

ANÁLISIS DE LA TENACIDAD AL DESGASTE DE LAS ARTICULACIONES COXOFEMORALES DE PACIENTES AFECTADOS POR OSTEOPOROSIS

Data de aceite: 03/04/2023

Jose Luis Soto Trinidad

Instituto de Investigaciones Aplicadas a la Ingenierías, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana
ORCID: 0000-0001-5343-0985

Ley Natanael Mercedes Montero

Instituto de Investigaciones Aplicadas a la Ingenierías, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana

RESUMEN: En la Republica Dominicana la osteoporosis está afectado a muchas personas. Esta enfermedad ataca la estructura del tejido óseo causándole un trastorno esquelético caracterizado por la pérdida de masa, desgaste y fractura frágil. En este estudio se analizaron las articulaciones coxofemorales de mujeres porque existe un movimiento relativo entre sus elementos formando sistemas tribológicos que trabajan con precisión y eficiencia; pero, los esfuerzos, la fricción y el desgaste en esta zona afectan su movilidad y resistencia. Por esta razón, a través de métodos tribológicos se evaluaron la tenacidad al desgaste de las articulaciones

de 41 mujeres. Como resultados, se obtuvieron la tasa y resistencia al desgaste a la erosión y adhesión de las articulaciones de cadera. Observándose que la tasa de desgaste adhesiva en las pacientes es mayor que la erosiva y a medida que estas tasas se incrementan en transcurso del tiempo reflejan como consecuencia las condiciones de osteopenia y osteoporosis. Por ende, la resistencia de los tejidos disminuye.

PALABRAS CLAVE: Tenacidad al desgaste; tasa de desgaste; osteoporosis; osteopenia; articulaciones coxofemorales.

ANALYSIS OF THE WEAR TENACITY OF THE COXOFEMORAL JOINTS OF PATIENTS AFFECTED BY OSTEOPOROSIS

ABSTRACT: In the Dominican Republic, osteoporosis is affecting many people. This disease attacks the structure of bone tissue causing a skeletal disorder characterized by loss of mass, wear and brittle fracture. In this study, the coxofemoral joints of women were analyzed because there is a relative movement between its elements forming tribological systems that work with precision and efficiency; but, friction, stress and wear in this area affect its mobility and resistance.

For this reason, through tribological methods, the tenacity to wear of the joints of 41 women was evaluated. As results, the rate and wear resistance to erosion and adhesion of the hip joints were obtained. Observing that the rate of adhesive wear in patients is greater than the erosive rate and as these rates increase over time, they reflect the conditions of osteopenia and osteoporosis as a consequence. Therefore, the resistance of the tissues decreases.

KEYWORDS: Wear toughness; wear rate; osteoporosis; osteopenia; coxofemoral joints.

1 | INTRODUCCIÓN

La osteoporosis afecta la estructura del tejido óseo causando un trastorno esquelético caracterizado por el desgaste y el deterioro de la arquitectura del tejido que produce por consiguiente un aumento de la fragilidad y la susceptibilidad a la fractura del hueso [1]. La fractura es la principal complicación, provocada por una baja resistencia ósea; esto implica el análisis de dicha resistencia debido a que es la fuerza necesaria para provocar, bajo ciertas condiciones de carga, la falla biomecánica del hueso [2]. Esta falla también es producto de las fuerzas que actúan sobre el hueso cuando se sobrepasa su capacidad de mantener el equilibrio [2]. La calidad ósea se refiere a factores como la arquitectura, la remodelación ósea, el daño acumulativo que crea microfisuras y el grado de mineralización [1].

La problemática presentada es de interés estudiarse porque afecta la forma en que se verifican fenómenos de fricción, desgaste y los esfuerzos que se provocan en las articulaciones de caderas y su efecto en la movilidad del sistema en su totalidad y resistencia [3], [4], [5]. Por ende, el propósito de esta investigación es determinar la tenacidad al desgaste de las articulaciones coxofemorales de pacientes afectadas por descalcificación de los huesos empleando métodos de la tribología para calcular la tasa y la resistencia al desgaste que servirán para evaluar el comportamiento mecánico de estas articulaciones [5].

La Organización Mundial de la Salud convocó por primera vez a un grupo de expertos en 1994 para evaluar el riesgo de fracturas y su aplicación a la detección de la osteoporosis posmenopáusica. La osteoporosis se definió en función de la densidad mineral ósea utilizando una puntuación estandarizada, denominada T-score, para definir las categorías de diagnóstico, que son: Normal T-score ≥ -1 ; Osteopenia T-score entre -1 y -2.5 ; Osteoporosis T-score ≤ -2.5 y Osteoporosis severa T-score ≤ -2.5 con historial de fractura [6].

La osteoporosis es una enfermedad común que afecta a las poblaciones de personas en todo el mundo por lo que es gran interés estudiarse en la Republica Dominicana para conocer el daño tolerable o desgaste que produce en las articulaciones coxofemorales [7]. Por ende, en el estudio de las fallas por desgaste, es habitual considerar los procesos de desgaste definidos con referencia al tipo y geometría del movimiento relativo entre dos superficies en contacto [8].

Cada proceso de desgaste se debe a uno (o más) mecanismos de desgaste,

entre otros factores [9]. En este caso, se trataron el desgaste por erosión y el desgaste por deslizamiento [10], [11], [12]. En el caso de exista el desgaste de rodadura por deslizamiento en las articulaciones coxofemorales, las dos superficies o partes del cuerpo, como cadera y fémur, estarán en contacto repetido [11]. Además, está presente el desgaste por erosión; el cual se produce cuando partículas sólidas o gotas de líquido impactan en las superficies, aunque otros parámetros dañinos pudieran presentarse [10]. El procedimiento de estos métodos tribológicos bajo normas se trata en la siguiente sección para cuantificar el daño en los tejidos óseos.

2 | MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los materiales que se utilizaron en esta investigación son las imágenes y la data numérica obtenidas en el estudio por densitometría ósea en pacientes mujeres en el país. Asimismo, para hacer este estudio se empleó el sistema GE Lunar Prodigy Advance DXA manufacturado por GE Medical Systems LUNAR [13].

2.2 Metodología para el estudio tribológico

El estudio tribológico se realizó de acuerdo a la Norma ASTM G-137-97 para la evaluación del desgaste adhesivo por deslizamiento en la configuración Bloque sobre anillo (Block-on-ring) [11] y la Norma ASTM-G-76-02 en el caso del análisis del desgaste por erosión de partículas sólidas erosivas [10].

