



## EVALUACIÓN FÍSICA Y BIOLÓGICA DE *SCAFFOLDS* CERÁMICOS DE CARBONATO DE CALCIO REFORZADO CON ALÚMINA PARA LA REGENERACIÓN DE TEJIDO ÓSEO

Y. Bohórquez <sup>1\*</sup>, C. Loaiza <sup>1</sup>, M. Ortiz <sup>1</sup>, V. Parra <sup>1</sup>

1: Universidad de Antioquia - Facultad de Ingeniería

[\\*yesenia.bohorquez@udea.edu.co](mailto:*yesenia.bohorquez@udea.edu.co)

---

### PALABRAS CLAVE

*Scaffolds* cerámicos, alúmina, carbonato de calcio, porosidad, degradación, regeneración de tejidos óseos.

### RESUMEN

En aras de obtener mejores materiales para el crecimiento de tejidos óseos, en este trabajo se desarrollaron *scaffolds* de CaCO<sub>3</sub> reforzados con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en proporciones del 5, 15 y 25 % en peso, ya que el CaCO<sub>3</sub> presenta buena biocompatibilidad, biodegradabilidad y abundancia natural, pero bajas propiedades mecánicas; por lo cual se reforzó con alúmina, que es un material biocompatible, inerte y de alta resistencia mecánica. La porosidad presente en la estructura de los materiales elaborados y su composición química fue analizada por MEB-EDS, su densidad fue medida mediante picnometría y su biocompatibilidad se determinó a partir de pruebas *in vitro*. Los resultados obtenidos permitieron establecer que los materiales desarrollados cumplen con los criterios necesarios para su uso como plataformas de crecimiento celular.

---

## PHYSICAL AND BIOLOGICAL EVALUATION OF CALCIUM CARBONATE SCAFFOLDS REINFORCED WITH ALUMINA FOR BONE TISSUE REGENERATION

---

### KEYWORDS

*Scaffolds*, alumina, calcium carbonate, porosity, degradation, tissue regeneration.

### ABSTRACT

In order to obtain materials for bone tissue growth, in this work, scaffolds of CaCO<sub>3</sub> reinforced with 5, 15 and 25 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were developed. Since CaCO<sub>3</sub> has good biocompatibility, biodegradability and natural abundance, but low mechanical properties, it was reinforced with alumina, which has high mechanical strength, and it is both a biocompatible and inert material. The porosity in the structure of the materials prepared as well as their chemical composition were analyzed by SEM-EDS, their density was measured from pycnometer method, while their biocompatibility was determined by *in vitro* tests. The results allowed to establish that the developed materials could meet the necessary performance to be used as cell growth platforms.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la demanda de injertos y sustitutos óseos ha aumentado. De acuerdo con “*Fortune Business Insights*” se prevé que esta demanda crezca exponencialmente en el periodo del 2023-2030. Por tal motivo, en el ámbito de la ingeniería de tejidos, la búsqueda de materiales biocompatibles y resistentes que permitan la regeneración de tejidos dañados o enfermos se ha convertido en un objetivo primordial. Los *scaffolds* se diseñan con el objetivo de promover la curación y regeneración ósea fomentando el crecimiento de hueso nuevo alrededor y dentro de los mismos. Por lo tanto, propiedades como biocompatibilidad, biodegradabilidad y resistencia mecánica son de gran importancia [1].

Entre los diversos candidatos para el diseño de *scaffolds*, el  $\text{CaCO}_3$  ha despertado gran interés debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y abundancia natural. Sin embargo, sus propiedades mecánicas limitan su aplicación en tejidos que requieren alta resistencia, como huesos y cartílagos. Para superar estas limitaciones, la incorporación de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como material de refuerzo surge como una estrategia prometedora. La alúmina, conocida por su resistencia mecánica y biocompatibilidad, puede complementar las propiedades del  $\text{CaCO}_3$ , creando *scaffolds* con un equilibrio entre biocompatibilidad, resistencia y biodegradabilidad [1].

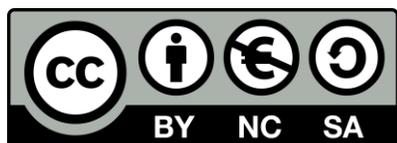
La investigación en biomateriales para regeneración ósea ha avanzado significativamente en los últimos años, revelando nuevas perspectivas y estrategias para mejorar la efectividad de los *scaffolds* utilizados en este campo. A través de la integración de diversos agentes y procesos, se ha logrado optimizar las propiedades

fisicoquímicas y biológicas de estos materiales, abriendo nuevas posibilidades en la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa [2].

