

## **Biomecánica: Estudio de Comparación de Propiedades Mecánicas de un Fémur Promedio tras Experimentar 18 Meses Bajo Microgravedad (Caso Eventual: Viaje a Marte y Retorno)**

Biomechanics: Study of Comparison of Mechanical Properties of an Average Femur After Experiencing 18 Months Under Microgravity (Eventual Case: Trip to Mars and Return)

**Antonio José, Abruscato Zapata.**

iD ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0660-4927>

[abruscatony15@gmail.com](mailto:abruscatony15@gmail.com)

Universidad José Antonio Páez. San Diego, Venezuela.

Investigador Independiente. Gijón, Principado de Asturias, España.

Recibido: 27-04-2022

Aceptado: 14-06-2022

### **Resumen**

Hoy en día es conocido que enfermedades óseas degenerativas tales como la osteoporosis u osteopenia son causantes de un gran porcentaje de traumatismos graves y fallecimientos alrededor del mundo; de igual manera, se ha constatado que el cuerpo humano experimenta un decrecimiento en la densidad ósea cuando es sometido a ambientes de microgravedad por largos periodos de tiempo, afectando directamente las propiedades mecánicas de huesos y músculos, resultando así en riesgos potenciales de fracturas, acelerando la propensión a sufrir dichas enfermedades óseas. El propósito del presente proyecto de investigación fue constatar la resistencia de un fémur promedio saludable antes y después de una exposición a la microgravedad por un periodo de tiempo equivalente a un viaje ida y vuelta a Marte simulando un escenario cotidiano como el caminar y las cargas que implican sobre el propio fémur. Para ello, fue necesario consultar diversas referencias académicas, manipular softwares de modelado 3D y análisis de carga estático por método de análisis finito, además de emplear modelos matemáticos que expresan las relaciones que gobiernan en la biomecánica humana, obteniendo de esta manera los parámetros del proceso involucrado directamente sobre el hueso en estudio. De acuerdo con el análisis, se contrastó el valor de esfuerzo último obtenido antes y después del periodo de tiempo referido, permitiendo así tener una percepción de las condiciones óseas degenerativas consecuentes de pérdida de densidad, resultando en una disminución del 54% del módulo de elasticidad del fémur y un riesgo de fractura crítico al sufrir osteopenia avanzada.

**Palabras clave:** Biomecánica; Propiedades Mecánicas; Microgravedad; Pérdida de Densidad Ósea; Fémur.

### **Abstract**

Nowadays it is known that degenerative bone diseases such as osteoporosis or osteopenia are the cause of a large percentage of serious injuries and deaths around the world; Similarly, it has been found that the human body experiences a decrease in bone density when subjected to microgravity environments for long periods of time, directly affecting the mechanical properties of bones and muscles, thus resulting in potential risks of fractures, accelerating the propensity to suffer these bone diseases. The purpose of this research project was to verify the resistance of a healthy average femur before and after exposure to microgravity for a period equivalent to a round trip to Mars, simulating an everyday scenario such as walking and the loads that imply on the femur itself. Thus, it was necessary to consult various academic references, manipulate 3D modeling software and static load analysis by finite analysis method, in addition to using

**Revista Digital La Pasión del Saber.** Publicación Semestral.

Año 12. Nº 22. Julio-diciembre 2022. ISSN 2244-7857

mathematical models that express the governing relationships in human biomechanics, thus obtaining the parameters of the process involved directly on the bone under study. According to the analysis, the value of the ultimate strength obtained before and after the referred period was contrasted, allowing perception of the degenerative bone conditions resulting from loss of bone density, resulting in a 54% decrease of the femur elasticity modulus and critical fracture risk by suffering advanced osteopenia.

**Keywords:** Biomechanics; Mechanical Properties; Microgravity; Loss of Bone Density; Femur.

## Introducción

Las enfermedades óseas degenerativas son la causa principal de fracturas de caderas alrededor del mundo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que la osteoporosis causa una fractura en un tercio de las mujeres y un quinto de cada hombre mayor a 50 años, lo que resulta en dolor crónico, discapacidad grave o incremento de la mortalidad (Mendoza, 2003). Tras una fractura de cadera, cuatro de cada diez personas no son capaces de caminar de manera independiente, y ocho de cada diez no puede realizar actividades cotidianas y diarias de forma autónoma (The International Osteoporosis Foundation, 2009).

La denominada fractura de cadera es provocada en la mayoría de los casos por la ruptura del cuello femoral, un amplio porcentaje de dichas fracturas son debidas a una baja composición de minerales en ellos. De esta manera, la fisionomía en microgravedad está estrechamente relacionada con los riesgos de fracturas, la densidad los huesos decrece a un ritmo acelerado en ambientes de microgravedad (Oshima, 2012), resultando en una propensión significativa a fracturas al volver experimentar una fuerza de gravedad de dimensiones planetarias, por ejemplo; volver a la Tierra.

En el sector espacial, considerando la información que resulta de los estudios realizados, es imperativo el correcto diseño de misiones con la finalidad de combatir los efectos contraproducentes en cada uno de los ámbitos que comprometan la integridad de la tripulación, por ende, la misión. Expresado lo anterior, es prudente indicar el hecho que con la tecnología actual un viaje desde la Tierra a Marte comprende una duración de 9 meses, en el mejor de los escenarios, dictados por la posición relativa entre ambos planetas, considerando el estudio de Stinner y Bergoray (2005). Sin embargo, debido a que se presentan dos ventanas de lanzamiento anualmente para el viaje más económico en términos de tiempo, un viaje de ida y retorno a Marte es superior a 18 meses, no obstante, se experimentan al menos 18 meses en microgravedad.

Por tanto, el estudio pretende conocer el impacto de aceleración de las enfermedades óseas degenerativas, y cuantificar dicho efecto mediante la aplicación de cargas sobre un fémur promedio saludable, sometiéndolo al estrés de una tarea cotidiana tal como caminar, contrastando los resultados obtenidos en los escenarios pre y post microgravedad considerado como el tiempo mínimo necesario en un viaje ida y vuelta a Marte. Conocer los resultados de la problemática presentada permitió tener una perspectiva de la gravedad de los efectos que supondría realizar el viaje interplanetario referido, pronosticando el riesgo de fractura asociado, evitando que al momento en el que los cosmonautas regresen a la Tierra, bajo influencia de su gravedad, sufran fracturas realizando la simple tarea de caminar sobre una superficie.

En la revisión de trabajos previos, Axpe et al. (2020) desarrollaron un modelo matemático no lineal de pérdida de densidad ósea aplicado a una misión tripulada ida y retorno a Marte; estableciendo una duración de entre 400 a 600 días y de 1000 a 1200 días respectivamente,

usando una muestra de datos registrada de 69 astronautas y sus densidades óseas del cuello fémoral tras una misión espacial de 3 a 6 meses; prediciendo así el riesgo de sufrir una patología ósea. Los resultados del modelo diseñado reflejaron que el 62% de los astronautas en el viaje que comprende una duración que va de 400 a 600 días sufriría osteopenia, en contraste con el 100% de los astronautas en el viaje de entre 1000 y 1200 días, de ellos, el 32% presentaría osteoporosis.