2.3 Metodología para el análisis de imágenes médicas por densitometría ósea (DXA)

Primero, se definió una población de 40 pacientes mujeres entre 42 y 75 años de edad, afectadas por descalcificación de los huesos. Luego, se llevó a cabo la prueba de densitometría ósea (DXA) en los centros de Diagnósticos y centros médicos en periodo de tiempo comprendido entre agosto 2011 hasta septiembre 2021. La cual consistió en el análisis cuantitativo de la articulación de cadera de cada paciente y de ahí se obtuvieron el contenido mineral óseo (BMC), la densidad mineral ósea (BMD) y el T-score y el Z-score y la imagen medica de la zona analizada.

El T-score y el Z-score expresan la severidad de la enfermedad en cada paciente; el T-score es el valor de la desviación estándar de la densidad mineral ósea con respecto a una persona sana de 30 años del mismo sexo, mientras que el Z-score es la desviación estándar de la densidad ósea de una persona con la de una persona promedio de la misma edad y sexo [6],[13], [14].

2.4 Métodos tribológicos para el estudio de desgaste en las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificaciones de tejidos óseos

Debido a que en las articulaciones de cadera se presentan los mecanismos de desgaste por deslizamiento producto de los movimientos del paciente y/o el desgaste erosivo producto de la descalcificación de los huesos, se aplicaron los métodos tribológicos Bloque sobre Anillo (Block-on-Ring) regido por la norma ASTM 137-97 [11] [15], [16] y Erosión por Partículas Sólidas (Solid Particle Impingement) de la norma ASTM 76-02 [10], [15] para analizar los efectos de la descalcificación en dichos tejidos óseos. En el proceso de investigación; se inició con el cálculo de las variables tribológicas a partir de la data de masa del análisis de densitometría ósea, utilizando la ecuación 1.

$$M_{perdida} = \frac{\Delta BMC}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde ΔBMC es la variación del contenido mineral óseo y Δt el tiempo entre análisis de densitometría ósea.

Segundo, en el caso del estudio del desgaste adhesivo por deslizamiento presentado en las articulaciones coxofemorales, se utilizaron las ecuaciones del método Bloque en anillo, que consiste en presionar un bloque estacionario contra la superficie exterior de un anillo giratorio y el contacto puede darse cuando inicia la acción de deslizamientos entre los elementos en contacto, ya sea en ambiente de lubricación o de raspado, permitiendo altas presiones de contacto, tal como ocurre en las articulaciones coxofemorales [11]. Entonces, la tasa de desgaste adhesivo se determinó por la ecuación:

$$W = \frac{1}{F_N \cdot v \cdot \rho} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

F_N es la fuerza normal en el área de contacto ejercida por el acetábulo sobre la cabeza del fémur, v es la velocidad promedio de desplazamiento de la cabeza del fémur en la copa del acetábulo y ρ es la densidad del mineral óseo y m la masa ósea. Luego, se determinó la resistencia al desgaste adhesivo:

$$R_{adhesivo} = \frac{1}{W_{adhesivo}} \quad (3)$$

El estudio de desgaste erosivo de las articulaciones de cadera se realizó de acuerdo al método de prueba de erosión que involucra una corriente de gas con partículas abrasivas que impactan la superficie («Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets» 2018) [10]. Entonces, la tasa de desgaste erosivo (Q) se obtuvo por la ecuación 4:

$$Q_{erosivo} = \frac{M_{perdida}}{t_{exp}} \quad (4)$$

Donde, t_{exp} es el tiempo de padecimiento. Luego, la resistencia a la erosión se determinó a través de la ecuación 5:

$$R_{\text{erosivo}} = \frac{1}{Q_{\text{erosivo}}} \quad (5)$$

Después, se analizaron los resultados y las condiciones médicas de osteoporosis, osteopenia y normal.

3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del análisis de densitometría ósea en las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificación de tejidos óseos

La data de densidad mineral ósea (g/cm^2) obtenida por DXA en la cadera de mujeres de edades entre 42 y 75 años se presenta en la tabla 1. Se obtuvieron valores numéricos en el centro de la articulación de la cadera, diáfisis del fémur perpendicular al plano transversal con rotación interna de aproximadamente 15° a 25° , el cuello del fémur, la cabeza y el trocánter mayor.

Mujeres	NBMD	TBMD	TOBMD	t-sc	z-sc	NBMC	PESO (kg)	COND
P2BM	1.017	0.785	1.046	-0.2	1.7	4.90	63.50	Normal
P3CM	0.943	0.881	1.062	0.7	0.3	4.38	72.57	Normal
P4CR	0.874	0.89	1.052	-1.2	0.7	3.96	77.11	Osteopenia
P5CG	0.709	0.645	0.776	-2.4	-1	3.38	58.97	Osteopenia
P6DLO	0.804	0.896	0.982	-1.7	-1.1	4.56	77.11	Osteopenia
P7DLSM	0.949	0.778	1.021	-0.6	-0.1	3.82	63.05	Normal
P8DLM	1.002	0.726	1.004	-0.2	0.8	5.33	74.84	Normal
P9DD	0.862	0.649	0.87	-1.3	-0.2	3.36	72.57	Osteopenia
P10EA	0.823	0.665	0.833	-1.5	-0.2	4.36	72.57	Osteopenia
P11FI	0.829	0.661	0.861	-1.5	-0.6	3.45	63.50	Osteopenia
P12FC	1.145	0.784	1.096	0.8	1.7	4.70	64.86	Normal
P13FA	0.924	0.859	1.069	0.8	-0.2	4.31	72.57	Normal
P14GA	0.835	0.822	0.926	-1.5	-1.4	5.37	77.11	Osteopenia
P15GS	1.302	0.685	0.907	1.9	2.7	8.61	99.79	Normal
P16LRA	1.585	0.804	1.048	3.3	6.1	10.06	77.11	Normal
P17MM	1.098	0.844	1.067	0.4	0.8	4.54	72.57	Normal
P18PC	0.735	0.746	0.853	-2.2	-0.5	3.95	65.77	Osteopenia
P19PC	0.856	0.779	0.977	-1.3	-0.3	3.43	72.57	Osteopenia
P20SS	1.141	0.991	1.268	0.7	1.8	5.47	91.63	Normal
P21VL	1.678	0.674	0.964	4.5	5.3	14.69	58.97	Normal
P22ZR	0.695	0.619	0.726	-2.4	-0.7	3.19	63.05	Osteopenia

