

# Desarrollo de una metodología para la fabricación de injertos compuestos de polvo de hueso y un biopolímero

Sandra Quevedo-B.\*, Fabio A. Rojas-M.\*\*,  
Argemiro Michael Sanabria\*\*\*

---

## Resumen

*El propósito de este trabajo es presentar el desarrollo de una metodología para producir implantes a partir de materiales compuestos a base de una mezcla de polvo de hueso cortical bovino y ABS (poliacrilonitrilo - butadieno - estireno). La morfología del polvo y sus dimensiones, así como el porcentaje del mismo en la mezcla, fueron establecidos como las variables de diseño del estudio realizado en este primer intento para producir objetos a partir de biomateriales híbridos para ser usados en aplicaciones ortopédicas y odontológicas en el futuro. El módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión y dureza fueron las propiedades mecánicas medidas a los objetos, los cuales fueron hechos por presión y termoformado.*

*Los resultados muestran que las propiedades químicas del polímero usado en la mezcla tiene una gran influencia en las características del implante híbrido a base de hueso cortical bovino; mientras que el porcentaje de polvo de hueso afecta de forma negativa las propiedades mecánicas del implante, la forma del polvo no afecta significativamente el módulo de elasticidad del implante.*

**Palabras claves:** Polvo de hueso cortical, mecanizado, propiedades mecánicas, implantes compuestos.

## Abstract

*The aim of this work is to develop a methodology to obtain implants made of a composite material using cortical bone powder and ABS (polyacrylonitrile - butadiene - styrene)*

Fecha de recepción: 12 de febrero de 2006  
Fecha de aceptación: 14 de julio de 2006

---

\* Ingeniera Mecánica, Universidad de los Andes. [s-queved@uniandes.edu.co](mailto:s-queved@uniandes.edu.co)

\*\* Director Grupo LATEMM (Laboratorio de Técnicas Modernas en Manufactura). Profesor Asociado Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia). [farojas@uniandes.edu.co](mailto:farojas@uniandes.edu.co)

Dirección: Universidad de los Andes. Carrera 1 N° 18A 10, A.A. 4976, Bogotá (Colombia).

\*\*\* Ingeniero Químico, aspirante a M. Sc. en Ciencias Biomédicas. Asistente de investigación Grupo LATEMM, Universidad de los Andes. [m-sanabr@uniandes.edu.co](mailto:m-sanabr@uniandes.edu.co)

*mix. As design variables, cortical bone powder morphology and its percentage in mix were evaluated in this first approach to produce composite biomaterials blocks for orthopaedic and dentistry applications in the future. Mechanical properties as compressive strength and the modulus of elasticity were measured in the composite. Blocks was produced by thermoforming and pressing. Our findings showed, that the chemical features of the polymers used in the mix are so important to obtain composite implants of cortical bone powder; while the quantity of bone powder has a negative effect in the mechanical properties of the blocks, the shape of the powder particles has no influence in the modulus of elasticity.*

**Key words:** Cortical Bone, Machining, Composite Implants, biomaterials.

---

## INTRODUCCIÓN

El uso de materiales en polvo para rellenos óseos se ha extendido desde su uso en estomatología hasta el tratamiento de defectos óseos en las extremidades o en la pelvis ocasionados por el tratamiento de tumores benignos por curetaje [1]. En el caso específico de polvo de hueso, se ha empleado polvo de hueso esponjoso heterólogo liofilizado, el cual se encuentra en el mercado en viales y debe ser reconstituido con agua destilada estéril para su uso en el tratamiento de tumores de células gigantes multinucleadas, respecto a lo cual se han encontrado resultados promisorios [2]. Sin embargo, algunos estudios muestran que el uso de polvo de hueso esponjoso liofilizado presenta mejores resultados [3]. En ambos casos y en el tratamiento de fracturas de huesos largos se utilizó polvo de hueso o viruta ósea cortical de 1 mm de diámetro proveniente de fémur, tibia o radio, producida por métodos de fresado [4].

Sin embargo, el uso de polvo de hueso conlleva dificultades en la incorporación en el tejido, lo que genera riesgos quirúrgicos y complejidad en la técnica, representando así restricciones en sus posibles aplicaciones [5]. Además, hay poca información sobre el efecto de la forma del polvo en la regeneración ósea; se ha estudiado el efecto de formas arbitrarias de polvo de hueso en defectos mandibulares, sin establecer aún el impacto que tiene [6].

Rojas [7] en un primer paso desarrollo una técnica por mecanizado para la obtención de diferentes formas de polvo de hueso cortical humano liofilizado. Aprovechando esta tecnología, se evaluó el polvo en una mezcla con el fin de generar implantes ortopédicos híbridos a partir de material biológico (polvo de hueso) y biopolímeros. Dadas las características de biocompatibilidad y biodegradabilidad que deben tener los biopolímeros para esta aplicación, las ventajas que ofrecen el ácido poliglicólico (PLGA) y el ácido poliláctico (PLLA)

en la ingeniería de tejidos [8], las propiedades mecánicas de estos compuestos y los resultados obtenidos por Tabima [9] se selecciona un material polimérico de uso industrial con propiedades mecánicas similares a estos compuestos, teniendo en cuenta el objetivo de esta fase de la investigación. De otra parte, el uso de PLGA y PLLA en mezclas con el polvo de hueso por ahora no es apropiada, ya que la polimerización de estos compuestos afecta la integridad química del material óseo, que es esencial en la respuesta biológica que se desea en el implante. Por esta razón se emplea el poliacrilonitrilo-butadieno-estireno ABS, que es un polímero industrial, de fácil consecución y posee las propiedades mecánicas deseadas [10].