Con el motivo de determinar las principales fuerzas ejercidas en la fase de estudio del caminar humano, se ha hecho referencia al estudio denominado ciclo de la marcha, el cual analiza “el proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano, en posición erguida, se mueve hacia adelante, siendo un peso soportado, alternativamente, por ambas piernas” (Inman et al. 1981), expresando de tal manera la proporción de la carga soportada sobre la misma. En la fase denominada *mid-stance*, todo el cuerpo se encuentra apoyado sobre una pierna, considerado un punto crítico del ciclo, debido a que todas las fuerzas involucradas se centran en una de las extremidades. Para determinar la fuerza soportada por la extremidad, se consideró el balance de la cadera que tiene lugar al permanecer en la posición de estudio.

Por ello, se planteó como objetivo general: cuantificar y contrastar las propiedades mecánicas de un fémur humano afectado por pérdida de densidad ósea tras 18 meses experimentando microgravedad sin realizar actividades que contrarresten dichos efectos. Por consiguiente, con efectos de simplificar el estudio realizado, el presente proyecto de investigación se centró solo en la pérdida de densidad ósea que tiene lugar en los 9 meses de ida a Marte y los 9 meses de vuelta a la Tierra.

Una vez culminado el análisis experimental planteado, se evidenció un descenso significativo en la densidad ósea, ubicando el fémur en el umbral de osteopenia avanzada, comparable al fémur de una persona de avanzada edad en la Tierra. De igual manera, se pudo constatar que el módulo de elasticidad del fémur se vio reducido a la mitad de su valor inicial, siendo así propenso a fracturar en caso de apoyo del cuerpo con sólo una pierna.

## **Metodología**

Manteniendo lo anteriormente expuesto, con la finalidad de cumplir el objetivo planteado, se desarrolló una investigación con enfoque cuantitativo, con una metodología de investigación experimental, estableciendo como parámetro de estudio características de fémur de un varón de 40 años con masa ósea promedio, y estatura de 1.70 metros; consultando diversas referencias y empleando diversos softwares para recrear y analizar el escenario de estudio.

Para ello, se definieron 3 ejes principales de investigación, convergiendo en el objetivo general de la investigación tal como se muestra en el diagrama. Es de suma importancia destacar que el software en el que se realizó el Análisis de Elementos Finitos (FEA, por sus siglas en inglés) ha sido Student Ansys Workbench en su versión 18.1. La figura 1 muestra el Diagrama de Flujo de la Metodología del Proyecto de Investigación

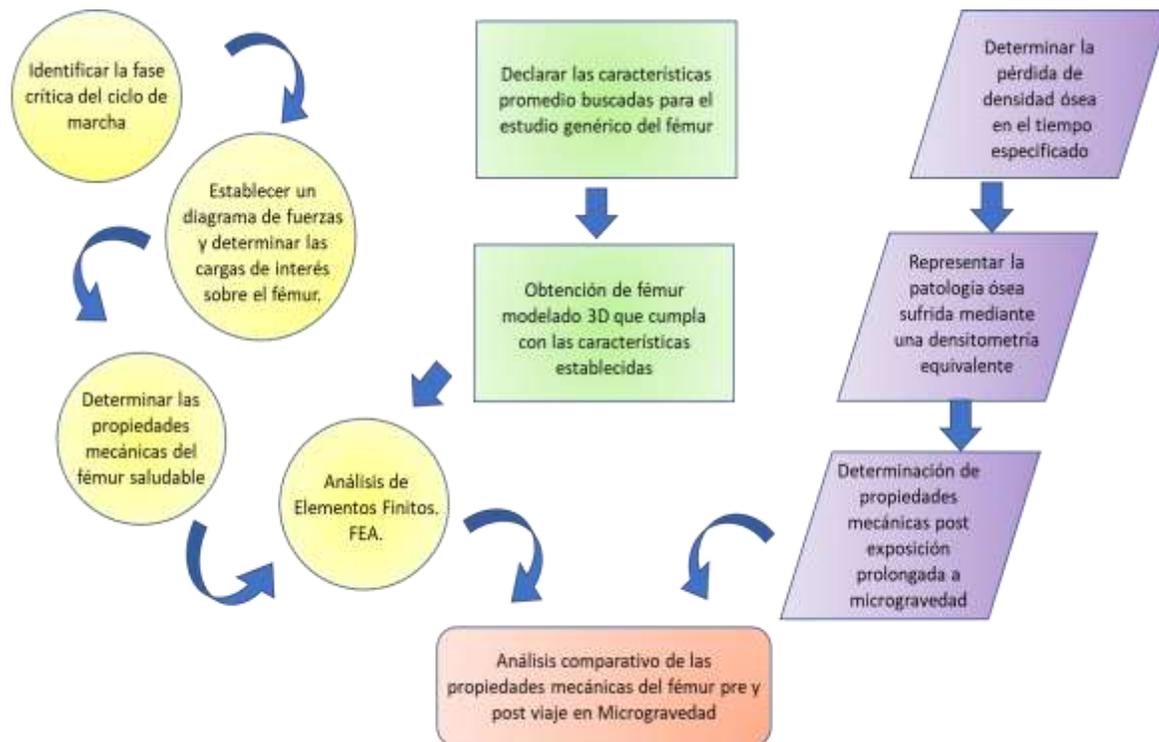
## **Limitaciones**

No se tomó en consideración el peso del fémur, así como el efecto de disminución de masa muscular, directamente reflejado en la resistencia de estos, y por tanto las cargas generadas sobre el fémur. En el mismo sentido, ante la imposibilidad de determinar un modelo matemático

capaz de relacionar el módulo de elasticidad con los esfuerzos últimos del material en estudio, se consideró una relación lineal basada en los valores iniciales de un fémur promedio saludable.

**Figura 1**

*Diagrama de Flujo de la Metodología del Proyecto de Investigación*



Fuente: Abruscato (2022)

## Análisis

### Fuente de Datos:

Debido a la inexistencia de un registro de pérdida de densidad ósea en viajes interplanetarios de astronautas por falta de suceso, se hizo referencia al artículo científico de Looker et al. (1998) que indica la masa ósea promedio por edad de diversos grupos étnicos en los Estados Unidos de América. Obteniendo como promedio de densidad para un adulto varón de 40 años y estatura 1,70 m. un valor de 1,05 gramos por centímetro cuadrado.

Además, se hizo uso de la fórmula que establece una relación directa entre la estatura de un individuo y la longitud máxima de su fémur, lo cual facilitó la búsqueda del modelado 3D del mismo. Dicha fórmula (Ecuación 1) fue determinada por Trotter & Glewslers (1958).

$$Estatura_{varón} = (2,38) (long. máx fémur en cm) + 61,41 \quad (1)$$

Dicha fórmula es empleada en paleontología para determinar la estatura aproximada de fósiles humanos encontrados.

### **Medida de densidad ósea:**

Empleando la fórmula extraída de VAKHUM (Van Sin Jant, 2005), y el valor promedio de módulo de elasticidad, se obtuvo el valor de densidad volumétrica necesario para su uso posterior en el análisis de elementos finitos. Dicha fórmula (Ecuación 2) fue determinada en el proyecto VAKHUM: femur.

$$E_{[MPa]} = (3,77545225 \cdot 10^{-6}) \rho^3 - (1,140543178 \cdot 10^{-5}) \rho^2 - (1,228931065013) \rho - 4,2824923390923 \quad (2)$$

### **Propiedades Mecánicas del Fémur:**

Se utilizó la fórmula relacionada a la regla de las mezclas (Ecuación 3), al tratarse del estudio de un material ortotrópico (compuesto) (University of Cambridge, 2002), que consta de una matriz orgánica y fibra, recalculando los valores de las propiedades mecánicas.

$$E = f \cdot E_f + (1 - f) \cdot E_m \quad (3)$$

Donde:

$E_f$  = Módulo de Young de la Fibra.