P23AL	0.845	0.744	0.912	-1.4	-0.6	3.71	75.75	Osteopenia
P24AY	0.899	0.743	0.964	-1	-0.1	4.23	90.72	Normal
P25AMY	1.241	1.065	1.363	1.5	2.9	7.48	73.48	Normal
P26AC	0.733	0.638	0.792	-2.2	-0.6	2.67	64.86	Osteopenia
P27AH	0.956	0.699	0.901	-0.6	0.2	4.75	58.97	Normal
P28AO	1.267	0.759	0.983	1.7	3.4	7.74	78.93	Normal
P29AL	0.913	0.749	0.913	-0.9	-0.3	4.36	92.53	Normal
P30AH	0.829	0.514	0.755	-1.5	0.4	3.58	57.61	Osteopenia
P31AH	0.725	0.514	0.687	-2.3	-0.4	2.54	57.61	Osteopenia
P32ADR	0.937	0.864	1.036	-0.7	0.6	4.62	72.57	Normal
P33AK	1.164	0.937	1.151	0.9	1	6.70	56.70	Normal
P34AK	0.619	0.504	0.627	-2.7	-1.4	2.02	97.52	Osteoporosis
P35AK	0.612	0.483	0.64	-3.1	-1.5	1.50	97.52	Osteoporosis
P36AJ	0.778	0.543	0.714	-1.9	-1.6	3.06	72.57	Osteopenia
P37AJ	0.708	0.506	0.673	-2.4	-2.1	2.41	72.57	Osteopenia
P38AAJ	1.101	0.82	1.099	0.5	1.5	6.18	72.57	Normal
P39AR	1.317	0.566	0.902	2	3.2	8.13	63.05	Normal
P40AS	1.092	0.892	1.102	0.4	0.4	6.05	63.50	Normal
P41ALS	0.943	0.833	1.04	-0.7	0.5	4.62	77.56	Normal

NBMD: Densidad mineral en el cuello femoral;TBMD: Densidad mineral en la región trocánterea; BMD: Densidad mineral en el triángulo de Ward; DBMD: Densidad mineral en la diáfisis; TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera; t – sc: t-score; z – sc: z-score; ALT: altura. Medidas de densidad mineral en (g/cm²).

Tabla 1. Resultados del análisis de densitometría ósea en las articulaciones coxofemorales de mujeres que presentan descalcificación de los tejidos óseos.

Fuente: Elaboración propia

El estudio del desgaste, se hizo en la región del cuello femoral, región trocánterea, Triángulo de Ward, la diáfisis y la región global de interés por considerarse que hay pérdida de masa ósea cuando las partes estén o no en contacto. Entonces, a partir de la densidad mineral ósea (g/cm²), el contenido mineral óseo (g), área proyectada (cm²), t-score y el z-score, se detectaron osteopenia, osteoporosis o desclasificación normal en las pacientes. Esta clasificación obedece a la puntuación estandarizada denominada T-score, para las categorías de diagnóstico, que establece: Normal T-score ≥ -1 ; Osteopenia T-score entre -1 y -2.5 ; Osteoporosis T-score ≤ -2.5 y Osteoporosis severa T-score ≤ -2.5 con historial de fractura [6], [17].

3.2 Resultados del análisis del desgaste erosivo en las articulaciones de caderas de pacientes

La tabla 2 muestra los resultados del estudio del desgaste erosivo en la región del cuello femoral de pacientes con descalcificación ósea en condición normal, tales como la tasa de desgaste (Qerosivo), la resistencia al desgaste (Rerosivo) y el volumen perdido

(Vperd).

Pacientes	NBMC (g)	NBMC_0 (g)	NBMD_0 g/cm ²	Qerosivo (g/año)	Rerosivo (año/g)	V ol perd (cm ³)
P2BM	4.900	3.027	0.629	0.489	2.047	0.522
P3CM	4.380	3.345	0.737	0.281	3.562	0.788
P4CR	3.960	2.823	0.623	0.237	4.216	0.345
P5CG	3.380	3.227	0.677	0.076	13.107	0.038
P6DLO	4.560	4.464	0.786	0.015	67.418	-0.018
P7DLSM	3.820	3.182	0.790	0.124	8.091	0.116
P8DLM	5.330	3.887	0.732	0.271	3.691	0.374
P9DD	3.360	2.761	0.721	0.121	8.238	0.509
P12FC	4.700	3.261	0.757	0.498	2.006	-0.794
P13FA	4.310	3.564	0.780	0.152	6.587	0.661
P15GS	8.610	4.974	0.753	0.360	2.776	0.633
P16LRA	10.060	3.812	0.600	0.602	1.660	1.072
P17MM	4.540	3.684	0.819	0.091	11.038	-1.750
P20SS	5.470	3.551	0.741	0.288	3.475	0.397
P21VL	14.690	5.140	0.761	1.148	0.871	11.801
P24AY	4.231	3.549	0.743	0.378	2.648	-0.180
P25AMY	7.478	3.875	0.716	0.708	1.413	3.858
P27AH	4.750	3.696	0.758	0.107	9.348	0.722
P28AO	7.737	3.734	0.683	0.375	2.667	4.103
P29AL	4.361	3.734	0.778	0.100	9.952	0.027
P32ADR	4.621	3.390	0.699	0.466	2.146	0.726
P33AK	6.698	4.598	0.874	0.276	3.621	2.936
P38AAJ	6.179	3.818	0.740	0.443	2.256	2.843
P39AR	8.127	4.089	0.738	0.398	2.512	3.975
P40AS	6.049	4.486	0.874	0.291	3.442	2.404
P41ALS	4.621	3.444	0.710	0.121	8.269	0.544

Tabla 2. Valores del desgaste erosivo de las articulaciones coxofemorales-región del cuello femoral, de mujeres con descalcificación en condición normal.

El desgaste que se presenta en las articulaciones de caderas está asociado a la pérdida de masa ósea de la superficie de la cabeza del fémur que se une con la pelvis en el acetábulo. La descalcificación es producto de diferentes factores y el grado de la enfermedad indica la condición normal por la poca pérdida de masa ósea en comparación con la osteopenia y la osteoporosis [18], [19]. Estos resultados de desgaste se muestran en la tabla 2 y en la tabla 3.

