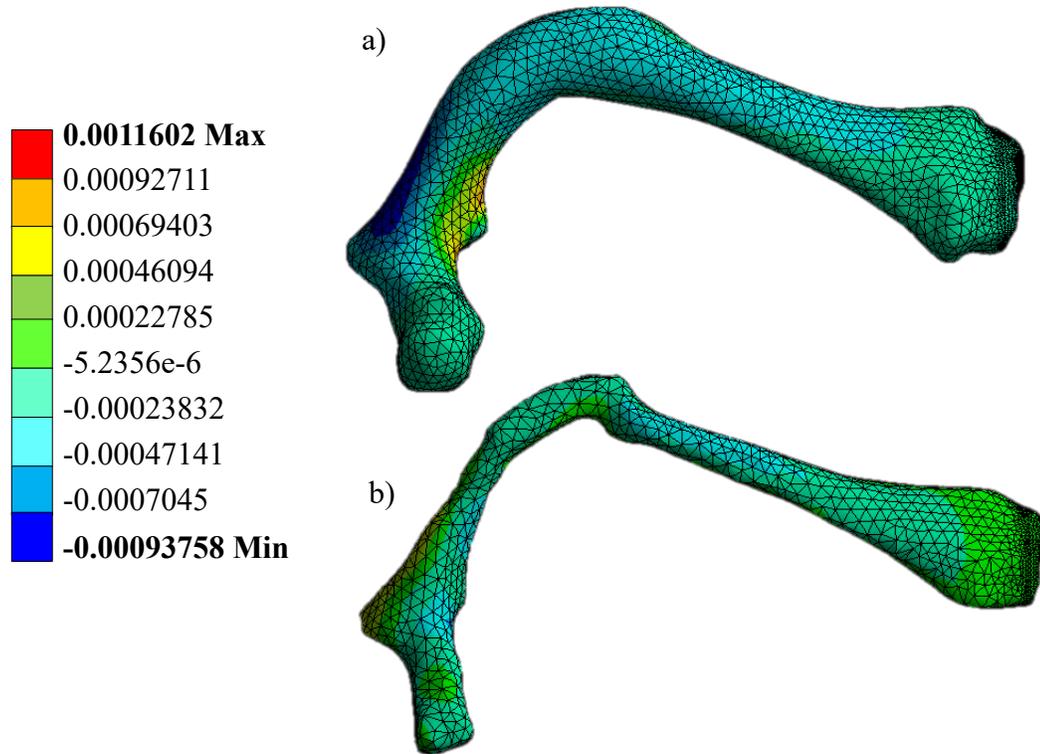
A continuación, se presentan los resultados obtenidos.



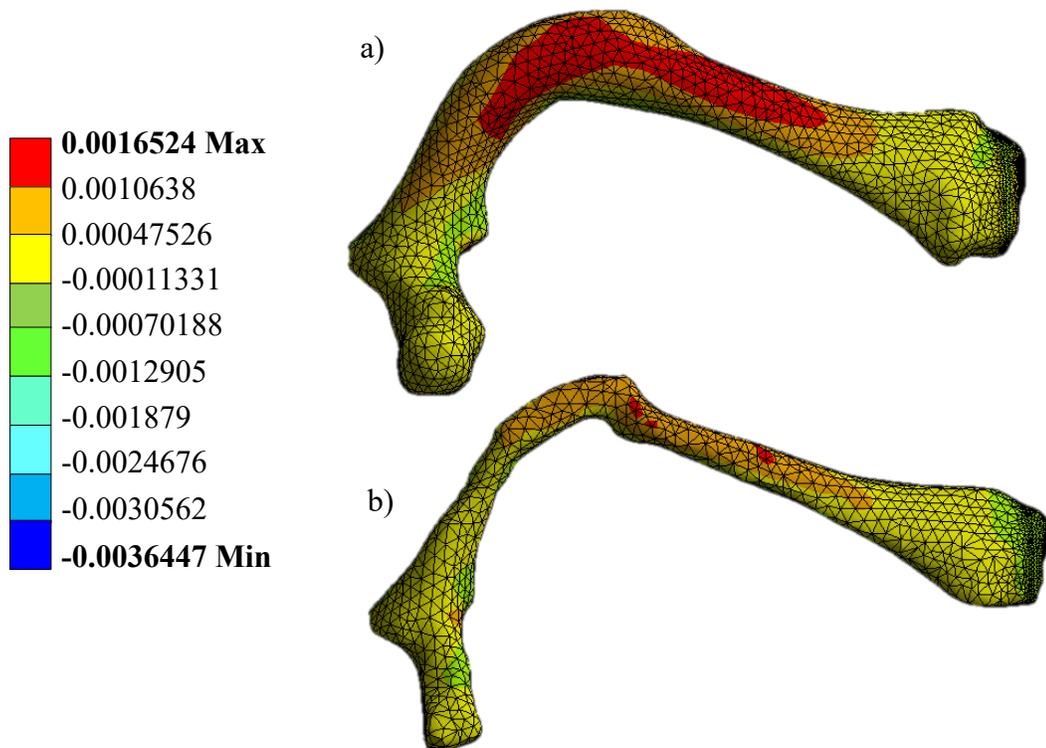
**Figura V.3.-** Desplazamiento total (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