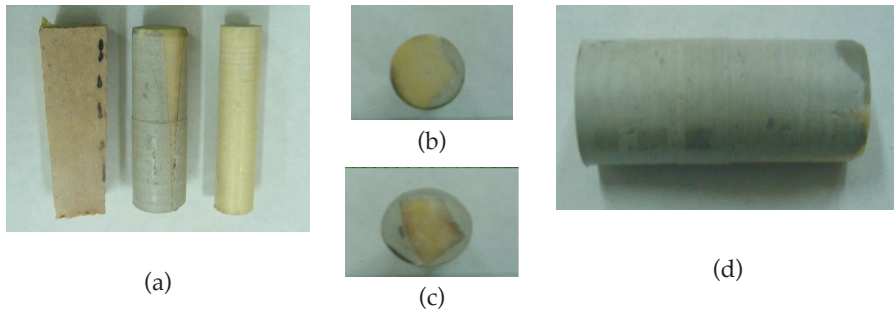
Con este trabajo se pretenden evaluar diferentes formas de polvo obtenidas por la reproducción de técnicas de mecanizado anteriormente desarrolladas, su influencia en la fabricación de objetos rígidos a partir de una mezcla de ABS en diferentes concentraciones y su impacto en las propiedades mecánicas, determinando la influencia de la forma del polvo y el porcentaje del mismo en la dureza del objeto fabricado y el módulo de elasticidad, como un primer acercamiento a la predicción del comportamiento mecánico de objetos producidos por mezclas híbridas de biomateriales para la fabricación de implantes ortopédicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. *Polvo de hueso*

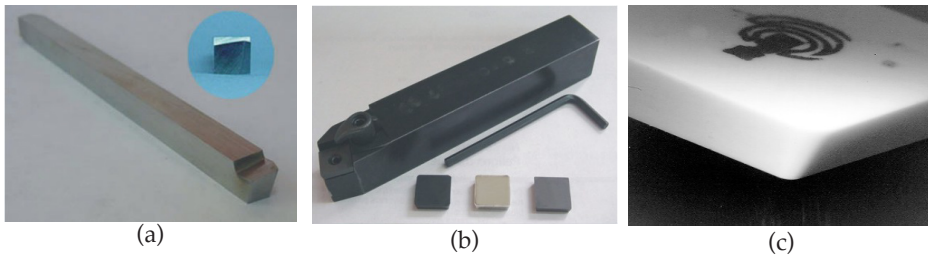
Se mecanizó por torneado hueso cortical femoral bovino, obtenido de frigorífico. Para el mecanizado, el hueso cortical debe ser adecuado para la operación, lo que involucra una limpieza y deshidratación acorde con el proceso. La deshidratación del hueso cortical bovino se realiza en un horno convencional a condiciones controladas de tiempo y temperatura. La temperatura no debe exceder los 150 °C, por un tiempo no mayor a 5 min, para evitar la degradación del material biológico. El control de estas variables es primordial para no cambiar las propiedades mecánicas del hueso cortical bovino durante estas operaciones.

- *Preparación y adecuación de la pieza:* Teniendo en cuenta la irregularidad del mismo, es necesario cortar en segmentos la pieza para luego encapsularlas en resina epóxica; la resina es retirada de la pieza de hueso por desbastado en torno. En la figura 1 se presenta la secuencia de preparación de los cilindros de hueso cortical femoral bovino que se va a utilizar en el proceso de torneado para la obtención de la viruta.



**Figura 1.** (a) Secuencia de preparación de los cilindros de hueso cortical femoral bovino para la obtención de polvo por mecanizado. (b) Vista lateral anterior del cilindro de resina epóxica encapsulando el hueso. (c) Vista lateral posterior del cilindro de resina epóxica encapsulando el hueso. (d) Vista frontal del cilindro de resina epóxica encapsulando el hueso.

- *Condiciones de corte:* El torneado de los cilindros ya preparados se lleva a cabo en un torno convencional, siguiendo la metodología implementada por Rojas [7]; se fijan las condiciones de corte en el proceso de torneado para la obtención del polvo con diferentes morfologías (tabla 1). El número del ensayo corresponde a una codificación interna. Las herramientas de corte empleadas en el torneado se aprecian en la figura 2 de acuerdo con las condiciones fijadas en [7].



**Figura 2.** Herramientas de corte utilizadas en el torneado. (a) Buril de acero rápido. (b) Pastillas de metal duro (c). Pastillas de cerámica alúmina

**Tabla 1**  
 Condiciones de corte en el torneado de cilindros de  
 hueso cortical femoral bovino

N° ensayo*	Herramienta	Vs [m/min]	f [mm/Rev]
249	Pastilla cerámica	3.5	0.03
245	Pastilla metal duro con borde de filo de 0.4 mm		
243	Pastilla metal duro con borde de filo de 1.2 mm		
222	Acero rápido 12% Co	30	0.115
91	Acero rápido 12% Co		
84	Acero rápido 12% Co		0.075

\*Codificación interna del proyecto.

- *Morfología del polvo:* En la tabla 2 se describen las características de los polvos producidos de acuerdo con las condiciones de corte ya mencionadas. La evaluación estadística se hizo a partir de una muestra de 30 datos para hallar el ajuste estadístico. En la figura 3 se aprecian las diferentes morfologías de los polvos mencionados.

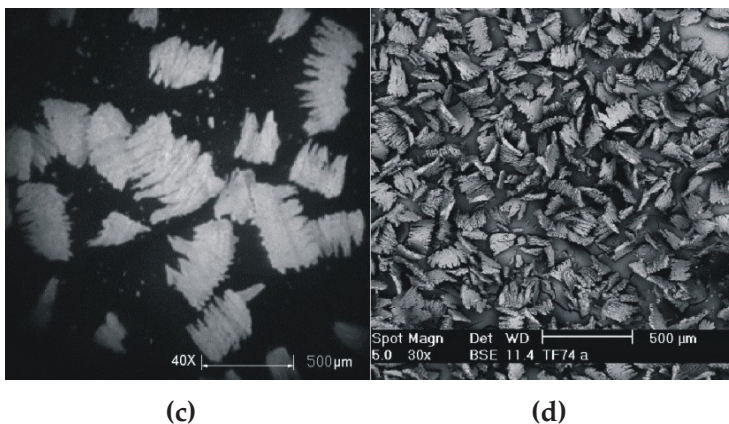
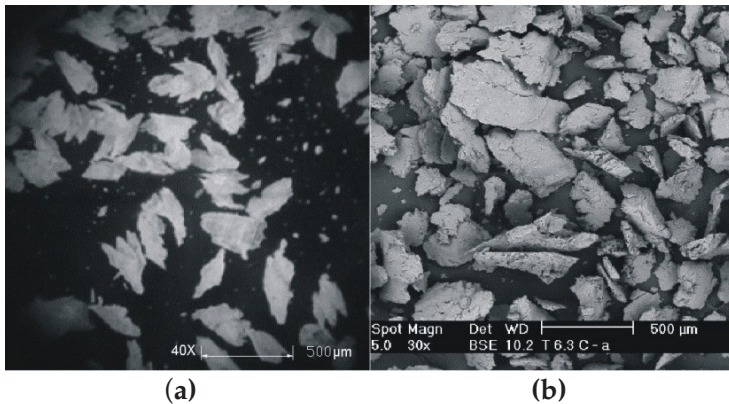
**Tabla 2**  
 Caracterización del polvo empleado en la mezcla polvo de hueso / ABS