Paciente	NBMC (g)	NBMC_0 (g)	NBMD_0 g/cm ²	Qerosivo (g/año)	Rerosivo (año/g)	Volperd (cm ³)
P1BE	3.520	2.742	0.648	0.264	3.785	0.266
P10EA	4.360	3.628	0.686	0.244	4.105	0.252
P11FI	3.450	3.072	0.738	0.047	21.317	0.110
P14GA	5.370	4.543	0.837	0.056	17.928	5.385
P18PC	3.950	3.437	0.640	0.061	16.341	0.198
P19PC	3.430	3.334	0.728	0.021	47.703	-2.932
P22ZR	3.190	2.868	0.626	0.028	35.493	0.170
P23AL	3.711	3.547	0.759	0.017	58.825	-1.398
P26AC	2.672	2.900	0.649	-0.030	-33.751	-4.262
P30AH	3.582	2.878	0.620	0.183	5.466	-1.440
P37AJ	2.413	3.546	0.803	-0.116	-8.628	-5.503
P34AK	2.023	2.838	0.654	-0.116	-8.635	-5.742
P35AK	1.504	2.768	0.654	-0.180	-5.565	-9.513

Tabla 3. Valores de variables tribológicas que cuantifican el desgaste erosivo de las articulaciones coxofemorales de mujeres que padecen de osteopenia y osteoporosis.

En a tabla 3, las dos últimas filas de datos corresponden a las dos pacientes que padecen de osteoporosis, el resto de filas de datos corresponden a las pacientes con osteopenia. El efecto de la degradación de la masa ósea en el cuello del fémur que refleja estas enfermedades o patologías se puede observar en la Figura 1.

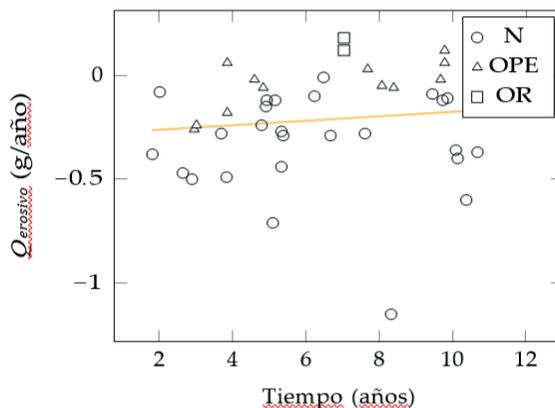


Figura 1. Tasa de desgaste erosivo ($f(x) = 0.0108x - 0.2841$; $R^2 = 0.0138$) en pacientes: Condición N médica normal; OPE: Osteopenia; OR: Osteoporosis.

En la figura 1 se muestra la cuantificación del desgaste erosivo desde instante en que las pacientes comenzaron a perder masa ósea en la articulación de cadera hasta al grado de avance la condición patológica se ve reflejada por el volumen perdido y la tasa

de desgaste. En esta gráfica, se presenta la relación de la tasa de desgaste en función del tiempo transcurrido del deterioro de la superficie evaluada de acuerdo a los datos de z-score por densitometría [18]. La relación calculada posee un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.0138$, implicando un coeficiente de correlación de Pearson débil ($r = 0.1174$). Por lo tanto, se puede apreciar la pérdida gradual de material óseo en la interface de los componentes de articulaciones de caderas en contacto, que al pasar el tiempo avanza el fenómeno de desgaste [19], [20]. En consecuencia, se observa el desgaste poco pronunciado en las pacientes con inicio de la pérdida de masa en los tejidos. Luego, se ve con notable efecto el desgaste de las pacientes que están en la condición de osteopenia y por otro lado, algunas pacientes tienen la tasa de desgaste erosiva mucho más alta; lo que indica la condición de osteoporosis.

En el estudio tribológico de las pacientes, es interesante estudiar más allá de la integridad de masa ósea en la articulación de cadera, la resistencia que presenta la zona del cuello del fémur y se puede ver en la figura 2. En la grafica se observa el modelo que relaciona la resistencia de las caderas con el tiempo en que ocurrió el desgaste. Este modelo tiene un coeficiente de $R^2 = 0.0065$, que equivale a una correlación de Pearson de $r = 0.0806$, la cual es una correlación débil [21].

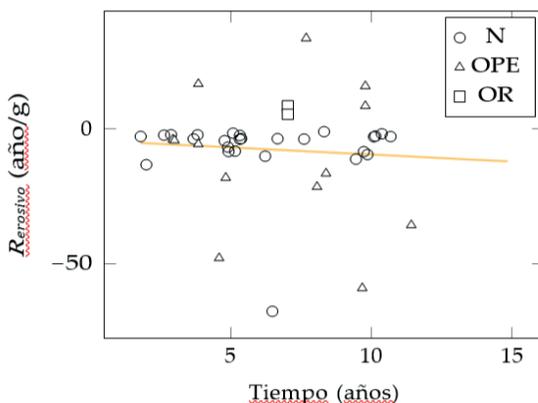


Figura 2. Resistencia al desgaste erosivo ($f(x) = -0.5264x - 4.1205$; $R^2 = 0.0065$) en pacientes: Condición N médica normal, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

En la figura 2, se puede ver la resistencia que ofrecen los huesos de caderas ante la pérdida gradual de material óseo en las zonas evaluadas y se puede ver que al pasar el tiempo disminuye la resistencia y la integridad conforme avanza el desgaste por descalcificación [20], [21].

A partir de los modelos matemáticos de regresión lineal determinados para la tasa de erosión y para la resistencia al desgaste erosivo de la superficie del cuello del fémur

de cada paciente, se puede decir que el coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de las variables explicadas por la regresión. En el caso de este tipo de desgaste, el coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de los modelos a las variables que se han explicado en figura 1 y figura 2.

Al evaluar la resistencia de las caderas de las pacientes, se estudia el comportamiento probabilístico por medio de un modelo de distribución Gaussiana, el cual se muestra en la figura 3.