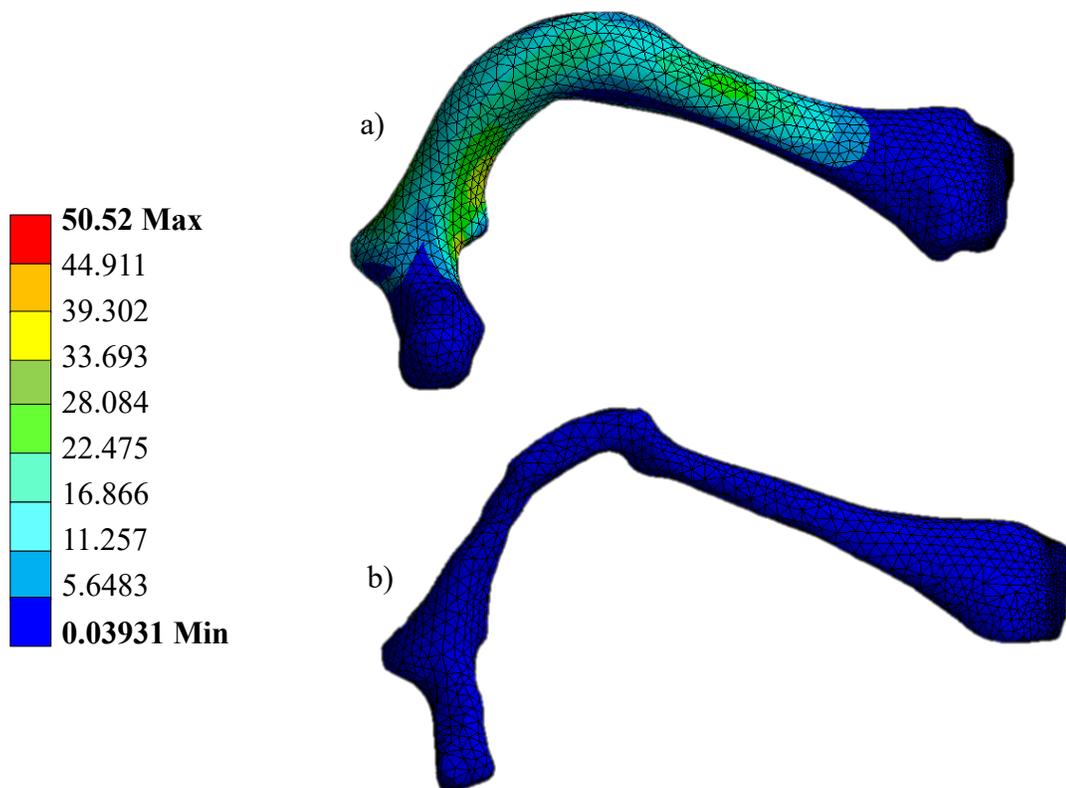
**Figura V.4.-** Desplazamiento en eje x a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



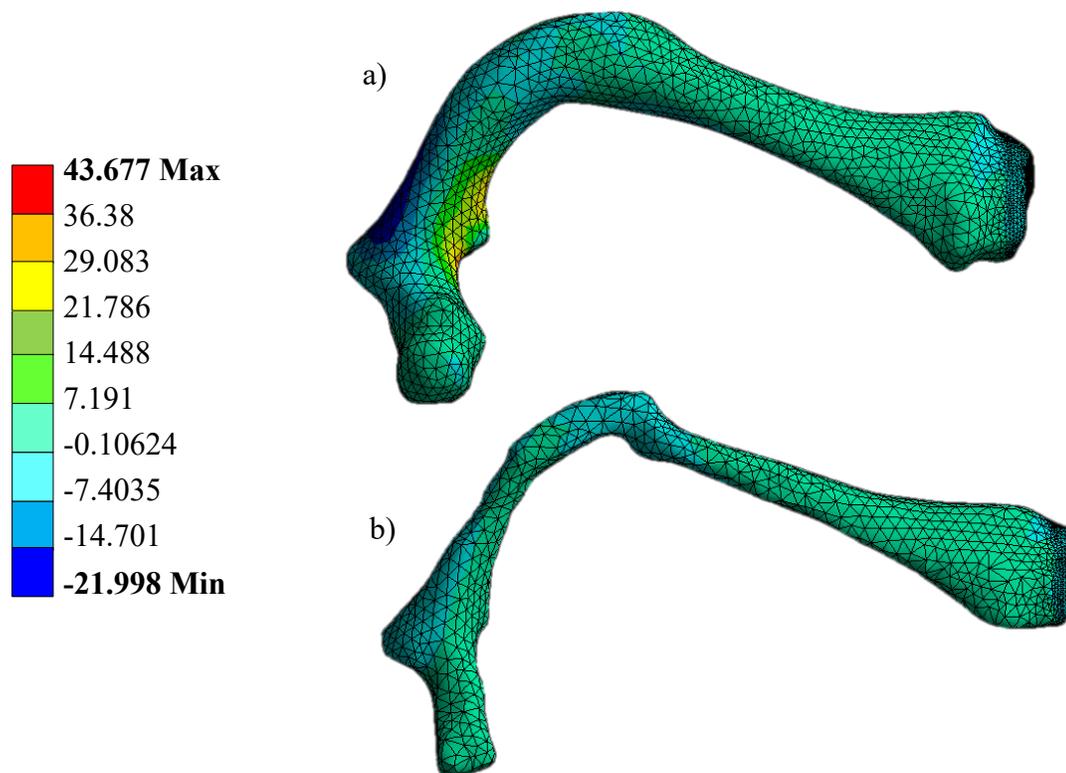
**Figura V.5.-** Desplazamiento en eje y a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