N° ensayo	Tipo de polvo (Morfología)	Característica morfológica	Factor de Forma	Valor de factor de forma promedio	Distribución estadística
84	Granular	Volumétricas, alargadas y con extremos agudos	Relación ( $D^- / D^+$ ). Diámetro menor $D^-$ (Círculo inscrito en el grano) – Diámetro mayor $D^+$ (Círculo circunscrito en el grano)	0.49	Beta
91				0.53	Normal
222	Estriado	Forma corrugada en sus extremos	Número de estrías por cada 250 $\mu\text{m}$ de longitud	7.27	Weibull
245				5.50	Weibull

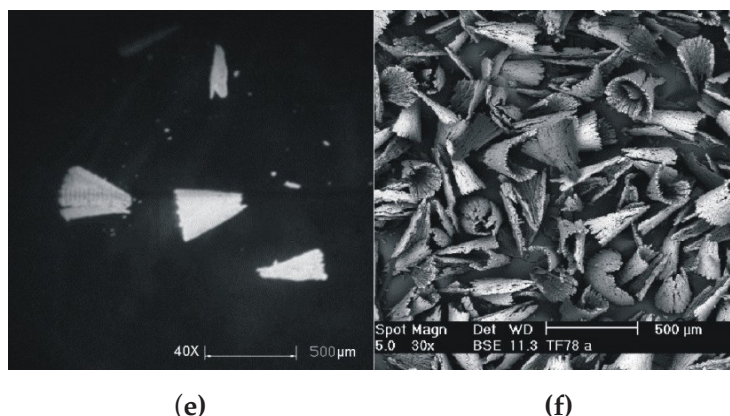
243	Geométrico	La forma se asemeja a un cono o a un cilindro; presentan mayor área superficial	Se determina por medio de la razón del ancho de sus extremos (ancho menor / ancho mayor)	0.53	Erlang
249				0.41	Log normal

## 2. Mezcla

La preparación de la mezcla se realiza con el polvo de hueso y ABS. Para obtener una mezcla homogénea de estos dos compuestos se partió de ABS compacto, el cual se pulverizó con una lima bastarda. Así se pretende obtener una matriz de ABS reforzada de partículas de polvo.







**Figura 3.** Morfología de los polvos de hueso obtenido variando las condiciones de corte.

- (a) Polvo obtenido en el ensayo 91 a partir de hueso bovino deshidratado tipo granular. (b) Polvo de hueso obtenido a las mismas condiciones de mecanizado del ensayo 91 a partir de hueso humano liofilizado [7]. (c) Polvo obtenido en el ensayo 245 a partir de hueso bovino deshidratado, tipo estriado. (d) Polvo de hueso obtenido a las mismas condiciones de mecanizado del ensayo 245 a partir de hueso humano liofilizado [7]. (e) Polvo de hueso obtenido en el ensayo 249 a partir de hueso bovino deshidratado tipo geométrico. (f) Polvo de hueso obtenido a las mismas condiciones de mecanizado del ensayo 249 a partir de hueso humano liofilizado [7].

### 3. Preparación de las probetas

Se prepararon probetas de 7 mm de diámetro por 12 mm de largo. La mezcla de los componentes y la fabricación de las probetas se realizó empleando un compactador, para producir un objeto rígido de características uniformes. Después de compactar la mezcla, ésta es llevada a una mufla a 150 °C para polimerizar el ABS con el polvo de hueso. Este proceso requiere 5 pases de compresión y posterior calentamiento de 5 min.

Con el fin de determinar la influencia del porcentaje de polvo de hueso en la mezcla, se procedió a fabricar probetas con diferentes fracciones en peso de polvo de hueso/ ABS, en tres niveles.

### 4. Determinación de propiedades mecánicas

Las pruebas mecánicas realizadas son las de compresión utilizando una máquina universal de pruebas mecánicas INSTRON y la prueba de dureza utilizando el

microdurómetro para Dureza Shore D marca Instrument Limité. Los ensayos se realizan por triplicado.

### 5. *Diseño experimental*

Se plantea para la evaluación de las propiedades mecánicas de los objetos producidos un diseño factorial matricial de  $6 \times 3$  para dos factores, evaluando las tres morfologías ya mencionadas con variaciones en su factor de forma (tabla 2) y el porcentaje de ABS en la mezcla en tres niveles, bajo, medio y alto, polvo de hueso / ABS respectivamente: El nivel bajo corresponde a un porcentaje de 25/75, el nivel medio a un porcentaje de 50/50 y el nivel alto a un porcentaje de 75/25.

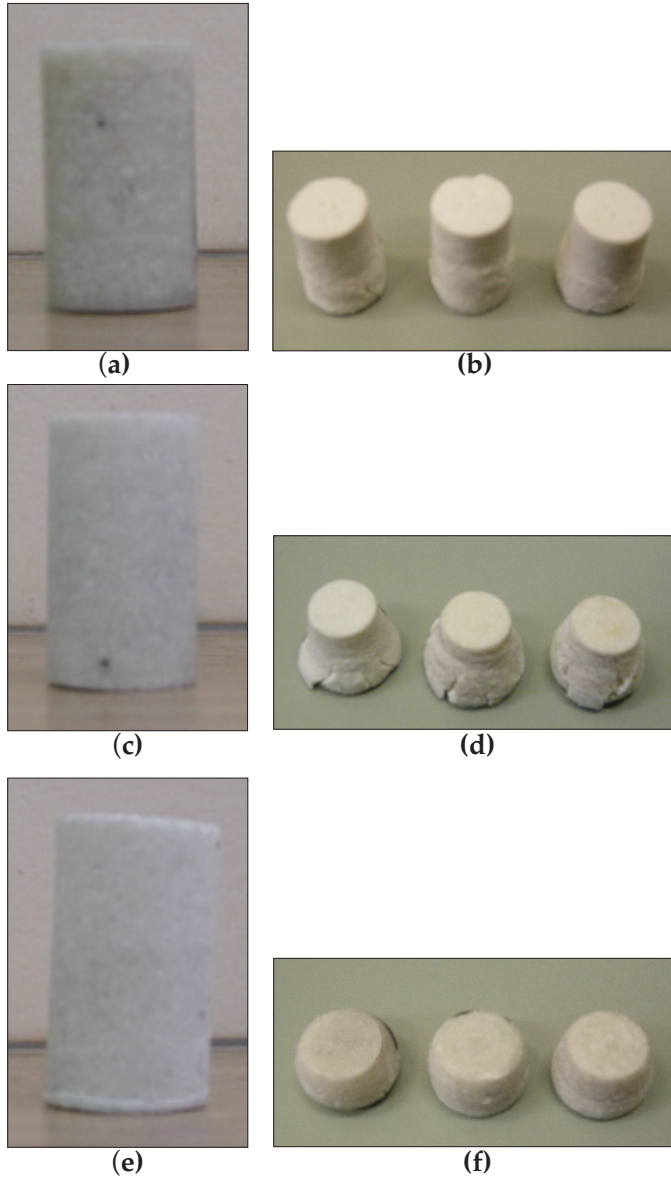
Se plantea un modelo de efectos para la evaluación de estadística del diseño factorial planteado por medio de análisis de varianza del objeto de estudio, determinando el efecto significativo de las variables de diseño por medio de una prueba F para un valor de  $p < 0.05$  y la diferencia estadística de la media poblacional de los tratamientos realizados por medio de una prueba Tukey para una población de 54 datos [11].