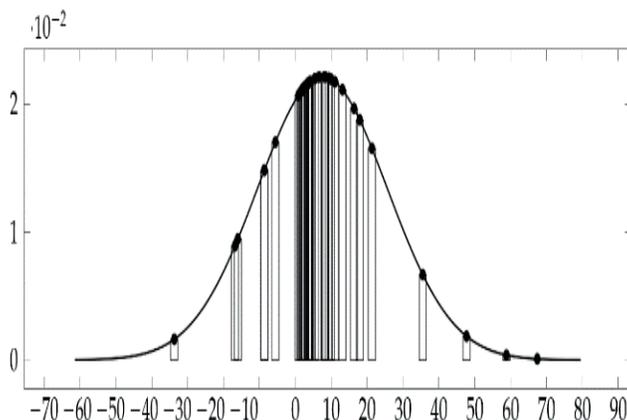


Figura 3. Distribución de la resistencia al desgaste erosivo en todas las pacientes en condición N médica normal de descalcificación ósea, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

La figura 3 muestra la distribución de la resistencia al desgaste erosivo en las pacientes en la diferente etapas progresiva de la descalcificación ósea, es decir, descalcificación en condición normal, osteopenia y osteoporosis; en detalle, tiene una media de 7.5269 (año/g), con coeficiente de asimetría relativamente de 1.4757 (> 1) implicando que existe una concentración de las pacientes con más resistencia hacia la parte derecha de la distribución y una curtosis de 4.08901 (> 3) indicando una distribución leptocúrtica, más apuntada y con extremos anchos que una distribución normal, que evalúa la condiciones de las pacientes ante la presencia de las enfermedades; por ende, esta problemática refleja una preocupación en la Republica Dominicana [20], [22], [23].

3.3 Resultados del Análisis del desgaste adhesivo por deslizamiento en las articulaciones coxofemorales

En el caso de la cuantificación del desgaste adhesivo estudiado en la zona de la cabeza del fémur, se tienen resultados del fenómeno de desgaste por efecto de la descalcificación y al mismo tiempo por la acción de deslizamiento en la zona de contacto de los elementos que componen las articulaciones de cadera de las pacientes [20], [21].

Las variables tribológicas correspondientes al desgaste adhesivo de las articulaciones

de caderas implican evaluar la región global de las articulaciones de cadera [21], por lo que se determinó la densidad del mineral ósea en la región global de la cadera tal como se muestra en tabla 4.

Paciente	t-score	z-score	AG (cm ²)	TOBMC (g)	TOBMC_0 (g)	T OBMC _{perd} (g)
P2BM	-0.90	1.70	33.80	33.56	25.12	-8.45
P3CM	2.00	0.30	33.02	33.31	31.93	-1.38
P4CR	-0.70	0.70	25.14	25.11	22.53	-2.59
P5CG	-0.70	-1.00	28.14	20.51	24.42	3.91
P6DLO	-0.70	-1.10	33.25	30.94	35.80	4.86
P7DLSM	-0.70	-0.10	25.93	25.11	25.46	0.34
P8DLM	-0.70	0.80	31.36	29.85	26.36	-3.49
P9DD	-0.70	-0.20	25.32	20.78	21.41	0.63
P12FC	0.80	1.70	28.43	29.62	22.91	-6.72
P13FA	0.80	-0.20	27.74	28.17	28.91	0.74
P15GS	1.90	2.70	39.11	33.52	18.84	-14.68
P16LRA	3.30	6.10	34.67	34.50	3.41	-31.09
P17MM	0.40	0.80	29.90	30.31	26.98	-3.32
P20SS	0.70	1.80	31.10	37.64	29.86	-7.78
P21VL	4.50	5.30	38.25	34.91	7.95	-26.96
P24AY	-1.00	-0.10	29.86	27.26	27.67	0.42
P25AMY	1.50	2.90	32.47	42.32	30.55	-11.77
P27AH	-0.60	0.20	30.28	25.77	24.97	-0.81
P28AO	1.70	3.40	32.68	30.43	14.10	-16.33
P29AL	-0.90	-0.30	29.97	25.86	26.98	1.12
P32ADR	-0.70	0.60	30.18	29.67	27.41	-2.26
P33AK	0.90	1.00	31.84	34.89	31.26	-3.63
P38AAJ	0.50	1.50	31.43	32.84	26.29	-6.55
P39AR	2.00	3.20	32.99	28.11	14.91	-13.20
P40AS	0.40	0.40	31.32	32.82	31.39	-1.43
P41ALS	-0.70	0.50	77.56	29.79	27.57	-0.08

TOBMC: Contenido mineral óseo en la región global de la cadera; TOBMD: Densidad mineral ósea en la región global de la cadera. Medidas de BMD en (g/cm²). Condición médica normal (t – score ≥ -1).

Tabla 4. Datos de densitometría de la región global de las articulaciones de caderas de pacientes en condición médica normal de descalcificación.

La tabla 4 contiene los datos del contenido de mineral y densidad ósea, entre otros resultados obtenido del análisis de densitometría y a partir de los cuales se determinó el desgaste adhesivo por deslizamiento en la cabeza del fémur en relación al acetábulo en las

pacientes con condición médica normal en presencia de decalcificación de su masa ósea.

A partir de los métodos tribológicos para determinar el desgaste presente en las articulaciones de cadera, se calcularon los parámetros de desgaste, tales como la pérdida de contenido mineral óseo en la región global de la articulación de cadera (M_{perd}), la tasa de desgaste adhesivo por deslizamiento (W_{adh}), la resistencia al desgaste adhesivo (R_{adh}) y el esfuerzo producto de la fricción (σ_t), los cuales se presentan en la tabla 5, [12], [21].