$E_m$  = Módulo de Young de la Matriz Orgánica.

$E$  = Módulo de Young del compuesto en dirección axial y transversal.

$f$  = Fracción de volumen de Fibra.

### **Cuantificación de Patología Ósea Sufrida:**

La **osteopenia** es una patología ósea que comienza a medida que masa ósea decrece y, por ende, los huesos se ven debilitados; causa de la pérdida de calcio, reflejándose en una estructura ósea (American Academy of Family Physicians, 2020). A su vez, la **osteoporosis** es igualmente una enfermedad esquelética en la que se produce una disminución de la densidad de masa ósea. Así, incrementa la porosidad, aumentando el número y el tamaño de las cavidades, son más frágiles, tienden a resistir peor los impactos y se rompen con mayor facilidad (Fundación Española de Reumatología, s.f.). Una manera de identificar esta patología ósea es la densitometría, que permite comparar mediante el valor estadístico denominado T-score, la densidad promedio de los huesos de un humano por edades.

Los resultados del T-score pueden ser (Biblioteca Nacional de Medicina (EEUU), 2021):

- Puntuación T de -1,0: Se considera densidad ósea normal.
- Puntuación T de entre -1.0 y -2.5: Significa que tiene una densidad ósea baja (osteopenia) y que sufre riesgo de osteoporosis
- Puntuación T de -2.5: Sufre osteoporosis.

### **Fase Crítica del Ciclo de Marcha:**

Teniendo en cuenta el alto porcentaje de fracturas de cadera que tienen lugar en la ruptura del cuello femoral, se presentan los casos más comunes de este tipo de fractura en la figura 2.

### **Figura 2**

### Representación de Fracturas Comunes Causantes de la Denominada Fractura de Cadera



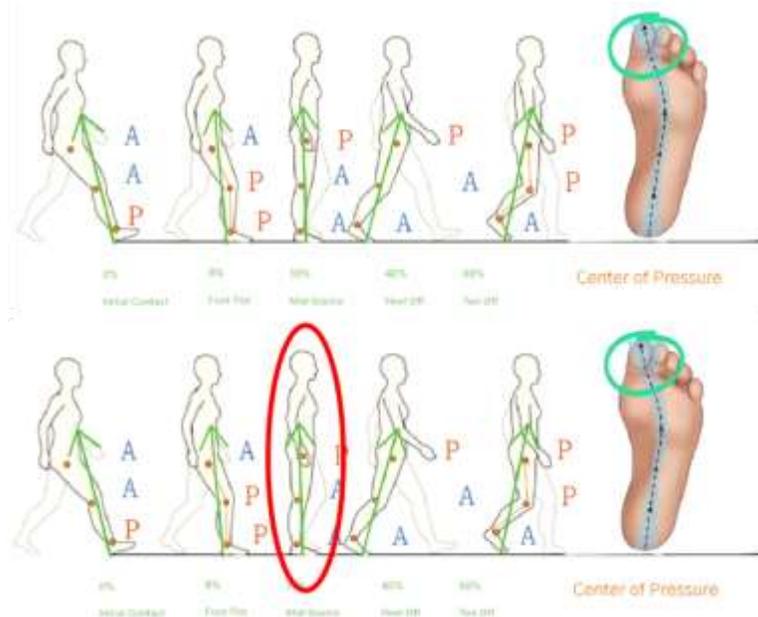
Nota. Reproducida de Three main types of hip fractures and subtrochanteric fracture, en Nasiri Sarvi, (2018).

Al identificar la fase crítica del *ciclo de la marcha*, se distinguen 2 fases principales, las cuales son **fase de apoyo** y **fase de balanceo**. Para efectos de estudio, se ha tenido especial foco en la fase de apoyo (el instante en el cual un pie está de apoyo sobre el suelo), específicamente en el apoyo único (con una sola extremidad).

En la figura 3 se señala la fase denominada *mid-stance*, todo el cuerpo se encuentra apoyado sobre una pierna. Para determinar la fuerza de soportada por la extremidad, se hizo referencia al modelo matemático de Pauwels (Krieg, 1996), que considera el balance de la cadera que se da al permanecer en posición *mid-stance*, por ende, alterando la proporción de carga del cuerpo soportada en ese instante.

### Figura 3

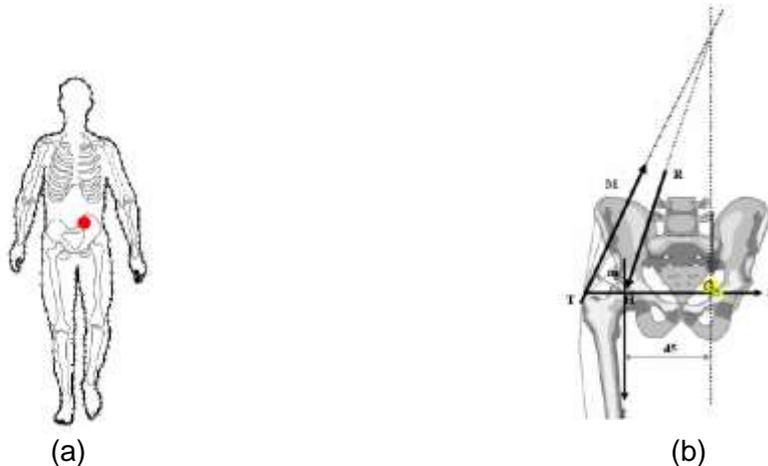
#### Total de Fases y Fase Crítica del Ciclo de Marcha



Nota. Adaptada de Ground Reaction Force During the Gait Cycle, de Alexandra Kopelovich, (2020)

### Figura 4

### Reacción de la Pelvis Sobre la Pierna de Apoyo en Posición Mid-Stance (a). Modelo matemático de Pauwels (b)



Nota. Adaptada de *Phase of walking after Fischer and Braune (a), Pauwels mathematical model, de Renner Silker (2007). Determination of muscle forces acting on the femur. CC BY 3.0.*

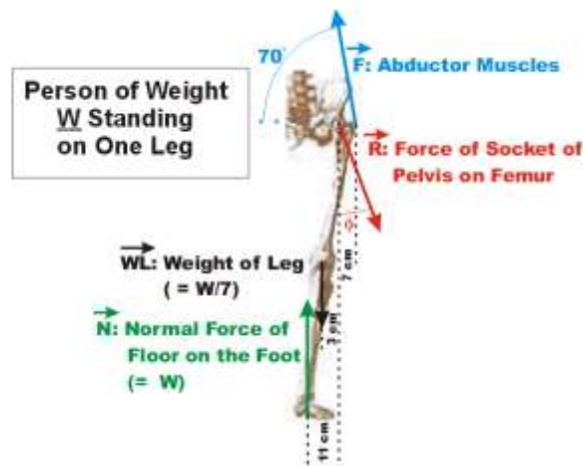
Dónde:

- M representa la fuerza ejercida por el músculo abductor.
- R representa la fuerza ejercida por la pelvis sobre el fémur.