## RESULTADOS

### 1. *Análisis Cualitativo*

Al fabricar las probetas variando el porcentaje de polvo de hueso se encuentran diferencias significativas en el color de la probeta, como se observa en la figura 4. Al someter todas las probetas producidas a ensayos de compresión también se observan diferencias significativas en la falla que experimentan al realizar el ensayo. Las probetas de 25/75 polvo de hueso / ABS, respectivamente, presentan una deformación plástica, es decir, la probeta adquiere forma de barril conforme va aumentando la carga; en estas probetas no se evidencia fractura bajo las condiciones de ensayo, el cual se detiene al pasar un tiempo considerable bajo una deformación alta. Figuras 4c y 4f.





**Figura 4.** Probetas producidas variando el porcentaje de la mezcla polvo de hueso/ABS respectivamente: (a) 75/25. (b) Sometidas al ensayo de compresión. (c) 50/50. (d) Sometidas al ensayo de compresión. (e) 25/75. (f) Sometidas al ensayo de compresión

Las probetas producidas con la mezcla de polvo de hueso/ABS de 50/50 presentan una falla de pie de elefante, y se observa una inserción de la parte superior sobre la parte inferior de la probeta, lo que produce un ensanchamiento de esta parte y, por consiguiente, se presentan las grietas y la fractura del objeto en la parte inferior (figura 4d).

Las probetas fabricadas con la mezcla 75/25 polvo de hueso/ABS, respectivamente, presentan falla con mayor rapidez, y aunque se observa el mismo efecto de pie de elefante, las grietas son más pequeñas (figura 4d). Al comparar los resultados obtenidos para las probetas de 50/50 y 75/25 mezcla polvo de hueso/ABS, respectivamente, se observa que aunque la falla en las probetas de 75/25 ocurre a una baja carga de compresión, ésta es progresiva con la carga; la falla en las probetas 50/50 se presenta a una carga de compresión más alta respecto a la anterior, sin embargo, la fractura se evidencia de forma instantánea (figura 4e).

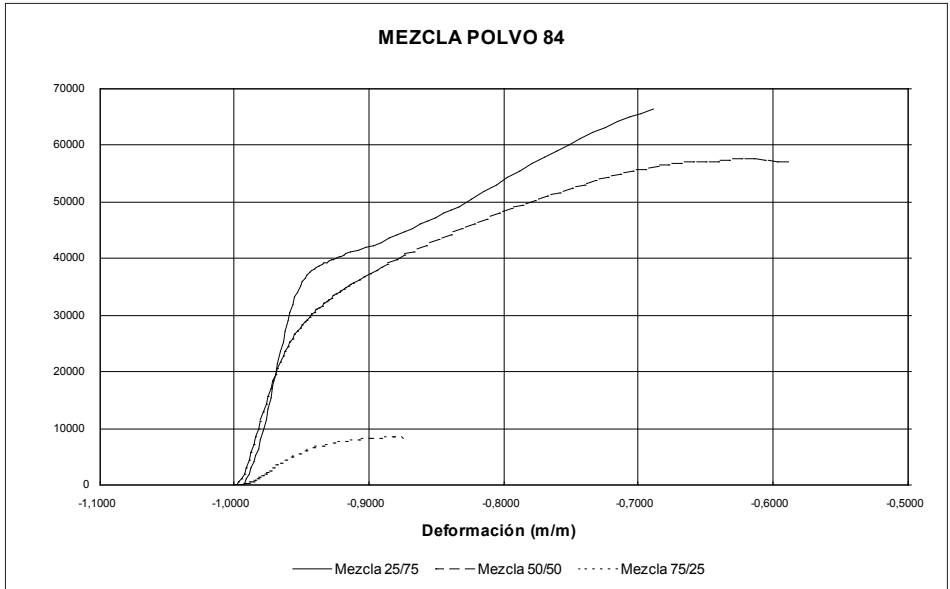
Este comportamiento y la apariencia física de las probetas puede estar siendo ocasionado por una distribución heterogénea en la mezcla dada por las grandes diferencias en las propiedades químicas de los componentes de la mezcla, lo que acarrea la presencia de dos fases en el compuesto.

## 2. Análisis Cuantitativo

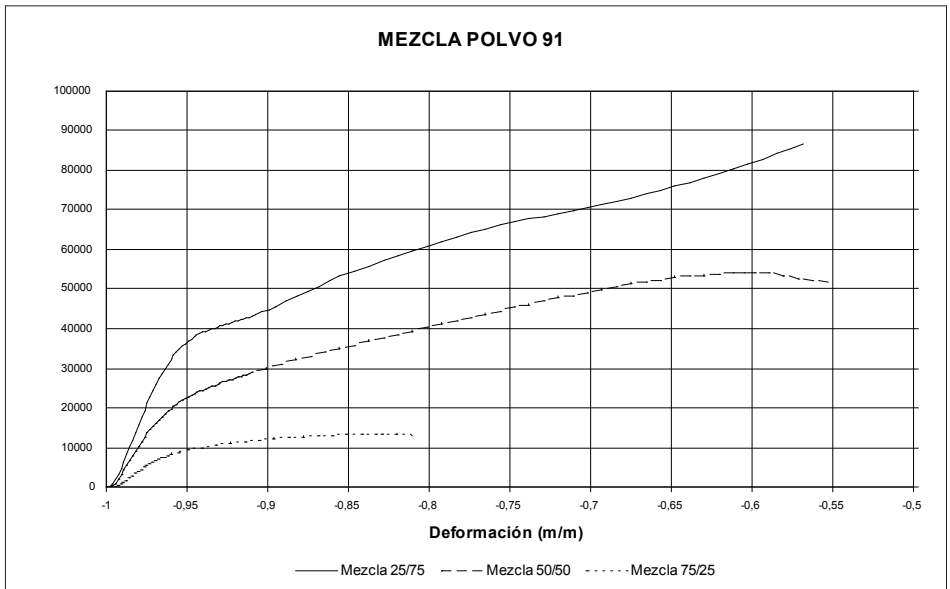
En el gráfico 1 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación ( $s-e$ ) para las probetas fabricadas a partir de las mezclas de polvos de hueso/ABS por morfología y mezcla que se obtuvieron en los ensayos de compresión.