Paciente	t (z - s)	M_{perd} (g/año)	W_{adh} (cm ² /N)	R_{adh} (N/cm ²)	σ_t (Pa)
P2BM	3.834	-2.203	-4.46E-13	-2.24E+12	1.86E+05
P3CM	3.687	-0.374	-6.52E-14	-1.53E+13	1.64E+05
P4CR	4.793	-0.540	-8.95E-14	-1.12E+13	1.76E+05
P5CG	2.005	1.950	5.80E-13	1.73E+12	1.76E+05
P6DLO	6.475	0.751	1.34E-13	7.48E+12	1.76E+05
P7DLSM	5.158	0.067	1.40E-14	7.15E+13	1.76E+05
P8DLM	5.326	-0.655	-1.17E-13	-8.52E+12	1.76E+05
P9DD	4.934	0.128	2.75E-14	3.64E+13	1.76E+05
P12FC	2.887	-2.327	-4.40E-13	-2.27E+12	1.65E+05
P13FA	4.914	0.150	2.60E-14	3.84E+13	1.72E+05
P15GS	10.092	-1.454	-2.17E-13	-4.60E+12	1.91E+05
P16LRA	10.372	-2.997	-4.99E-13	-2.00E+12	1.75E+05
P17MM	9.452	-0.352	-6.11E-14	-1.64E+13	1.72E+05
P20SS	6.668	-1.167	-1.34E-13	-7.44E+12	1.86E+05
P21VL	8.318	-3.242	-7.69E-13	-1.30E+12	1.60E+05
P24AY	1.806	0.230	3.55E-14	2.82E+13	1.85E+05
P25AMY	5.090	-2.312	-3.08E-13	-3.24E+12	1.72E+05
P27AH	9.859	-0.082	-2.08E-14	-4.81E+13	1.60E+05
P28AO	10.680	-1.529	-2.66E-13	-3.76E+12	1.77E+05
P29AL	6.234	0.180	2.88E-14	3.47E+13	1.86E+05
P32ADR	2.639	-0.858	-1.53E-13	-6.52E+12	1.72E+05
P33AK	7.606	-0.477	-9.81E-14	-1.02E+13	1.58E+05
P38AAJ	5.326	-1.230	-2.07E-13	-4.83E+12	1.72E+05
P39AR	10.142	-1.301	-3.09E-13	-3.23E+12	1.64E+05
P40AS	5.380	-0.265	-5.10E-14	-1.96E+13	1.64E+05
P41ALS	9.726	-0.228	-3.80E-14	-2.63E+13	1.76E+05

Tabla 5. Datos de pérdida de masa, tasa de desgaste (W_{adh}), resistencia al desgaste adhesivo (R_{adh}) y el esfuerzo a la fricción (σ_t) en la región global de las articulaciones de caderas condición normal.

En la tabla 5, se observa que las pacientes presentan descalcificación de los tejidos en diferencias grados. Las articulaciones de cadera presentan un desgaste adhesivo proporcionar en su variable de masa ósea con respecto a los datos de densitometría.

Las pacientes que presentan menos pérdida de masa tienen mayor resistencia física en sus tejidos, pero en todas las pacientes la cantidad de masa perdida está dentro de un margen normal sin alcanzar el grado de la patología de osteopenia. En el caso de osteopenia y osteoporosis, la tabla 6 contiene los resultados del análisis de densitometría ósea.

Paciente	t-score	z-score	AG (cm ²)	TOBMC (g)	TOBMC_0 (g)	T OBMC _{perd} (g)
P1BE	-1.30	0.20	29.95	25.31	24.57	-0.75
P10EA	-1.50	-0.20	31.95	25.06	25.86	0.80
P11FI	-1.50	-0.60	25.90	21.03	23.19	2.16
P14GA	-1.50	-1.40	31.91	27.94	33.88	5.94
P18PC	-2.20	-0.50	30.11	24.21	26.09	1.88
P19PC	-1.30	-0.30	29.19	27.01	28.23	1.22
P22ZR	-2.40	-0.70	29.08	19.77	22.31	2.54
P23AL	-1.40	-0.60	29.45	25.38	27.73	2.35
P26AC	-2.20	-0.60	28.61	21.30	23.45	2.15
P30AH	-1.50	0.40	29.34	20.78	19.05	-1.73
P31AH	-2.30	-0.40	28.51	18.29	19.97	1.68
P36AJ	-1.90	-1.60	28.93	19.32	25.76	6.43
P37AJ	-2.40	-2.10	28.41	17.84	26.13	8.29
P34AK	-2.70	-1.42	28.09	16.37	22.25	5.87
P35AK	-3.10	-1.47	27.68	16.48	22.45	5.97

Tabla 6 Datos de densitometría de la región global de las articulaciones de caderas de pacientes con osteopenia y osteoporosis (últimos dos).

La Tabla 7 muestra los datos del desgaste adhesivo por deslizamiento en los pacientes que resultaron con pérdidas de contenido mineral óseo. Para el cálculo del desgaste adhesivo se consideró la carga se soporta la cabeza del fémur y la velocidad promedio de deslizamiento que experimenta una persona [24].

Paciente	t (z - s)	M_{perd} (g/año)	W_{adh} (cm ² /N)	R_{adh} (N/cm ²)	σ_t (Pa)
P10EA	3.006	0.266	5.96E-14	1.68E+13	1.72E+05
P11FI	8.067	0.268	6.63E-14	1.51E+13	1.64E+05
P14GA	14.834	0.401	7.58E-14	1.32E+13	1.75E+05
P18PC	8.389	0.224	5.42E-14	1.85E+13	1.66E+05
P19PC	4.587	0.265	5.05E-14	1.98E+13	1.72E+05
P22ZR	11.414	0.223	6.64E-14	1.51E+13	1.64E+05
P23AL	9.667	0.243	4.75E-14	2.10E+13	1.74E+05
P26AC	7.677	0.280	7.39E-14	1.35E+13	1.65E+05
P30AH	3.845	-0.449	-1.40E-13	-7.12E+12	1.59E+05
P31AH	3.845	0.436	1.51E-13	6.64E+12	1.59E+05
P36AJ	9.775	0.658	1.73E-13	5.77E+12	1.72E+05
P37AJ	9.775	0.848	2.38E-13	4.21E+12	1.72E+05
P34AK	7.035	0.835	1.88E-13	5.33E+12	1.90E+05
P35AK	7.035	0.849	1.87E-13	5.36E+12	1.90E+05

Tabla 7. Datos del desgaste adhesivo en pacientes mujeres con osteopenia y osteoporosis (ultimos dos).

En la figura 4 se presenta la tasa de desgaste adhesivo por deslizamiento de todos las pacientes en función del tiempo expresado en un modelo de matemático [23]. En la gráfica se observa una relación con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.0045$, lo cual indica que estas variables no están fuertemente correlacionadas.