Para el estudio llevado a cabo, se debe ingresar en el sistema el valor del peso del cuerpo soportado por la estructura ósea, así como la reacción normal de la superficie en la cual ésta se apoya. Para las fuerzas que actúan sobre la pierna, fueron consultadas las relaciones estudiadas por la universidad de Toronto; dichas relaciones se representan a través de la figura 5.

### Figura 5

Representación de las Fuerzas sobre una Pierna Apoyando el Cuerpo Entero



Fuente: Tomado de Retrieved from Forces on the Leg, de Harrison (2004). CC BY 2.0

Obteniendo los siguientes resultados una vez realizada la sumatoria de fuerzas y momento lineal.

$$F = 1.6 W$$

Revista Digital La Pasión del Saber. Publicación Semestral.  
Año 12. N° 22. Julio-diciembre 2022. ISSN 2244-7857

$$R = 2.4 W$$

Para el estudio realizado, valores promedio para un adulto de 40 años y 1,70 metros de estatura fueron asumidos.

$$\text{Masa} = 70 \text{ Kg}$$

$$F = 1098,72 \text{ N}$$

$$R = 1648,08 \text{ N}$$

### Figura 6

Diagrama de Fuerzas Equivalentes sobre el Fémur en Estudio.

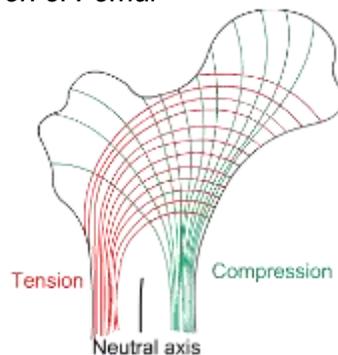


Fuente: Abruscato (2021)

Ha de ser aclarado que para el estudio realizado no se ha tomado en cuenta el papel importante que toman los músculos en cuanto al soporte de cargas sobre los huesos. Sólo se ha tomado en cuenta la fuerza ejercida por la unión de la cadera al cuello femoral y reacción del músculo abductor sobre el hueso. Por lo que se espera que el fémur exprese un comportamiento en términos de representación de dirección en esfuerzos máximos expresados en la figura 7.

### Figura 7

Trayectoria de Esfuerzos sufridos en el Fémur



Fuente: Tomado de ¿Qué tienen en común los huesos, las patas de silla y la torre Eiffel?, de s.f., (2017). CC BY 2.0.

Con el objetivo de comprender las propiedades mecánicas de un fémur saludable, fue ejecutado un análisis estático empleando los valores previamente consultados y determinados. Para ello, ha sido necesario hacer uso de un modelo 3D de fémur encontrado en la plataforma GrabCAD,

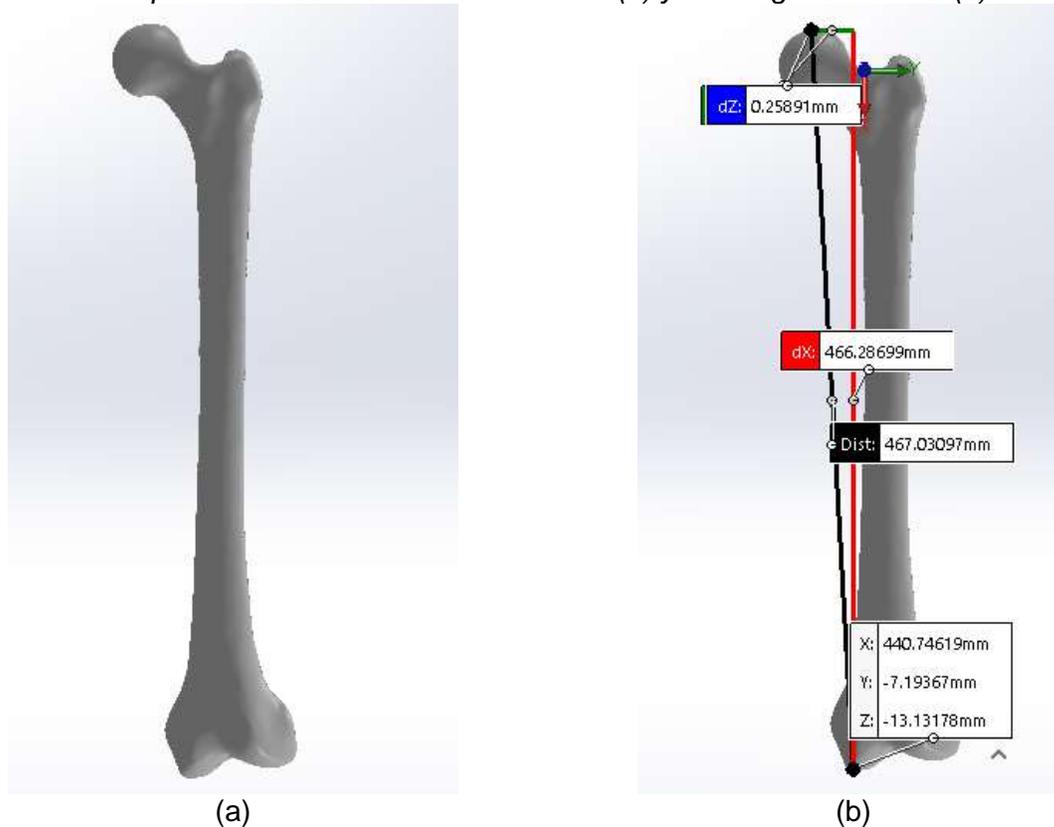
Revista Digital La Pasión del Saber. Publicación Semestral.

Año 12. N° 22. Julio-diciembre 2022. ISSN 2244-7857

con la finalidad de obtener sus dimensiones naturales, el cual fue escaneado con el fin de contar con la precisión necesaria para los estudios planteados.

### Figura 8

*Fémur Modelado por Medio de Técnicas de Escaneo (a) y su Longitud Máxima (b)*



Fuente: Abruscato (2022)

El fémur empleado tiene una longitud máxima de 466,287 mm, o 0,466287 m.

Una vez obtenido esta medida, ha sido posible calcular la estatura correspondiente de la persona con el fémur de dicha longitud. Usando la ecuación 1 para determinar la estatura equivalente a la longitud del fémur.

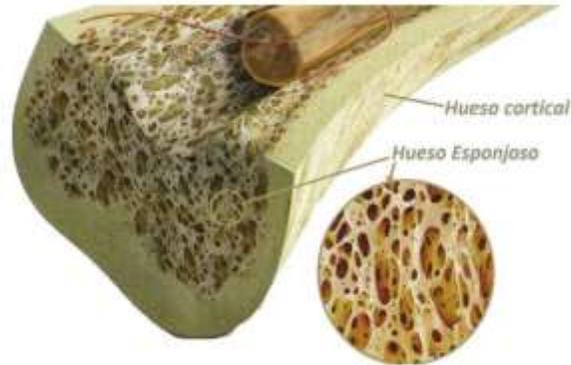
$$\begin{aligned} \text{Estatura varón [cm]} &= (2,38) (46,6287) + 61,41 \\ \text{Estatura varón [cm]} &= 172,386 \end{aligned}$$

Resultado considerado válido para el caso en estudio, donde se estableció un perfil de un varón de 40 años y estatura de 1,70 m. Para el correcto estudio de carga estática, se debió considerar el hecho de que el fémur está compuesto de dos (2) principales materiales con diversas propiedades mecánicas.