Se puede apreciar en las curvas  $s-e$  cómo el comportamiento en compresión depende del porcentaje de mezcla, y de tendencia análoga para las diferentes morfologías de polvo empleadas, a excepción del polvo 222, donde las curvas obtenidas para la mezcla 50/50 y 75/25 se superponen.

La evaluación estadística del diseño experimental, siguiendo el procedimiento descrito en [11], valida la no significancia de la forma de polvo en el comportamiento del módulo elástico, ni la interacción entre las dos variables estudiadas, y se encontró que la única variable de peso es el porcentaje de polvo en la mezcla base, de acuerdo con el valor de  $F$ . El valor de  $p$  es menor de 0.05 (gráfico 2).

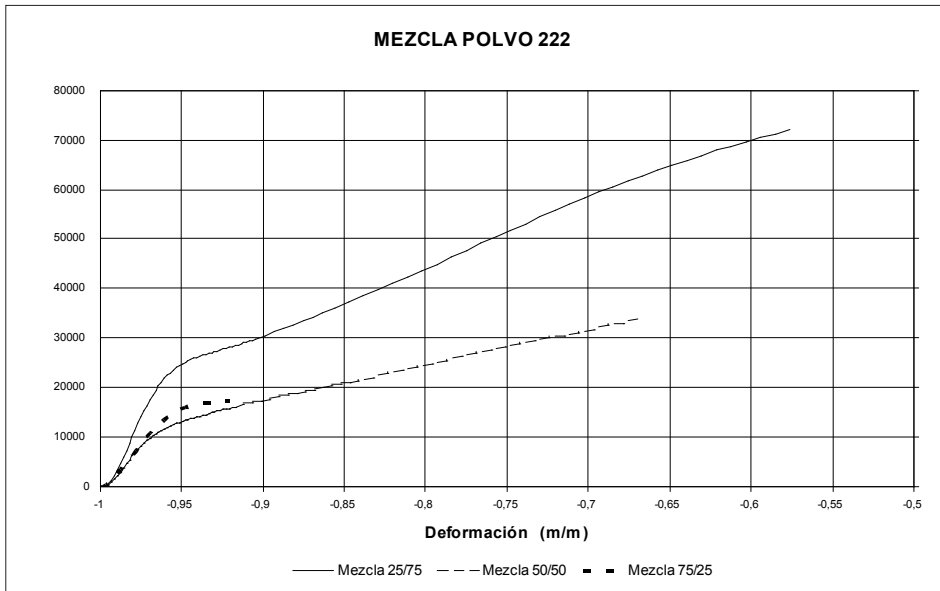


(a)

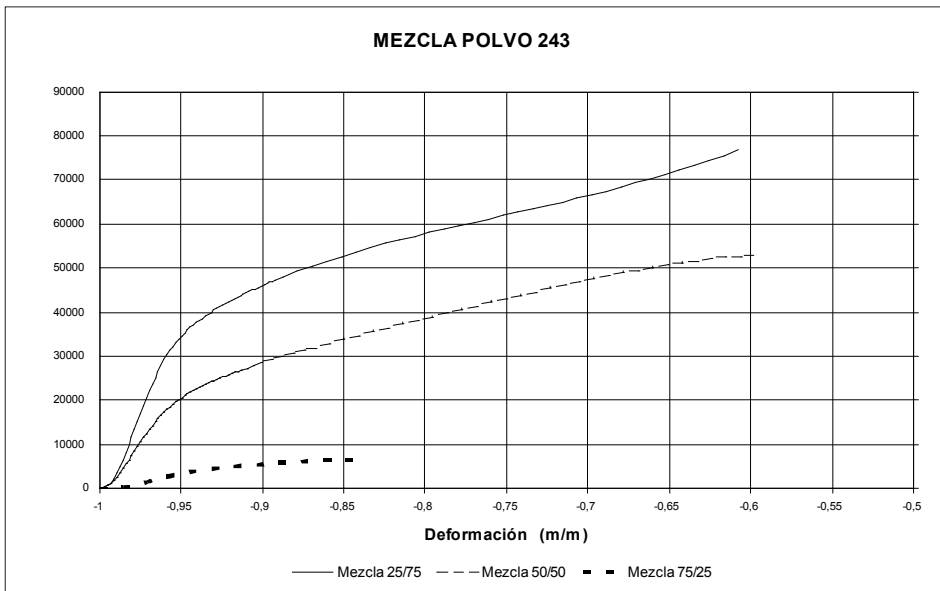


(b)

**Gráfico 1.** Curvas de Esfuerzo deformación de ingeniería (s-e) para los objetos fabricados con mezclas polvo de hueso / ABS a diferentes concentraciones.  
(a) Polvo 84. (b) Polvo 91.

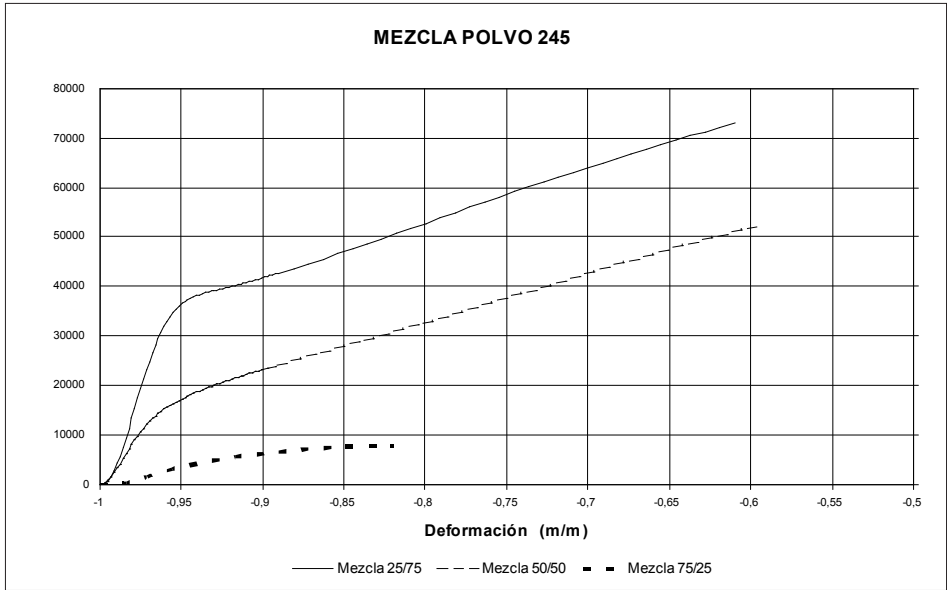


(c)