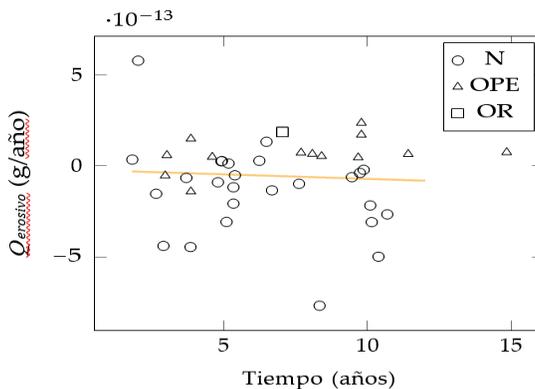


Figura 4. Tasa de desgaste adhesivo por deslizamiento ($f(x) = -5 \times 10^{-15}x - 2 \times 10^{-14}$; $R^2 = 0.0045$). N: Condición médica normal, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

Las pacientes con determinada condición médica pueden mantener su estado de patología; la figura 4 indica que el tiempo es un factor influyente en el efecto de la enfermedad y el cambio de patología conforme se desgasta el tejido oseo, y se incrementa mientras

transcurre el tiempo por la acción conjunta de la descalcificación y el deslizamiento de los elementos de las articulaciones de caderas [22].

El efecto del fenómeno del desgaste adhesivo en las articulaciones de caderas se ha cuantificado mediante la tasa de desgaste midiendo la cantidad de masa perdida [12], [13]. Sin embargo, la resistencia al desgaste es un indicador de la integridad física de la región global de las articulaciones. La resistencia al desgaste adhesivo por deslizamiento en función del tiempo de la enfermedad para todos los pacientes se muestra en la figura 5, se puede apreciar el modelo de ecuación que expresa una relación con un coeficiente de determinación es de $R^2 = 0.0127$, indicando que las variables no están fuertemente correlacionadas.

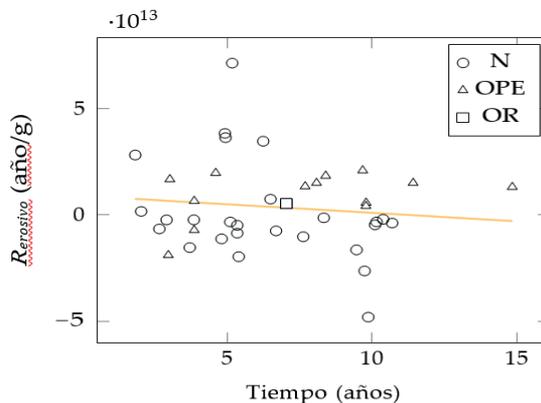


Figura 5. Resistencia al desgaste adhesivo por deslizamiento ($f(x) = -8 \times 1011x + 9 \times 1012$; $R^2 = 0.0127$) en pacientes analizados. N: Condición médica normal, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

A partir de los modelos matemáticos de regresión lineal determinados para la tasa de desgaste adhesivo y para la resistencia ante el desgaste adhesivo de la superficie del cuello del fémur de cada paciente, los cuales se muestran en las figuras 4 y 5, se puede decir que el coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de las variables explicadas por la regresión. Asimismo, el caso de este tipo de desgaste, el coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de los modelos a las variables que se han explicado (Figura 4 y Figura 5).

Por otro lado, la figura 6. muestra la distribución de la resistencia al desgaste adhesivo en todas las pacientes con una media de $3.79385E + 12$ (N/cm²), un coeficiente de asimetría de 0.710122 (entre 1 y 1) indicando una distribución moderadamente inclinada hacia la derecha y una curtosis de 2.54094 (< 3) indicando una distribución platicúrtica, es decir, con un pico más bajo y amplio con extremos más cortos que una distribución simétrica [23].

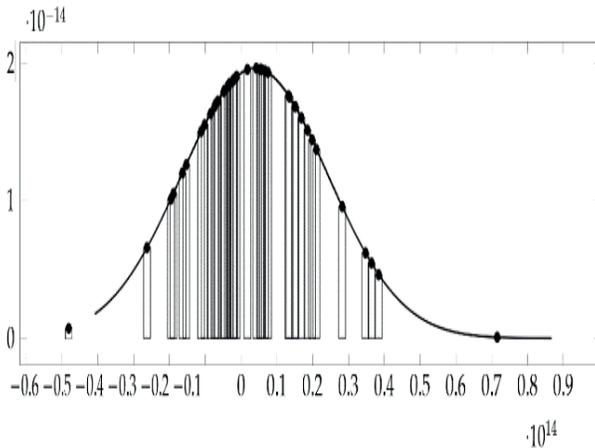


Figura 6. Distribución de probabilidad para la resistencia al desgaste adhesivo por deslizamiento en todos las paciente.

4 | CONCLUSIONES

Se evaluó la pérdida de masa ósea y el comportamiento mecánico de las articulaciones coxofemorales de pacientes mujeres afectadas por enfermedades con descalcificación de los huesos, en condición patológica de normal, osteopenia y osteoporosis empleando métodos de imágenes médicas y tribológicos.

Se utilizaron los resultados de densitometría ósea de articulaciones coxofemorales lado izquierdo correspondiente 41 pacientes mujeres. Las mujeres tienen desde 25 a 80 años de edad. Por ende, se obtuvieron el contenido mineral óseo (BMC), la densidad mineral ósea (BMD), el t-score y el z-score que se utilizaron para determinar la tasa y la resistencia al desgaste por erosión y desgaste adhesivo en las articulaciones de cadera las mujeres.

Se analizó el desgaste de la zona del cuello del fémur izquierdo de las pacientes y se determinó una tasa que caracteriza la erosión por descalcificación en 1.14818g/año y tiene una distribución asimétrica con concentración moderada en el extremo izquierdo.

En el caso del análisis del desgaste adhesivo por deslizamiento, resultó una tasa de desgaste con un valor promedio de $-5.38614 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{N}$, mostrando una relación directa que muestra el aumento del desgaste conforme pasa el tiempo de la enfermedad de las pacientes y presenta un modelo matemático con un coeficiente de correlación igual a 0.6639 con $p - \text{value} = 0.009612 (< 0.05)$, utilizando como referencia el tiempo basado en el z-score del paciente.

El coeficiente de determinación obtenido tanto para las tasas y resistencias al desgaste erosivo como para las tasas y resistencias al desgaste adhesivo de las pacientes son la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión, en este caso ya sea la tasa o resistencia del desgaste erosivo o del desgaste adhesivo de las pacientes.

Igualmente, el coeficiente refleja la bondad del ajuste de los modelos a las variables tribológicas.

La data del análisis de densitometría ósea es muy importante, puesto que evita un ensayo físico de desgaste y es un parámetro para calcular y evaluar los daños por erosión y adhesión de las articulaciones de caderas.