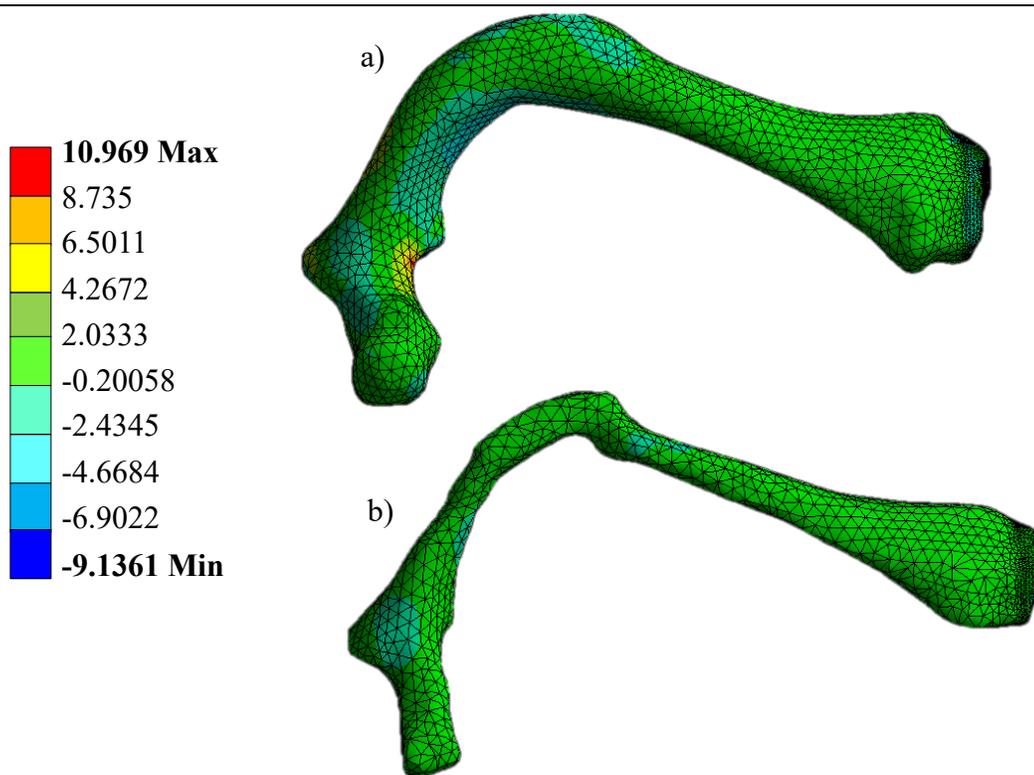
**Figura V.6.-** Desplazamiento en eje z a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



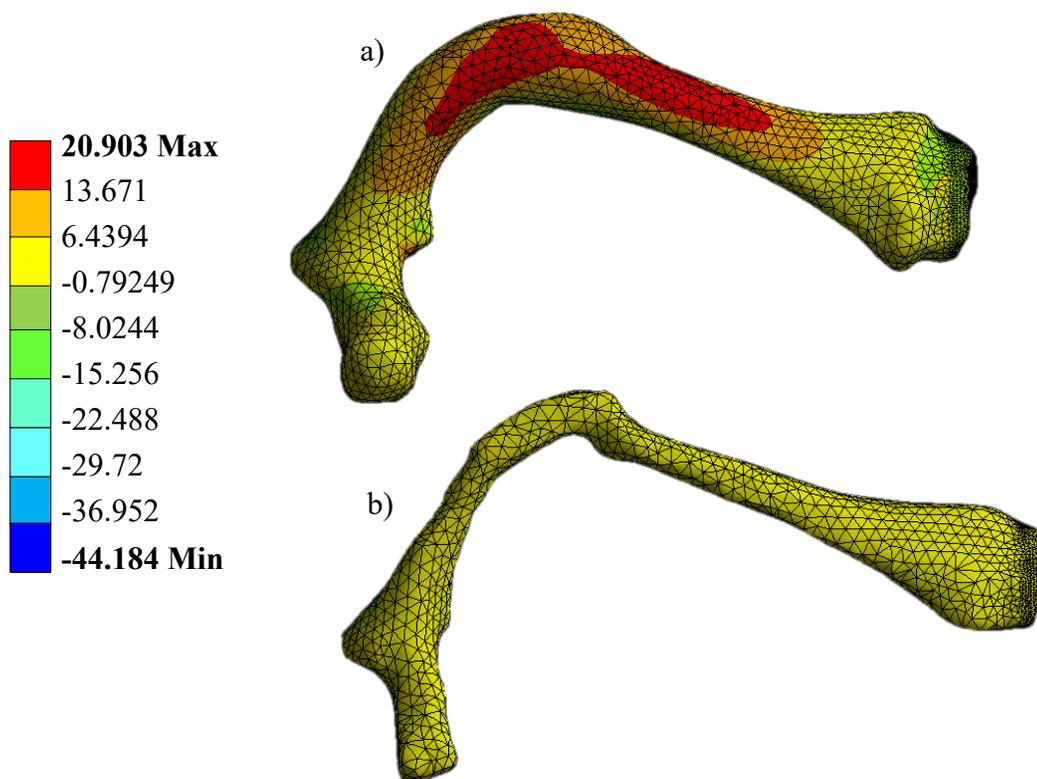
**Figura V. 7.-** Esfuerzo von Mises (MPa) a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