### Figura 9

*Composición Genérica de los Huesos*

Revista Digital La Pasión del Saber. Publicación Semestral.  
Año 12. N° 22. Julio-diciembre 2022. ISSN 2244-7857



*Nota.* Adaptada de División entre hueso esponjoso y cortical, de Galindo Roberto (2017). CC BY 3.0.

**Tabla 1**

*Matriz – Fibra de los Huesos y sus Propiedades Mecánicas*

Hueso	Esfuerzo a Tensión	Esfuerzo a Compresión
Cortical	200 MPa	20 MPa
Esponjoso	135 MPa	14 MPa

*Nota.* Ultimate strength of the cortical and compact bone, de Renner Silker (2007). CC BY 3.0

Con efectos de estudiar el fémur como un único material, se procedió a emplear la ecuación 3 para cuantificar las propiedades mecánicas del fémur. Dichas propiedades mecánicas fueron introducidas al momento de realizar estudio de cargas estacionario son las siguientes:

**Tabla 2**

*Propiedades Mecánicas del Fémur en Estudio en Condición Saludable*

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad Mineral Ósea	1650	$\frac{Kg}{m^3}$
Módulo de Elasticidad Longitudinal	17	GPa
Módulo de Elasticidad Transversal	12,6	GPa
Coefficiente de Poisson		0,39
	<b>Esfuerzo Último</b>	
Dirección	Valor	Unidad
Longitudinal	Tensión: 123	MPa
	Compresión: 164	
Transversal	Tensión: 50	MPa
	Compresión: 50	

*Nota:* Abruscato (2021)

***Pérdida de Densidad de Huesos en Ambiente de Microgravedad:***

El término **microgravedad** es referido como un sinónimo de ingravidez, un entorno en donde el valor de la fuerza de gravedad experimentada es casi despreciable debido a su pequeño valor (Wikipedia, 2021). Esta gravedad tan mínima, provoca que no se forcen de igual manera los huesos y músculos del cuerpo, por ello, no son segregadas las sustancias que renovan el tejido óseo, eventualmente el cuerpo se deshace del calcio y demás minerales que componen los huesos. Con el objetivo de constatar dicho efecto, se hace referencia a la figura, ideada tomando en cuenta los datos experimentales de las misiones espaciales Gemini, Apolo y astronautas que han podido desempeñar funciones en el laboratorio espacial MIR y la Estación Espacial Internacional (ISS con sus siglas en inglés) (Clement & Hamilton, 2003).

**Figura 10**

*Pérdida de Densidad Ósea Durante un Vuelo Espacial*



*Nota.* Muscle and Bone in Space, de Clement & Hamilton (2003).

Basado en el artículo de Oshima (2012), el hueso femoral proximal pierde el 1,5% de su masa por mes, o aproximadamente el 10% durante una estancia de seis meses en el espacio. Por ende, para el presente estudio se estableció un ritmo de porcentaje de pérdida de densidad del fémur de 1,25%.

El valor de densidad del fémur en estudio fue calculado usando la ecuación 2, resultando 1650 Kg/m<sup>3</sup>, basado en el valor promedio de 17 GPa como dato relativo.

$$E_{[MPa]} = (3,77545225 \cdot 10^{-6}) \rho^3 - (1,140543178 \cdot 10^{-5}) \rho^2 - (1,228931065013) \rho - 4,2824923390923$$

$$17 \cdot 10^3 \text{ MPa} = (3,77545225 \cdot 10^{-6}) \rho^3 - (1,140543178 \cdot 10^{-5}) \rho^2 - (1,228931065013) \rho - 4,2824923390923$$

$$\rho = 1654 \frac{kg}{m^3}$$

Con la tecnología actual, un viaje a Marte duraría aproximadamente 9 meses. Por lo que, en un viaje de ida y vuelta (sin considerar las ventanas de máxima proximidad entre la Tierra y Marte,

las cuales incrementarían considerablemente el tiempo de la misión) de 18 meses en microgravedad, resultaría en una pérdida total de 22,5%, determinado con la ecuación 4.

$$\% \rho_{perdida\ total} = (1,25\ \%)(\text{número de meses bajo microgravedad}) \quad (4)$$

De igual manera, se determinó la densidad volumétrica del fémur al final del periodo de estudio empleando la ecuación 5:

$$\rho_{final} = \rho_{final} - \left( \rho_{final} \cdot \frac{\% \rho_{perdida\ total}}{100} \right) \quad (5)$$

$$\rho_{final} = 1278,75 \frac{kg}{m^3}$$

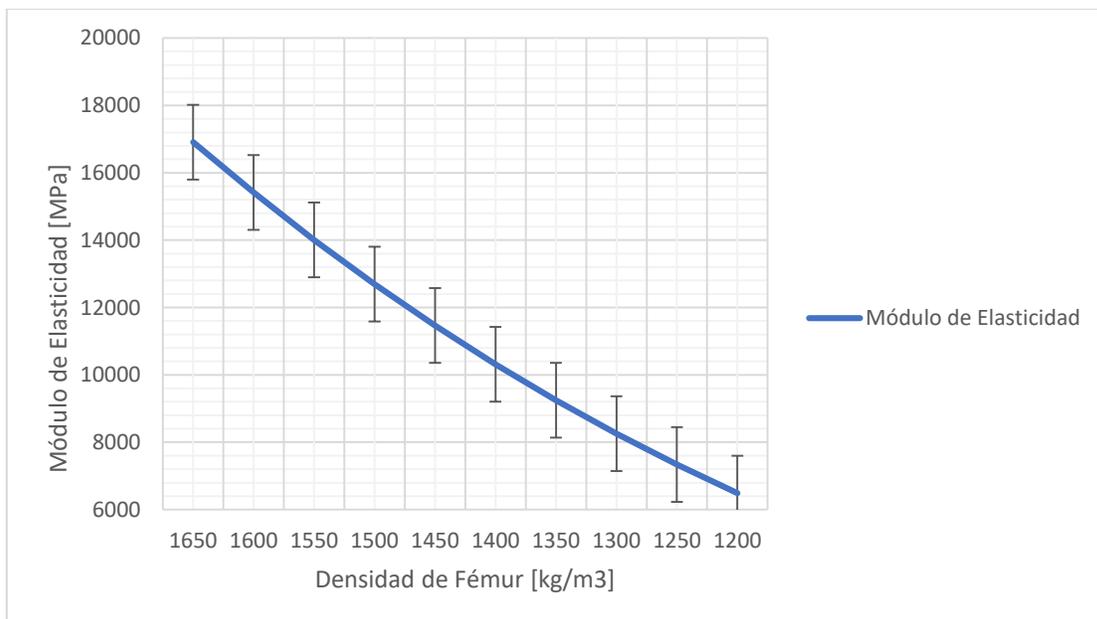
¿Cómo representar dicho efecto? Usando la ecuación 2, fue posible precisar el valor de módulo de elasticidad correspondiente. Así, tras de 18 meses bajo microgravedad, la reducción en el módulo de elasticidad se ve reducido a:

$$E = 7,9\ GPa$$

Con el objetivo de describir de una manera precisa la pérdida de densidad de los huesos al experimentar microgravedad, se presenta la siguiente curva:

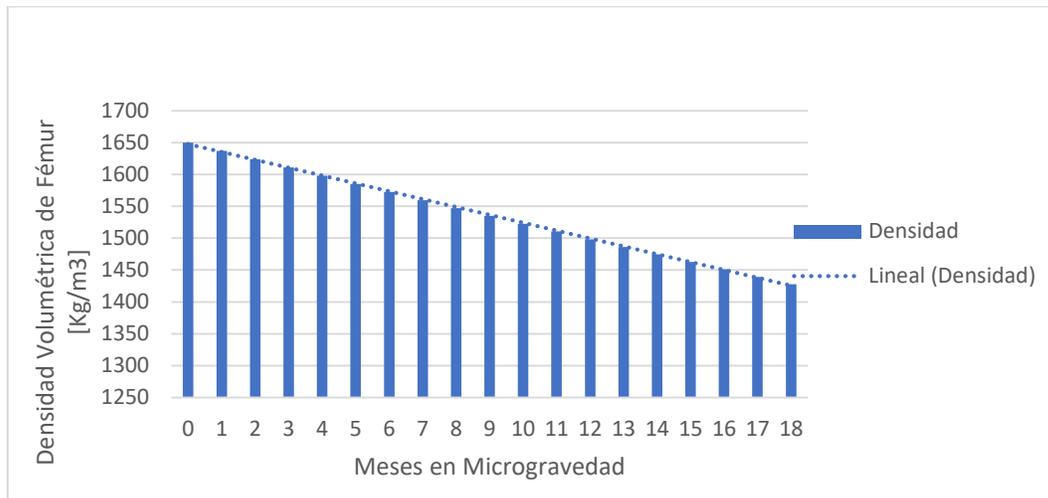
**Figura 11**

*Gráfico Módulo de Elasticidad vs Densidad del Fémur*



**Figura 12**

### Gráfico Descenso de Densidad Volumétrica del Fémur a lo Largo de los Meses Bajo Microgravedad

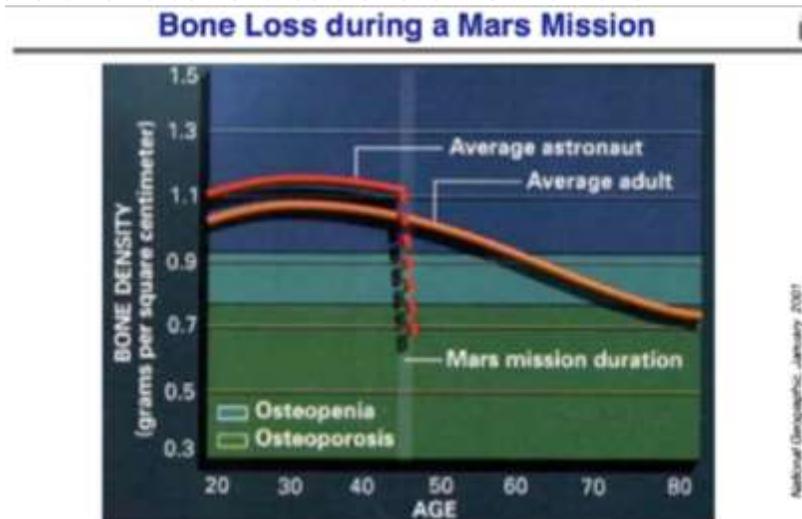


### Patología Ósea Sufrida:

¿Cómo cuantificar y clasificar los efectos evidenciados? Una de las maneras más completas de ejemplificar, es la de presentar una densitometría equivalente. Con este propósito se hace referencia al gráfico que relaciona la patología que llegaría a sufrir un astronauta de 45 años con una densidad aproximada de 1,1 g/cm<sup>2</sup> en una misión a Marte (National Geographic, 2001).

### Figura 13

Predicción de Densitometría de Astronauta en una Misión a Marte

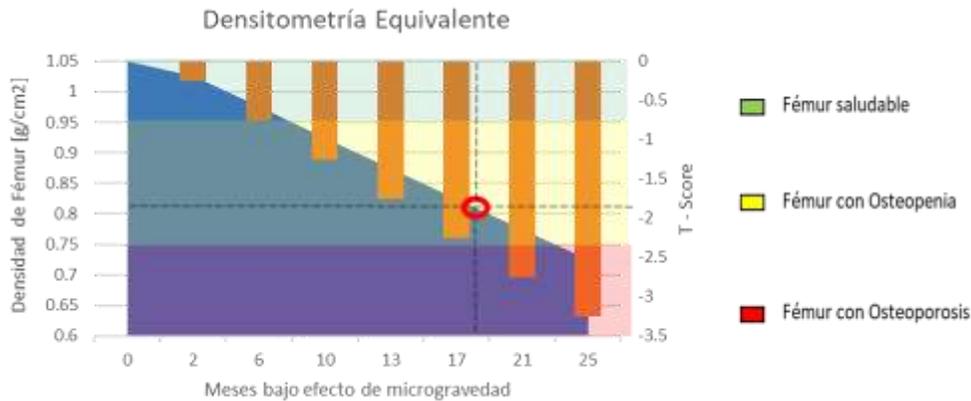


During a mission to Mars, a 45-year-old astronaut could see bone deterioration reach the weakened state of severe osteoporosis

Nota. Reproducida de Bone Loss During a Mars Mission, de National Geographic (2001). CC BY 2.0. Basado en el gráfico referenciado, se extrapola a la situación en estudio, obteniendo los resultados expresados en la figura 14 de densitometría ósea.

**Figura 14**

*Densitometría Equivalente al Caso de Estudio*



*Nota:* Datos para una persona promedio con fémur saludable en rango de un avanzado nivel de osteopenia (muy próximo a sufrir osteoporosis) tras 18 meses bajo efectos de microgravedad.

**Propiedades Mecánicas Post Experimentación de Microgravedad por 18 meses:**

Debido a la imposibilidad de realizar un ensayo mecánico para conocer la deformación unitaria del hueso una vez llegado al bajo nivel de densidad, no ha sido posible obtener los esfuerzos en la direcciones axial y transversal. Sin embargo, asumiendo una relación lineal permitió contrastar la diferencia de resistencia a carga sobre el fémur en estudio, señalado en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Propiedades Mecánicas del Fémur en Estudio Post Experimentación de Microgravedad*

Propiedad	Valor	Unidad
Dénsidad	1278,75	$\frac{Kg}{m^3}$
Módulo de Elasticidad Longitudinal	7.9	GPa
Módulo de Elasticidad Transversal	5.8	GPa
Coeficiente de Poisson	0,39	
<b>Esfuerzo Último</b>		
Dirección	Valor	Unidad
Longitudinal	Tensión: 57,16	MPa
	Compresión: 76,21	
Transversal	Tensión: 23,25	MPa
	Compresión: 23,25	

**Factor de Seguridad:**

$$FS = \frac{\sigma_{\text{último}}}{\sigma_{\text{máximo}}} \quad (6)$$

Para la determinación del factor de seguridad, se empleó la ecuación 6, la cual establece una relación entre el esfuerzo último experimentado por un material y el esfuerzo máximo soportado por el mismo (Macías, 2019).