La tasa de desgaste adhesiva determinada cuantifica la transferencia de masa ósea de la superficie de la parte del fémur mientras se desliza haciendo contacto en el acetábulo en la articulación de las caderas de las pacientes que han adquirido osteopenia o ya sea osteoporosis, o que están en condición normal con la presencia de descalcificación de sus huesos cuando ellas caminan o ejercen movimiento, siendo esta tasa mayor en esta última condición patológica.

A partir de los estudios tribológicos realizados se puede decir que el desgaste en la región global de las caderas donde hace contacto la cabeza del fémur es mayor que en las superficies que no están en contacto como el cuello del fémur; por lo tanto, tasa de desgaste adhesivo es mayor la tasa de erosión en las articulaciones de caderas.

La descalcificación elimina gradualmente el material de la superficie de la articulación de cadera originándole grietas y ocasiona osteopenia hasta llegar a osteoporosis en muchos pacientes. El desgaste un indicador de la existencia de estas enfermedades por descalcificación y depende de varios factores, tales como la edad, alcoholismo, sobrepeso, menopausia entre otras causas.

Por último, del análisis estadístico se obtuvo una distribución asimétrica de resultados de la resistencia mostrando concentración en el extremo izquierdo de la curva para el desgaste erosivo y una distribución asimétrica con concentración en el extremo derecho para la resistencia al desgaste erosivo.

REFERENCIAS

[1] Ammann, P. y R. Rizzoli (mar. de 2003). «**Bone strength and its determinants**». En: Osteoporosis International 14, págs. 13-18. doi: 10.1007/s00198-002-1345-4

[2] González, Luis Alonso, Gloria María Vásquez y José Fernando Molina (mar. de 2009). «**Epidemiología de la osteoporosis**». En: Revista Colombiana de Reumatología 16, págs. 61-75. doi: 10.1016/s0121-8123(09)70119-7.

[3] Athanasiou, K. A. y col. (ago. de 2000). «**Fundamentals of biomechanics in tissue engineering of bone**». En: Tissue Engineering 6.4, págs. 361-381. issn: 1076-3279. doi: 10.1089/107632700418083.

[4] Gulsen, Akdogan, Goncu Merve y Parlak Meltem (ene. de 2018). «**Biotribology of Cartilage Wear in Knee and Hip Joints Review of Recent Developments**». En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 295, pág. 012040. doi: 10.1088/1757-899x/295/1/012040.

[5] Cereatti, A. y col. (feb. de 2010). «*Is the human acetabulofemoral joint spherical?*» En: *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume 92-B*, págs. 311-314. doi: 10.1302/0301-620x.92b2.22625.

[6] Caeiro Rey, J. R. y col. (ago. de 2005). «Factores determinantes de la resistencia ósea». En: *Revista Española de Enfermedades Metabólicas Óseas* 14, págs. 67-74. doi: 10.1016/S1132-8460(05)72686-6.

[7] Haba, Yvonne y col. (2012). «Relationship Between Mechanical Properties and Bone Mineral Density of Human Femoral Bone Retrieved from Patients with Osteoarthritis». En: *The Open Orthopaedics Journal* 6. url: <https://dx.doi.org/10.2174%5C%2F1874325001206010458>.

[8] Gant, A.J., M.G. Gee y B. Roebuck (ene. de 2005). «Rotating wheel abrasion of WC/Co hardmetals». En: *Wear* 258, págs. 178-188. doi: 10.1016/j.wear.2004.09.028. (Visitado 06-01-2021).

[9] Gulsen, Akdogan, Goncu Merve y Parlak Meltem (ene. de 2018). «**Biotribology of Cartilage Wear in Knee and Hip Joints Review of Recent Developments**». En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 295, pág. 012040. doi: 10.1088/1757-899x/295/1/012040.

[10] **Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets** (2018). En: ASTM. doi: 10.1520/g0076-18.

[11] **Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test** (2017). En: ASTM. doi: 10.1520/g0077-17.

[12] **Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus** (2017). En: ASTM. doi: 10.1520/g0099.

[13] Edith Miranda, V. y col. (ene. de 2013). «**Densitometría ósea**». En: *Revista Médica Clínica Las Condes* 24, págs. 169-173. doi: 10.1016/S0716-8640(13)70142-1.

[14] Sheu, Angela y Terry Diamond (s.f.). «**Diagnostic tests: Bone mineral density**: Testing for osteoporosis». En: *Australian Prescriber* 39, págs. 35-39. doi: 10.18773/austprescr.2016.020.

[15] Menezes, Pradeep L y col. (2013). **Tribology for Scientists and Engineers**. New York, Ny Springer New York.

[16] Straffelini, Giovanni (2015). **Friction and Wear**. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-05894-8.

[17] Liu, J. y col. (abr. de 2019). «**State of the art in osteoporosis risk assessment and treatment**». En: *Journal of Endocrinological Investigation* 42, págs. 1149-1164. doi: 10.1007/s40618-019-01041-6.

[18] Looker, A. C. y col. (ago. de 1998). «Updated Data on Proximal Femur Bone Mineral Levels of US Adults». En: *Osteoporosis International* 8, págs. 468-490. doi: 10.1007/s001980050093.

[19] Majumdar, S. y col. (dic. de 1994). «**Analysis of trabecular bone structure in the distal radius using high-resolution MRI**». En: *European Radiology* 4. doi: 10.1007/bf00226822. (Visitado 05-05-2021).

[20] Osterhoff, Georg y col. (jun. de 2016). «**Bone mechanical properties and changes with osteoporosis**». En: *Injury* 47, S11-S20. doi: 10.1016/s0020-1383(16)47003-8.

[21] Oungoulian, Sevan R. y col. (jul. de 2015). «**Wear and damage of articular cartilage with friction against orthopedic implant materials**». En: *Journal of Biomechanics* 48, págs. 1957-1964. doi: 10.1016/j.jbiomech.2015.04.008.

[22] Ring, David y Jesse B. Jupiter (dic. de 2004). «**Treatment of osteoporotic distal radius fractures**». En: *Osteoporosis International* 16, S80-S84. doi: 10.1007/s00198-004-1808-x.

[23] Mendenhall, William., Wackerly, **Dennos D. y Scheaffer, Richard L. (1994). Estadística Matemática con Aplicaciones**. México, 2da. ed., Grupo Editorial.

[24] Layton, Robin, Todd Stewart y Neil Messenger (2020). **Understanding Movement and its Influence on Tribology of the Human Hip**. url: https://theses.whiterose.ac.uk/26885/1/Layton_Thesis_2020.pdf.