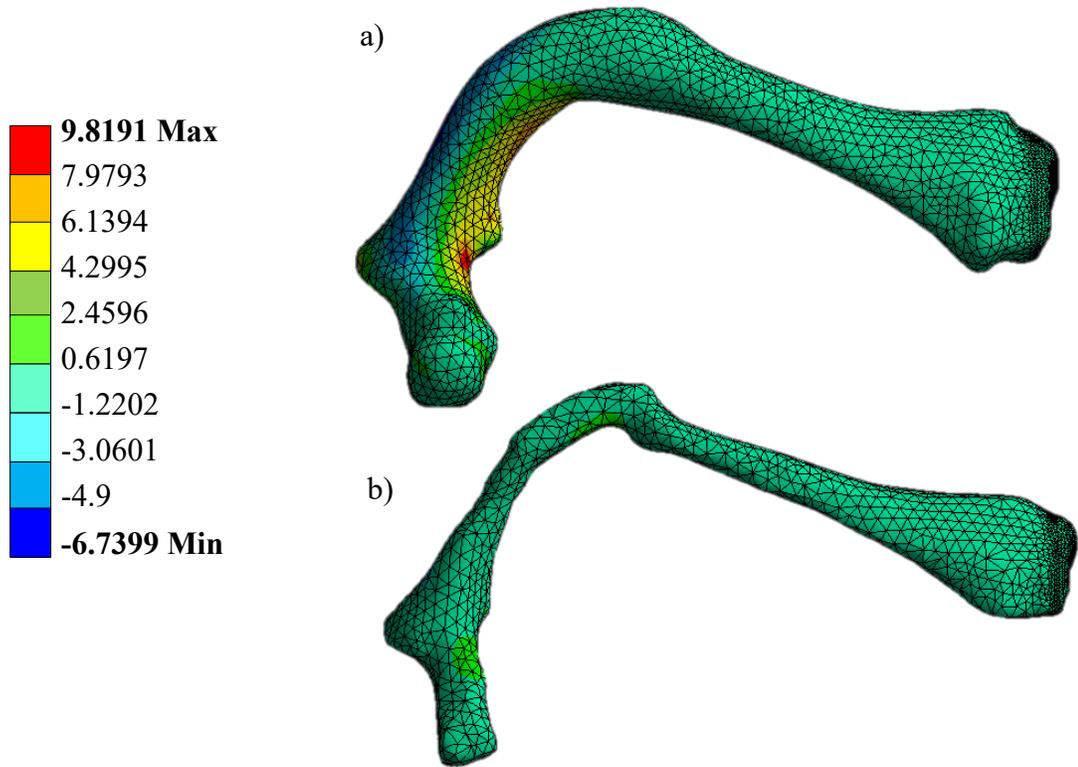
**Figura V.8.-** Esfuerzo nominal eje x (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



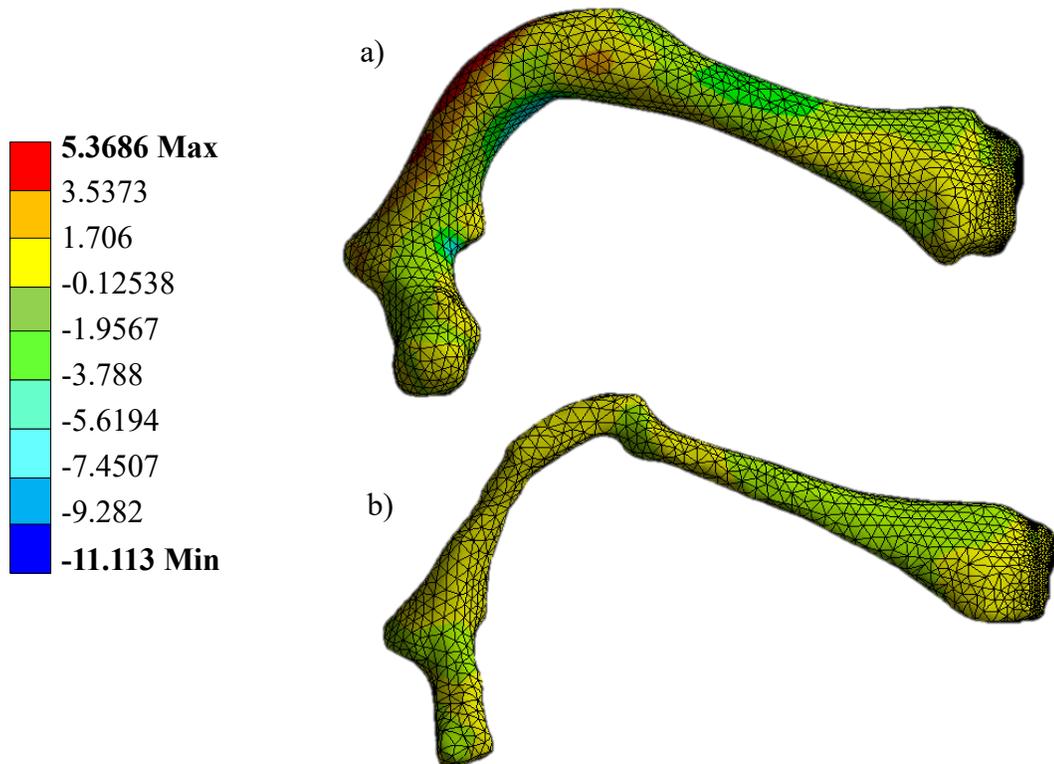
**Figura V.9.-** Esfuerzo nominal eje y (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