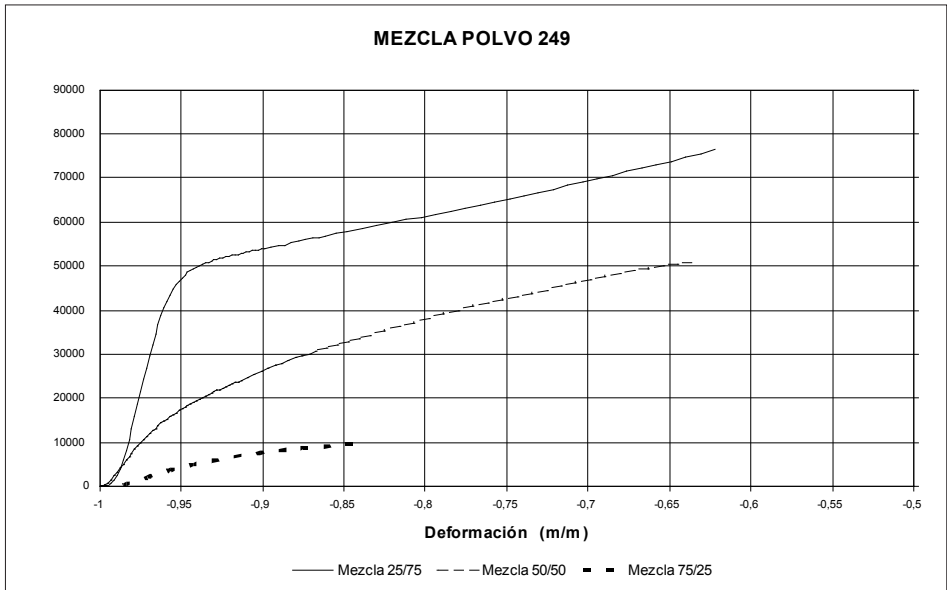


(d)

**Gráfico 1.** Curvas de Esfuerzo deformación de ingeniería (s-e) para los objetos fabricados con mezclas polvo de hueso/ABS a diferentes concentraciones. c) Polvo 222. (d) Polvo 243.



(e)



(f)

**Gráfico 1.** Curvas de Esfuerzo deformación de ingeniería (s-e) para los objetos fabricados con mezclas polvo de hueso / ABS a diferentes concentraciones.  
(e) Polvo 245. (f) Polvo 249.

En lo que se refiere a la dureza, siguiendo el mismo procedimiento estadístico que se empleó para el módulo de elasticidad, se encuentra que el porcentaje de polvo y la forma de polvo son variables de peso significativo para explicar el comportamiento de la dureza de las probetas, mientras que la interacción de estas dos variables no es significativa en el modelo estadístico para la dureza ( $p < 0.05$ ). El resumen de propiedades en forma gráfica se observa en los gráficos 2, 3 y 4.

**Tabla 3**

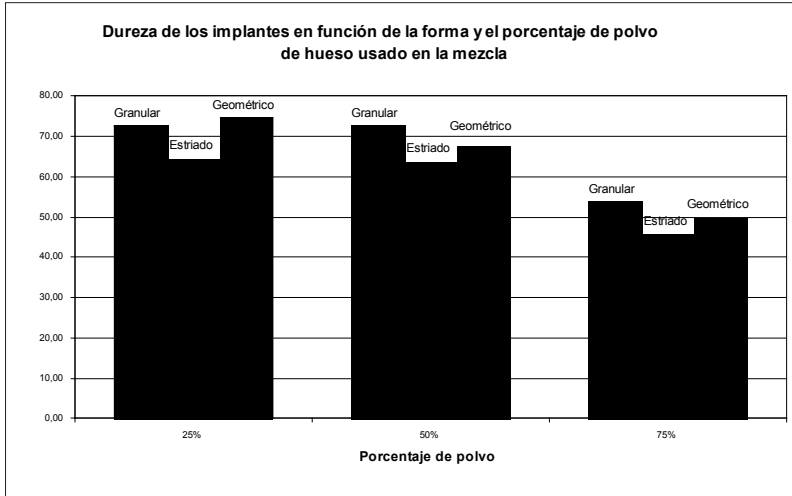
Valores de las propiedades mecánicas de los objetos fabricados a partir de la mezcla de polvo de hueso / ABS. E es el módulo elástico en compresión

Porcentaje de mezcla Tipo de polvo	25/75		50/50		75/25	
	Dureza (Shore D)	E (MPa)	Dureza (Shore D)	E (MPa)	Dureza (Shore D)	E (MPa)
84	72,58	778,38	75,42	701,03	53,58	147,31
91	72,83	1073,30	70,08	592,37	54,17	245,59
222	57,83	592,70	59,50	397,43	45,42	396,06
245	70,92	878,60	68,00	482,30	45,92	92,46
243	70,17	1148,24	63,58	456,32	44,92	100,69
249	79,00	1333,33	71,42	420,28	54,67	109,54

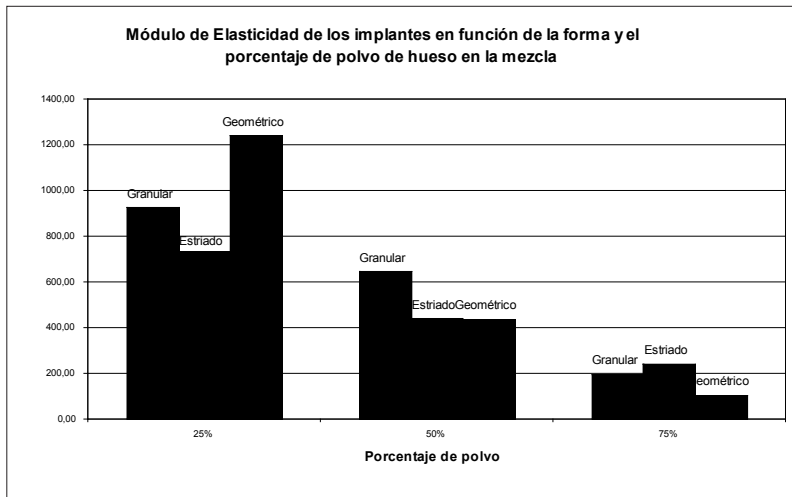
Con base en los resultados anteriores y en un intento por determinar la influencia de las diferencias dimensionales en la misma morfología de polvo en la dureza del compuesto, es decir, entre el 84 y 91; 222 y 243; 245 y 249 (tabla 2), se corrió una prueba de Tukey para las medias poblacionales obtenidas para los diferentes niveles propuestos. Se encontró que las medias poblacionales no son significativamente diferentes para los tipos de polvo de la misma morfología con diferencias dimensionales ( $T_{0.05} < 10.206$ ). Esto indica que la adhesión entre las partículas de polvo de hueso y el polímero no es representativa, aunque se evidencia que la morfología del polvo es determinante en la interacción con otros materiales en polvo, que se traduce finalmente en las propiedades mecánicas del objeto como tal.