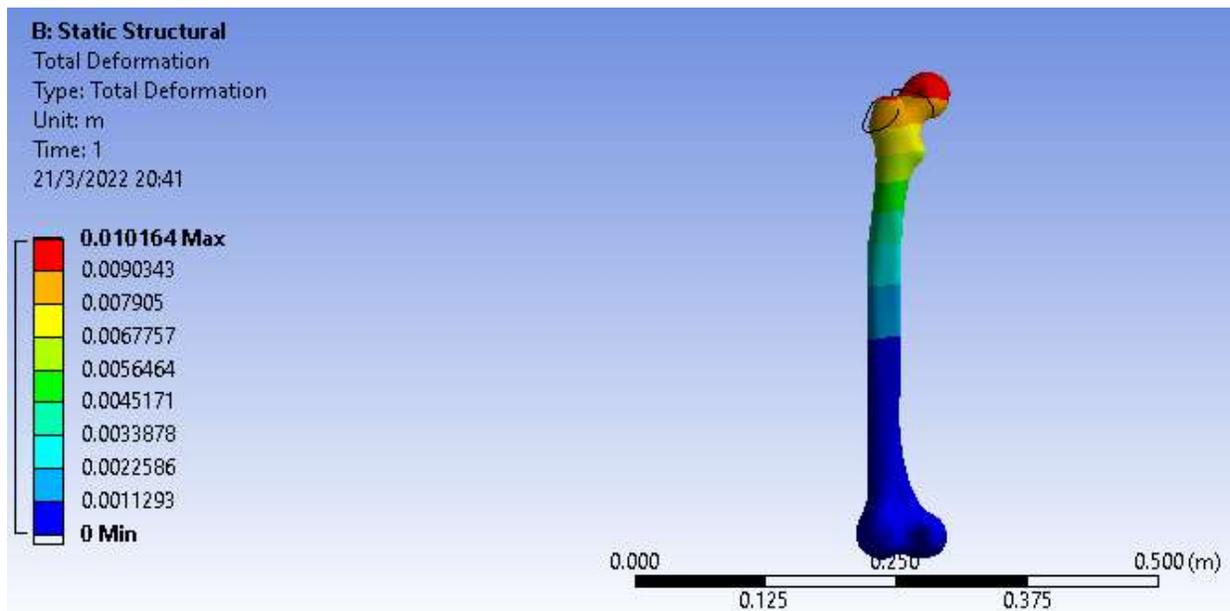
## Discusión de Resultados

### *Resultados del estudio de carga estático del fémur en condición saludable:*

La deformación máxima experimentada en el fémur tiene lugar en el cuello femoral, teniendo esta una magnitud de 0,010164 m, o lo que es igual; 1,0164 centímetros; un desplazamiento considerable en las escalas biomecánicas, de acuerdo con lo expresado en el estudio realizado por Renner (2007); considerándolo este último como un material no ortotrópico, estudiando la unión en proporción del hueso cortical y el hueso esponjoso.

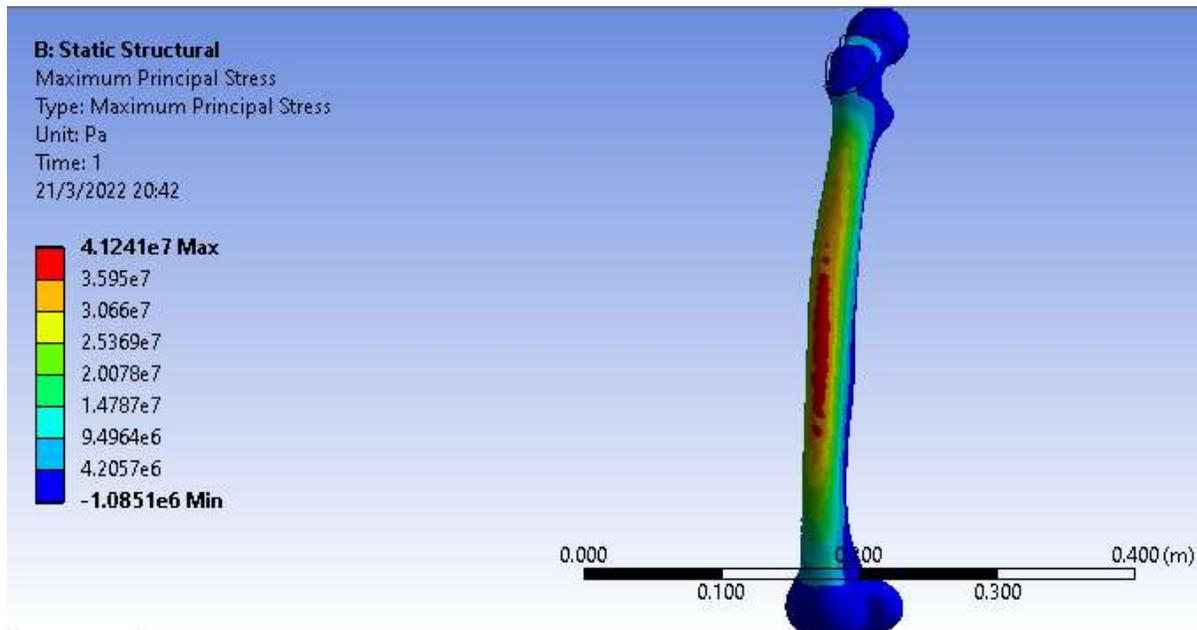
## Figura 15

*Deformación Máxima Experimentada en el Fémur tras el Análisis de Elementos Finitos.*



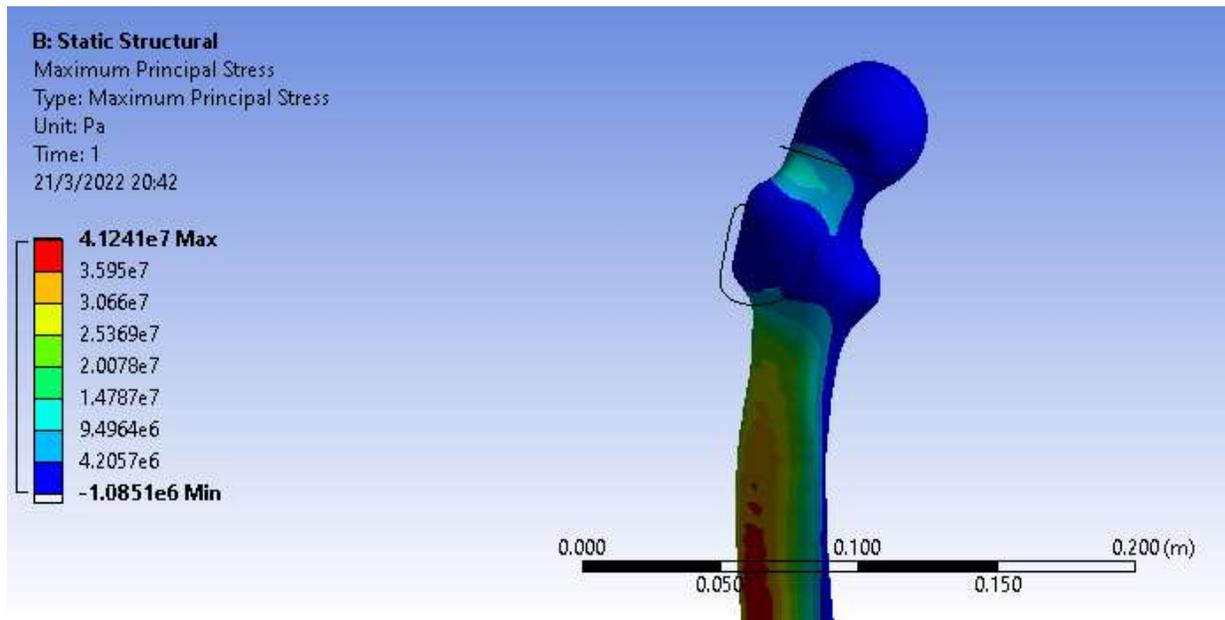
## Figura 16

### Esfuerzo Máximo a Tensión en Dirección Longitudinal Experimentado en el Fémur tras Realizar el Análisis de Elementos Finitos