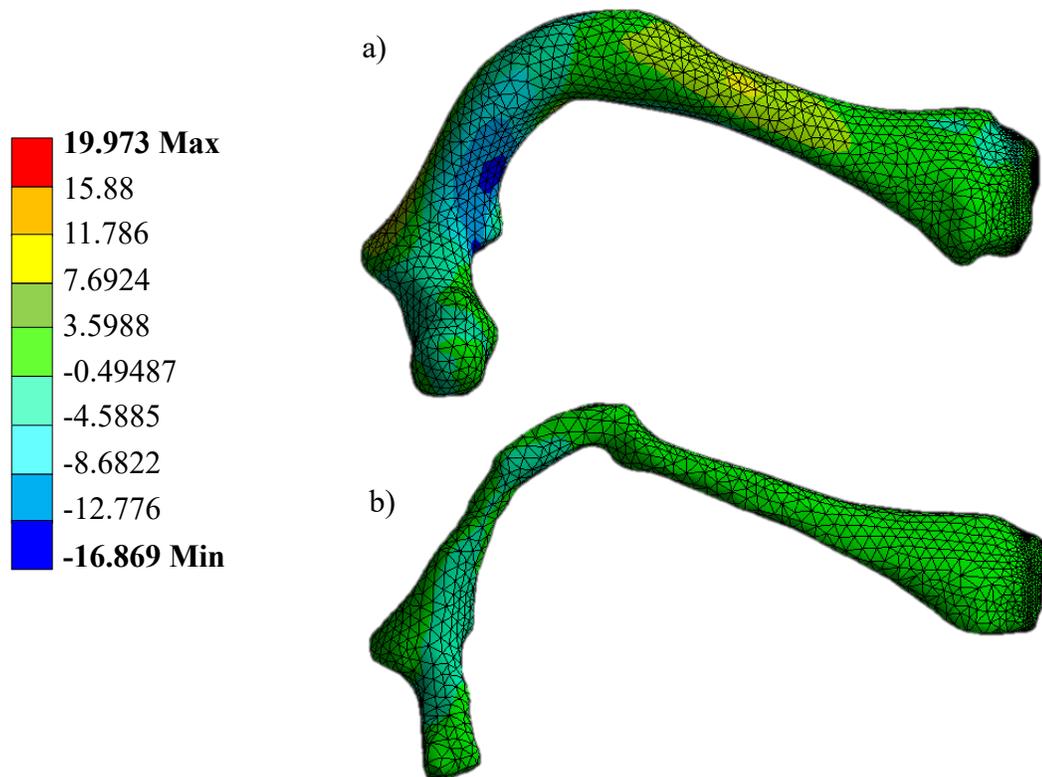
**Figura V.10.-** Esfuerzo nominal eje z (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



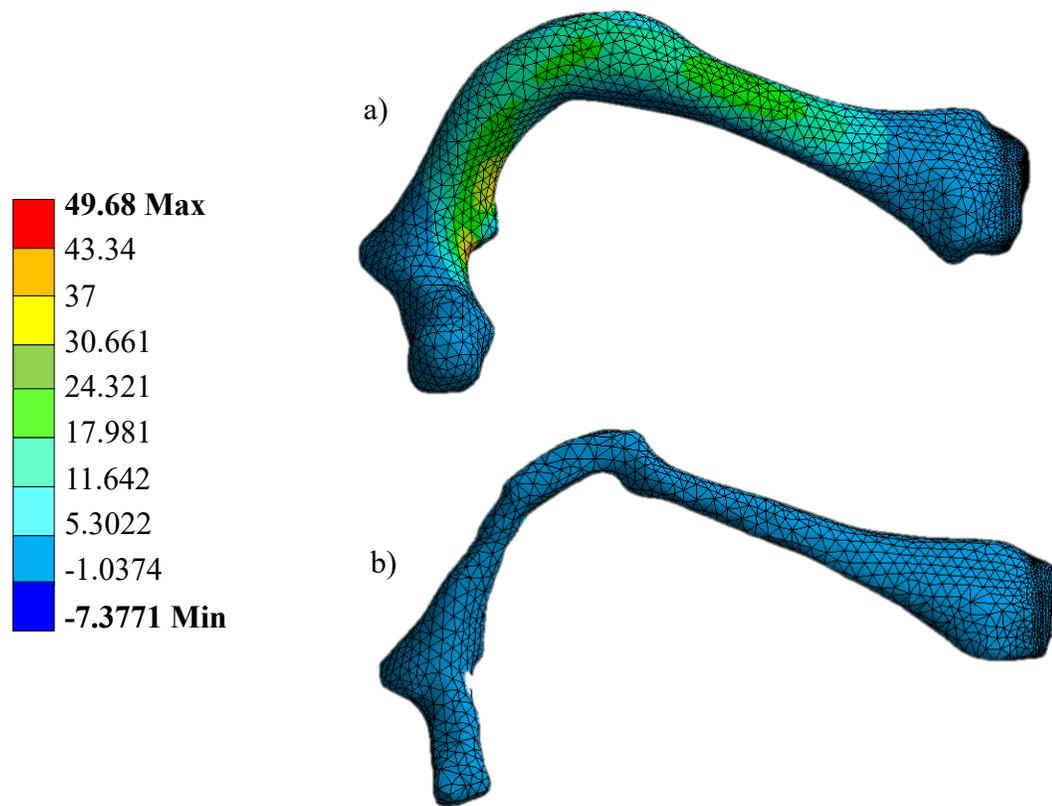
**Figura V.11.-** Esfuerzo cortante plano xy (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