De otra parte, también se encuentra que aunque el porcentaje de polvo es una variable significativa en el modelo estadístico para las dos propiedades mecánicas involucradas, en las probetas tiene un mayor impacto en el comportamiento del módulo de elasticidad que en la dureza de las probetas. Por

consiguiente debe tomarse en cuenta que las dos variables de estudio son significativas en lo que respecta a la dureza, mientras que el módulo elástico sólo se explica por el porcentaje de polvo en la probeta.



(a)

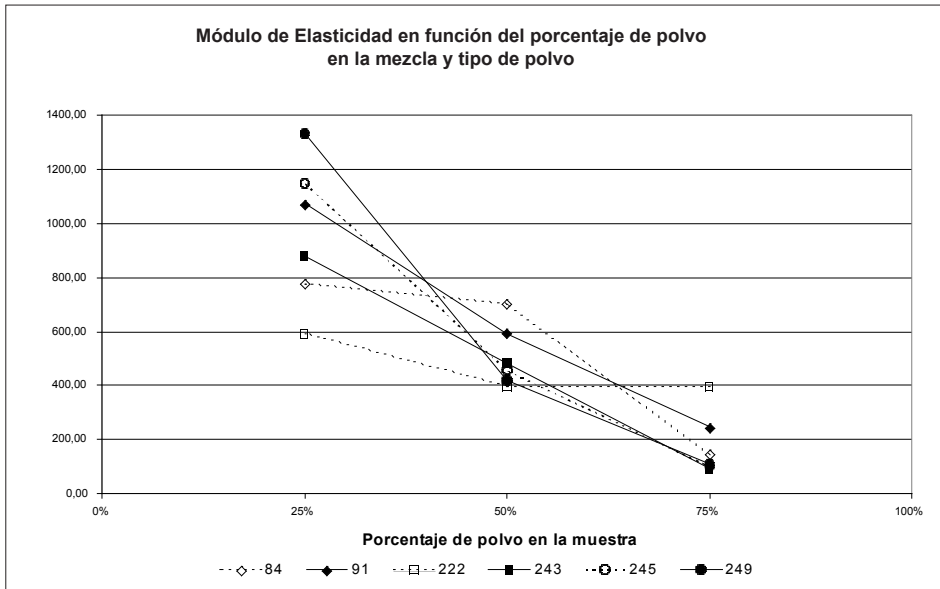


(b)

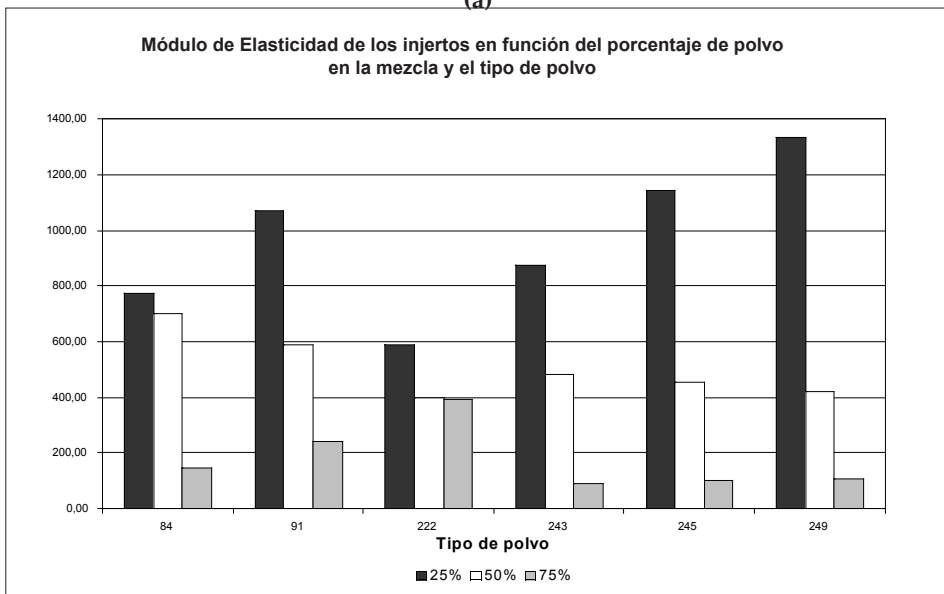
**Gráfico 2.** Propiedades mecánicas de los objetos producidos con la mezcla de polvo de hueso/ABS en función del porcentaje de polvo en la muestra y la forma del polvo producido por torneado. (a) Dureza. (b) Módulo de elasticidad

*Nota de la editorial:* No obstante la presentación irregular del gráfico 2, los autores aprobaron su publicación.





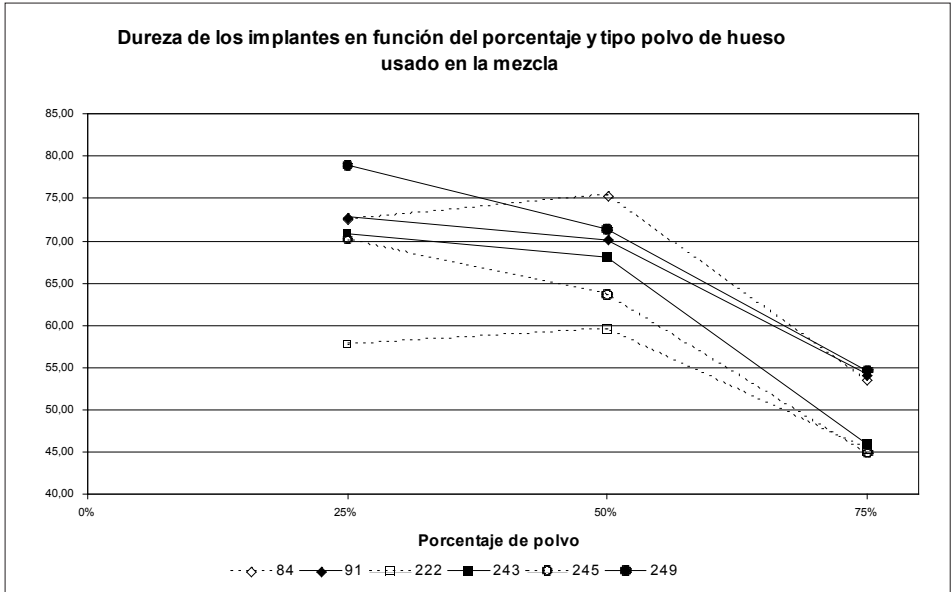
(a)