**Figura 17**

### Esfuerzo Máximo Experimentado en el Cuello Femoral tras Realizar el Análisis de Elementos



En cuanto al esfuerzo máximo, éste tuvo lugar en la parte lateral del fémur sometida a tensión, experimentando un máximo de 41,241 MPa. De igual manera, en la parte superior del cuello

femoral se observó una representación de esfuerzo máximo equivalente a 14,8 MPa. Coincidiendo así a con los datos consultados sobre las típicas denominadas fracturas de cadera dadas por fractura del cuello femoral presentados en el estudio de Nasiri, Sarvi (2018). Además, se constató que la dirección de los esfuerzos concuerda con el resultado esperado, expresado mediante la figura 7; el lateral externo del fémur sometido a tensión, al contraste con el lateral interno, sometido a compresión.

#### ***Factor de Seguridad del Fémur Saludable en Estudio:***

Haciendo uso de la ecuación 6, se obtiene:

$$FS = 2,983$$

Lo cual se traduce como; el fémur en condición anterior al vuelo en microgravedad, saludable, soporta un esfuerzo a tensión aproximadamente 3 veces mayor al experimentado antes de presentar una fractura.

#### ***Comparación de Efectos en las Propiedades Mecánicas del Fémur Pre y Post Exposición a la Microgravedad por 18 Meses:***

Factor de seguridad del fémur en condiciones post - microgravedad:

$$FS = 1,386$$

Lo cual refleja una condición crítica, ya que el fémur vagamente puede soportar la carga aplicada antes de presentar fractura. Una carga ligeramente superior a aquella causada por la cadera y el músculo abductor representaría una fractura.

#### ***Disminución del módulo de elasticidad:***

% Descenso módulo de elasticidad a tensión = 53,529%

### **Conclusiones**

Como puntos de interés a destacar del estudio realizado, se resalta: la exposición a microgravedad durante el periodo equivalente al viaje de ida y vuelta a Marte resultó en una reducción del 22,5% de la densidad ósea del fémur, expresado en un descenso directo en las propiedades mecánicas, en lo que destaca la reducción en un 54% del valor del módulo de elasticidad del fémur. Teniendo en cuenta que el fémur saludable en estudio, al aplicarle las cargas generadas por el músculo abductor y la reacción generada debido al contacto con la cadera, reflejó un esfuerzo máximo en tensión de 41,241 MPa en la dirección longitudinal, el esfuerzo determinado linealmente correspondiente a tensión en la misma dirección del fémur post experimentación a microgravedad difiere por solo 16 MPa. Esto significa que el fémur de un varón de 40 años y estatura 1,70 m, tras 18 meses bajo los efectos de microgravedad, dada la pérdida de densidad ósea (presentando una osteopenia crítica) y sin considerar las cargas soportadas por de los músculos en la distribución de fuerzas sobre el fémur, se encuentra en una situación de fractura de inminente al este apoyarse sobre una sola pierna.

### **Referencias**

- Appe et al. (2020). *A human mission to Mars: Predicting the bone*. Retrieved from PlosOne: <https://doi.org/10.1371/journal>.
- American Academy of Family Physicians. (2020, Noviembre 3). *Familydoctor.org*. Retrieved from Osteopenia: <https://es.familydoctor.org/condicion/osteopenia/>
- Biblioteca Nacional de Medicina (EEUU). (2021, Septiembre 16). *MedlinePlus en español*. Retrieved from <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/densitometria-osea/>
- Clement, & Hamilton. (2003). Muscle and Bone in Space. *Fundamentals of Space Medicine*, Chapter 4.
- Enrique. (2012, Julio 14). *GrabCAD*. Retrieved from A Femur Model from 3D Scan file: <https://grabcad.com/library/femur--1>
- Fundación Española de Reumatología. (n.d.). *Osteoporosis: qué es, síntomas, diagnóstico y tratamiento*. Retrieved from <https://infoeuma.com/enfermedades-reumaticas/osteoporosis/>
- Harrison M., D. (2004, Octubre). *University of Toronto*. Retrieved from Forces on the Leg: <https://faraday.physics.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/HipForces/HipForces.html>
- Kopelovich, A. (2020, Septiembre 24). *Youtube*. Retrieved from Ground Reaction Force During the Gait Cycle: <https://www.youtube.com/watch?v=Y2RHvicAM2o>
- Krieg, J. P. (1996). *Berechnung von Muskel und Gelenkkraften mit Hilfe*. Eberhard-Karls- Universität zu Tübingen.
- Looker, Wahner, & Dunn. (1998). Updated Data on Proximal Femur Bone Mineral Levels of US Adults. *Osteoporosis International*, 469-490.
- Macías, A. (2019, Mayo 07). *Intelligy*. Retrieved from Cálculo e Interpretación del Factor de Seguridad: <https://intelligy.com/blog/2019/05/07/calculo-e-interpretacion-del-factor-de-seguridad/>
- Mendoza, M. H. (2003). Clasificación de la osteoporosis. Factores de riesgo. Clínica y diagnóstico diferencial. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26(Supl. 3), 29-52.
- Nasiri Sarvi, M. (2018). Hip Fracture: Anatomy, Causes, and Consequences. *Intechopen*.
- National Geographic. (2001). Bone Loss During a Mars Mission.
- Oshima, H. (2012). *Preventing Bone Loss in Space Flight with Prophylactic Use of Bisphosphonate: Health Promotion of the Elderly by Space Medicine Technologies*.
- Renner, S. (2007, Noviembre). *Determination of muscle forces acting on the femur*. München, Deutschland.
- The International Osteoporosis Foundation. (2009). The Global Burden of Osteoporosis: A Factsheet. 1-5.
- University of Cambridge. (2022, Marzo 24). *Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)*. Retrieved from [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bones/derivation\\_mixture\\_rules.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bones/derivation_mixture_rules.php)
- Van Sin Jant, S. (2005). The VAKHUM project: Virtual animation of the kinematics of the human. Vol. 6, No. 3-4, 277-279.
- Wikipedia. (2021, Abril 2021). *Microgravedad*. Retrieved from <https://es.wikipedia.org/wiki/Microgravedad>

## Acerca del Autor

**Antonio José Abruscato Zapata**. Ingeniero mecánico, de la Universidad José Antonio Páez (2019). Diplomado en Mecatrónica Aplicada (CEUJAP) (2018). Mención honorífica por haber ocupado el primer lugar del Índice de Desempeño Académico (IDAP). Mención honorífica por el Informe Final de Diplomatura realizado.