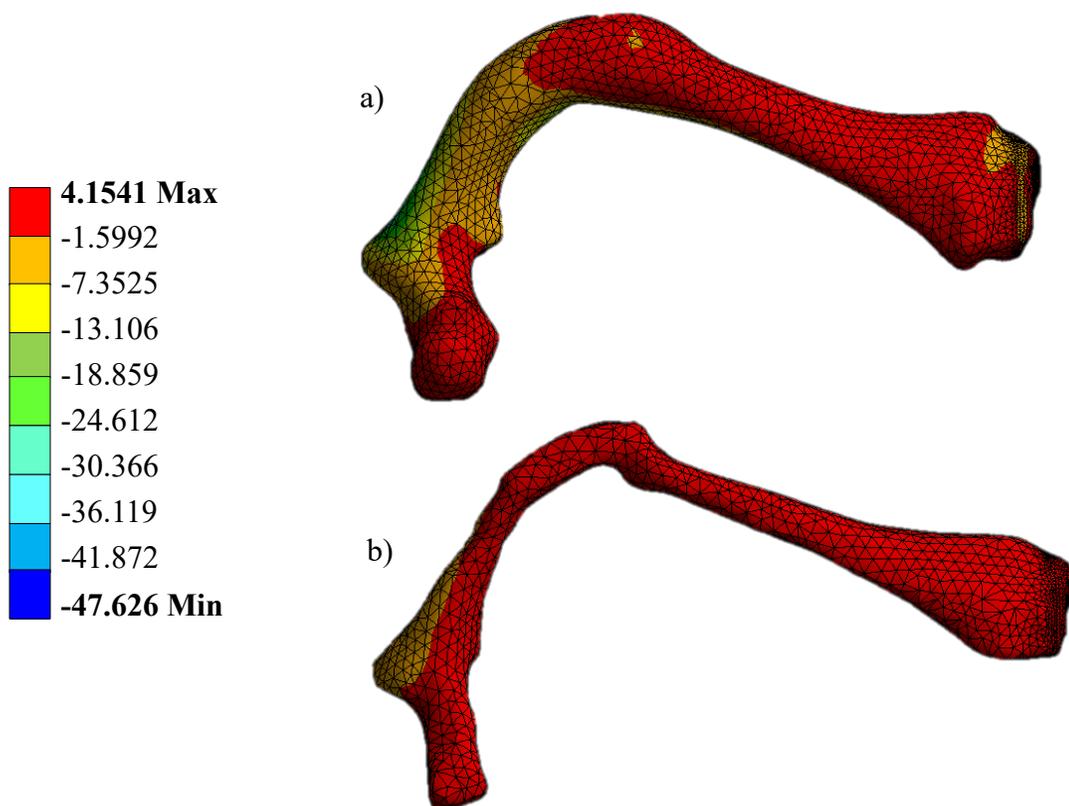
**Figura V.12.-** Esfuerzo cortante plano yz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



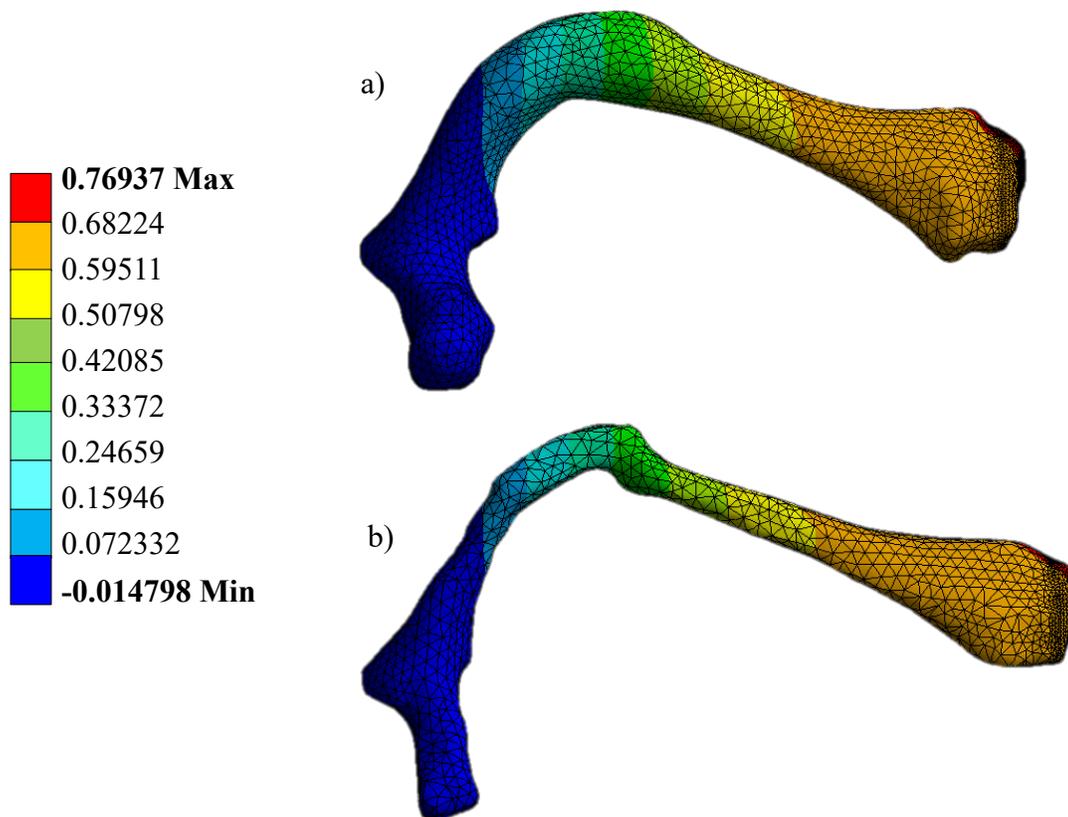
**Figura V.13.-** Esfuerzo cortante plano xz (MPa). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