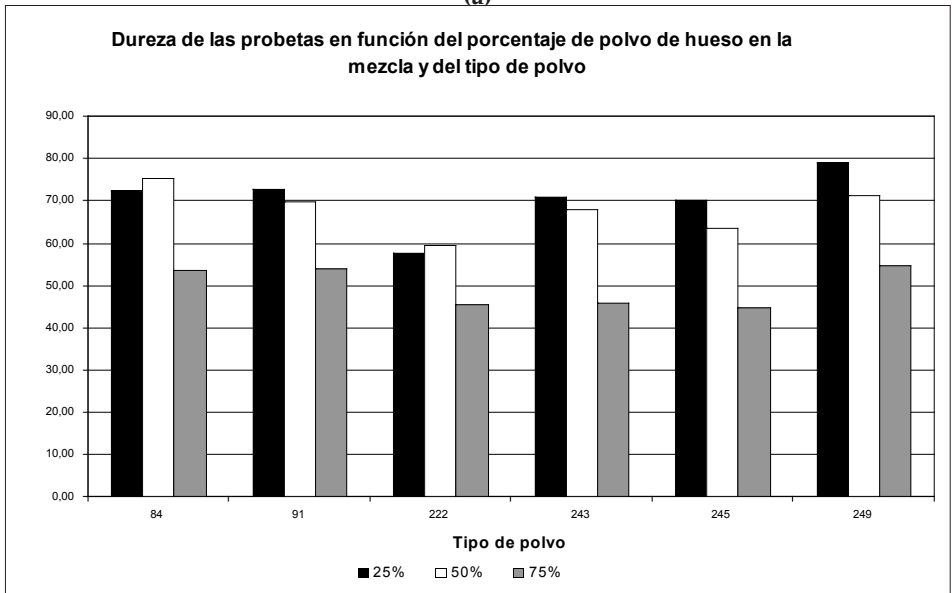
(b)

**Gráfico 3.** Módulo de elasticidad en función del tipo de polvo producido y el porcentaje de polvo en la mezcla base.

(a) Gráfico 2D en forma de dispersión. (b) Gráfico de barras.



(a)



(b)

**Gráfico 4.** Dureza de las probetas en función del tipo de polvo producido y el porcentaje de polvo en la mezcla base.  
 (a) Gráfico 2D en forma de dispersión. (b) Gráfico de barras.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La mezcla polvo de hueso / ABS no muestra todos los resultados deseados para la fabricación de implantes óseos conforme a los resultados obtenidos de sus propiedades mecánicas. Esto permite concluir la importancia de la naturaleza química que debe tener el compuesto en el diseño de la mezcla para la producción de objetos que puedan ser usados como implantes ortopédicos. Teniendo en cuenta que el ABS, el PLLA y PLGA son polímeros que se obtienen a partir de moléculas orgánicas no solubles en agua, y el polvo de hueso, a pesar de ser un compuesto orgánico, tiene un alto contenido de agua, las partículas de los dos compuestos no tienen afinidad química, lo que da lugar a fallas estructurales como las observadas en los ensayos de compresión, ocasionadas por la presencia de dos fases en la mezcla sólida.

Conviene realizar más ensayos en los que se haga uso de un agente de acople entre las partículas de polvo de hueso y el polímero. Esto podría mejorar las propiedades esperadas, como suele suceder en otros escenarios de materiales compuestos particulados. El objetivo final de estos trabajos es explotar las ventajas de la mezcla de polvos de hueso con biopolímeros donde la influencia de la cantidad de polvo de hueso sea notable dada la facilidad de producción y bajo costo cuando es comparado con los biopolímeros actuales.

## REFERENCIAS

- [1] PLÛMACHER, A. El curetaje como tratamiento de los tumores de células gigantes de hueso". Revisión y estudio de 16 casos operados. Hospital Universitario, Maracaibo, Edo. Zulia. Octubre de 2004. [http://www.svcot.org.ve/revista\\_svcot/rev12\\_04.html](http://www.svcot.org.ve/revista_svcot/rev12_04.html).
- [2] BURCHARDT, H. and BUSBEC, G.A. Repair of experimental autologous grafts of cortical bone. *J Bone Joint Surg* 1975, 57A, p. 814-9.
- [3] MELLONIG, T.J. and BOWERS, G.M. Comparison of bone graft materials: part II: new bone formation with autografts and allografts: an histological evaluation. *J Periodontol* 1981, 52(2), p. 297-302.
- [4] SATIZABAL, A.C., CALDERÓN, U.O, ALBÁN, P.P. and GAMBA, S.C. Manejo de la pseudoartrosis de huesos largos con Injerto óseo autólogo estructural en osteosíntesis fallida. *Revista Colombiana de ortopedia y traumatología*, Vol. 17, N° 3, 2003.
- [5] [http://www.stryker.es/st-index/st\\_pag\\_medic-home/st\\_pag\\_portfolio-info/st\\_pag\\_biotechnology/st\\_pag\\_op-1.htm](http://www.stryker.es/st-index/st_pag_medic-home/st_pag_portfolio-info/st_pag_biotechnology/st_pag_op-1.htm)
- [6] MOL, A. and DUNN, S. Effect of bone chip orientation on quantitative estimates of changes in bone mass using digital subtraction radiography. *Journal of Periodontal Research*, June 2003, Vol. 38, Issue 3, p. 296.

- [7] ROJAS, F.A. "Fabricación de implantes ortopédicos a partir del maquinado del hueso humano". Tesis doctoral. Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil, 2000.
- [8] Biomateriales. [www.Profes\\_net.htm](http://www.Profes_net.htm)
- [9] TABIMA, D.M. Desarrollo de una metodología para la preparación y evaluación de matrices biodegradables usadas para el crecimiento de células humanas. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia, 2004.
- [10] SALCEDO, R.E. Análisis experimental del comportamiento mecánico de aloimplantes óseos basados en ácidos biodegradables. Trabajo de grado Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia, 1995.
- [11] MONTGOMERY, D.C. *Diseño y análisis de experimentos*, 2<sup>a</sup> ed. México: Limusa Wiley, 2002.