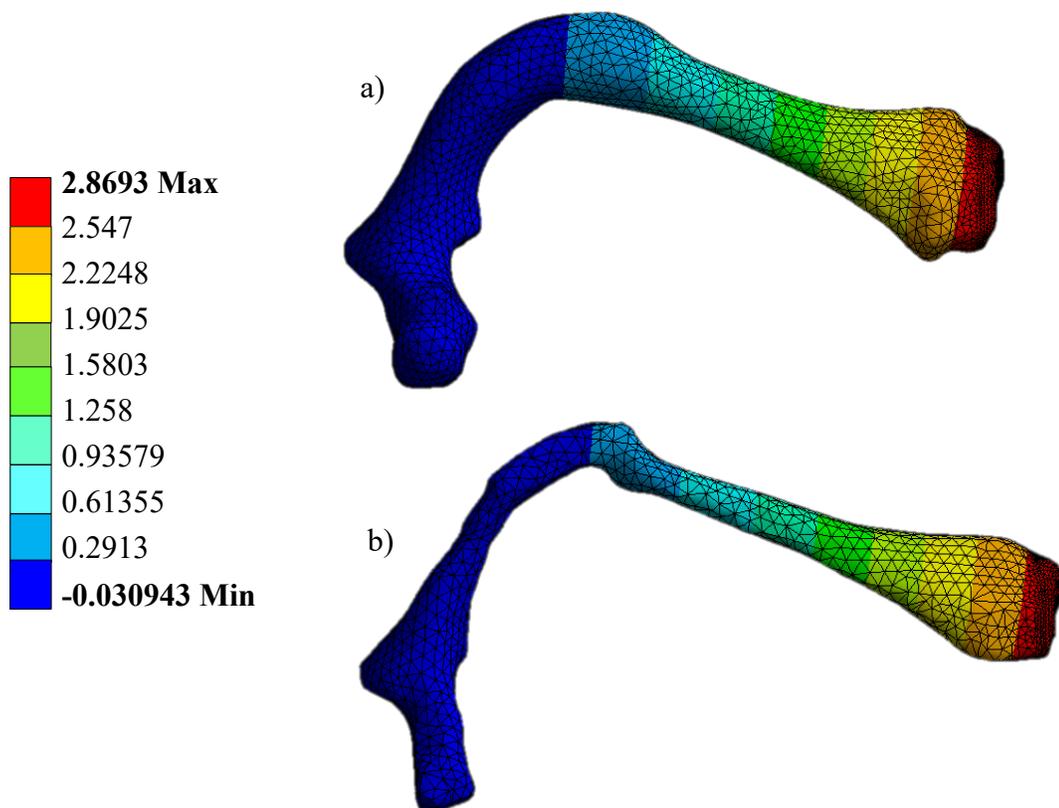
**Figura V.14.-** Esfuerzo principal máximo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



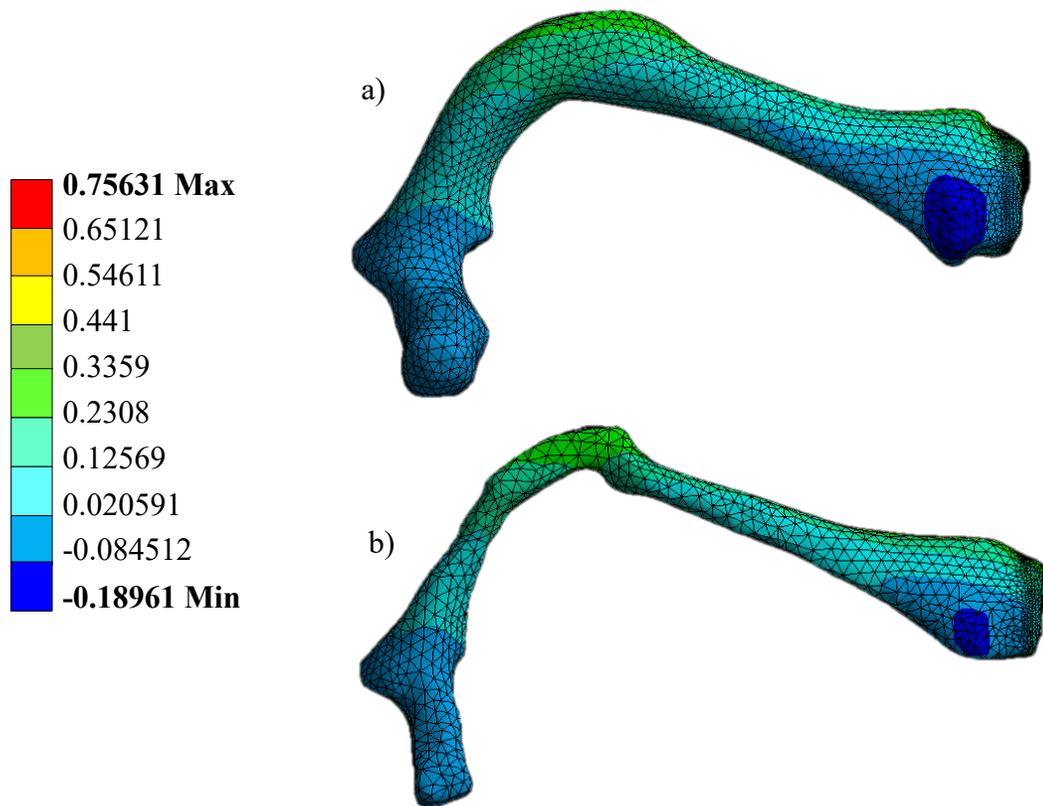
**Figura V.15.-** Esfuerzo principal mínimo. a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura V.16.-** Deformación unitaria en eje x (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura V.17.-** Deformación unitaria en eje y (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.



**Figura V.18.-** Deformación unitaria en eje z (mm). a) Hueso cortical. b) Hueso trabecular.

**Tabla V.2.- Resultados del análisis**

Valor	Resultados	
	Máximo	Mínimo
Desplazamiento total (mm)	2.9972	0
Desplazamiento en eje x (mm)	0.0032139	-0.0016927
Desplazamiento en eje y (mm)	0.011602	-0.00093758
Desplazamiento en eje z (mm)	0.0016524	-0.0036447
Deformación unitaria total (mm)	2.9972	0
Deformación unitaria eje x	0.76937	-0.014798
Deformación unitaria eje y	2.8693	-0.030943
Deformación unitaria eje z	0.7563	-0.18961
Esfuerzo nominal eje x (MPa)	43.677	-21.998
Esfuerzo nominal eje y (MPa)	10.969	-9.1361
Esfuerzo nominal eje z (MPa)	20.903	-44.184
Esfuerzo cortante plano xy (MPa)	9.8191	-6.7399
Esfuerzo cortante plano xz (MPa)	19.973	-16.869
Esfuerzo cortante plano yz (MPa)	5.3686	-11.113
Esfuerzo von Mises (MPa)	50.52	0.03931
Esfuerzo máximo principal (MPa)	49.68	-7.3771
Esfuerzo mínimo principal (MPa)	4.1541	-47.626

### V.5.- Sumario

En este capítulo se analiza el fémur con Osteogenesis Imperfecta en un caso donde es sometido a una fuerza en la parte distal del mismo, simulando una colisión mientras el sujeto permanece en posición de sedestación. El fémur se considera como un sistema de viga empotrada dando como resultado datos sobre el comportamiento mecánico del tejido cortical y el tejido trabecular.

### V.6.- Referencias

- 
- 1.- Ramírez-Vela, V., *Análisis Numérico de Fractura en Huesos Largos en Pacientes Afectados con Osteogénesis Imperfecta*, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, pp 55, 63, 2017.

---

# CONCLUSIONES

---

## Conclusiones

En el capítulo 1 se observa como la medicina ha evolucionado desde la prehistoria, cuando el uso de diferentes herramientas era intuitivo, para dar solución a ciertos padecimientos. Posteriormente, se exploran las prácticas médicas en las civilizaciones antiguas, durante la edad antigua, cuando la medicina estaba asociada a creencias mágicas. Las enfermedades más comunes en el sistema músculo-esquelético eran la tuberculosis, la artritis, las infecciones de los huesos y las deformaciones congénitas. Existe evidencia sobre el padecimiento de osteogénesis imperfecta que data del año 1000 a. C., se trata de una momia de un infante encontrada en Egipto. Posteriormente médicos como Hipócrates ampliaron los conocimientos sobre la anatomía y el tratamiento de fracturas que se describen en el *Corpus Hipocráticus* ya en la etapa de la edad media, la medicina se vio impulsada hacia el conocimiento científico y la medicina dejó de apegarse a las creencias religiosas y es en el renacimiento, cuando se difunden conocimientos sobre la anatomía cada vez más certeros. El nombre de Ortopedia no era usado hasta la publicación de la obra de *Nicholas Andry*, en donde emplea por primera vez el término ortopedia. Aunque no fue fácil, diversos médicos aportaron grandes avances sobre las prácticas en la ortopedia, lo que permitió un tratamiento cada vez más adecuado a los diferentes padecimientos. Se observa el desarrollo de especialidades de la Medicina que en la actualidad son fundamentales para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades complejas como la osteogénesis imperfecta.

En el capítulo II, se presenta el marco teórico necesario para el desarrollo del biomodelado y del análisis numérico, considerando la anatomía, fisiología y cuadros clínicos. Es necesaria esta información para comprender cuales son las deficiencias que provoca dicho padecimiento.

En el capítulo III se describió la metodología para elaborar un biomodelo de un fémur aparentemente sano de un paciente pediátrico. Se generaron dos modelos que representan la anatomía del hueso cortical y el hueso trabecular, los cuales fueron perfeccionados en diferentes programas computacionales para lograr tener modelos funcionales con superficies uniformes para ser transformadas posteriormente en un discretizado volumétrico para su uso en un programa computacional de solución numérica por medio de *MEF*. Se exportó el modelo a *ANSYS Workbench*<sup>®</sup> en donde se realizó un estudio de prueba para comprobar que el modelo arrojaba resultados. Se describen los esfuerzos presentes en el tejido cortical, en el tejido trabecular y la interacción de ambos. Se consideró que un estudio numérico de alguna estructura ósea, es más

---

exacto cuando se analizan los tejidos cortical y trabecular, ya que de esta manera se emplean propiedades diferentes para cada uno simulando la anatomía y la fisiología natural del hueso. En los resultados del análisis puede observarse que la zona susceptible a fractura se presenta en el primer tercio del fémur.

En el capítulo IV, para el análisis, se consideró una posición de bipedestación. En el análisis realizado en este capítulo se aplicaron las mismas condiciones de frontera, restringiendo en todos los grados de libertad ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $Rot_x$ ,  $Rot_y$  y  $Rot_z$ ) en el extremo distal del fémur. La aplicación de fuerzas se realizará sobre la articulación de la cadera, cambiando la magnitud de la misma debido a que el peso del paciente es diferente. El análisis se realiza con el objetivo de encontrar un comparativo de las características mecánicas del hueso sano y el hueso afectado con *OI*. Por lo tanto, se considera un caso hipotético en donde el paciente con *OI* permanece en posición de bipedestación.

En el capítulo V se analizó el tejido cortical y el trabecular, en los cuales se tomaron en cuenta los mismos considerados para el análisis del hueso en el Capítulo IV, se consideraron los materiales como isotrópicos, homogéneos y continuos. También se aplicó una fuerza aleatoria equivalente a 432.08 N en el extremo distal, que representa una fuerza equivalente a 4 veces el peso del paciente estudiado, representando una colisión en este punto, mientras el paciente permanece en posición de sedestación.