Uno de los aspectos cruciales en este avance ha sido la comprensión más profunda de cómo la incorporación de agentes espumantes puede mejorar la morfología superficial y reducir la formación de grietas en los cementos óseos. En un estudio reciente, Wang, J., *et al.* [2] probaron que un cemento óseo de fosfato de magnesio bioactivo poroso, inyectable y espumado con carbonato de calcio y ácido cítrico, podría ser crucial para la regeneración ósea periodontal. Estos resultados sugieren que la inclusión de agentes espumantes puede ser fundamental para optimizar las propiedades fisicoquímicas y la porosidad de los *scaffolds*, mejorando así su efectividad clínica [2].

Además, la importancia de la alta porosidad y las propiedades mecánicas favorables en las plataformas de regeneración ósea ha sido destacada en varios estudios. Liu, X., *et al.* [3] y de nuevo Wang, J., *et al.* [2], demostraron en su investigación la relevancia de diseñar *scaffolds* con una estructura jerárquica adecuada para promover la migración y diferenciación osteogénica de células madre mesenquimales. Este hallazgo resalta la importancia de estructuras con propiedades mecánicas y porosidades adecuadas para aplicaciones terapéuticas exitosas [2-3].

Otro aspecto crucial es la biocompatibilidad y las propiedades osteoconductoras de los materiales a base de carbonato de calcio. En un estudio de Sirkiä, S. V., *et al.* [4], se resalta la importancia de considerar los efectos celulares de estos materiales para garantizar su viabilidad y eficacia en la regeneración ósea. Estos hallazgos son fundamentales para la caracterización y obtención de *scaffolds*



basados en  $\text{CaCO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ , asegurando su idoneidad para soportar la viabilidad celular y promover la regeneración ósea efectiva [4].

Por su parte, Vidane, A. S., *et al.* [5], mostraron que los andamios de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  son altamente biocompatibles y no citotóxicos. Ellos sugieren que la inclusión de células madre mesenquimales puede mejorar la osteoconducción, osteoinducción y osteointegración, lo que subraya la importancia de diseñar *scaffolds* enriquecidos con células madre que mejoren las propiedades osteogénicas [5].

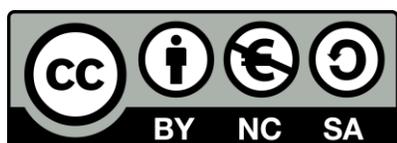
Por otro lado, Salomão R., *et al.* [6], exploraron el mecanismo de generación de poros en cerámicas de hexaluminato de calcio (CA6), lo que proporciona información crucial sobre cómo optimizar las propiedades mecánicas y la porosidad de los *scaffolds*. Este mecanismo de formación de poros es relevante para mejorar la aplicabilidad en la ingeniería de tejidos y la regeneración ósea [6].

A su vez, la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  destaca como un material cerámico de elección en implantes médicos, gracias a su dureza y resistencia al desgaste, lo que la hacen idónea para componentes sometidos a cargas y movimientos en el cuerpo humano. Además, por ser químicamente inerte, se asegura que no se corroa en el ambiente corporal, evitando la degradación y la liberación de sustancias tóxicas. Así mismo, su biocompatibilidad garantiza una mínima respuesta inmune adversa al ser implantada en el cuerpo [6].

En la misma vía, Camilo, C. C., *et al.* [7], destacan la inercia química de la alúmina, asegurando que no reacciona con los tejidos corporales ni con los fluidos biológicos. Esta característica contribuye a su condición de material biocompatible, evitando cualquier

rechazo en el organismo. Sin embargo, la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  carece de propiedades osteogénicas u osteoinductivas, lo que significa que no puede estimular por sí sola la formación de nuevo tejido óseo o inducir la diferenciación celular requerida para ello. Según los ensayos realizados en el estudio, los implantes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  porosa recubiertos con *bioglass* e hidroxiapatita demuestran una mayor capacidad de osteointegración en comparación con los implantes no recubiertos. Estos resultados sugieren que los implantes recubiertos facilitan un contacto directo entre el hueso y la superficie del implante, lo que podría mejorar la osteointegración. Además, los autores resaltan la importancia de la bioquímica, la macroestructura y la topografía de la superficie en la interfaz hueso-implante para el diseño eficaz de implantes biomiméticos. Para abordar la limitación de la falta de propiedades osteogénicas y osteoinductivas de la alúmina, se ha desarrollado un material compuesto que combina las propiedades mecánicas de la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con un material bioactivo, como el  $\text{CaCO}_3$ . Este enfoque tiene como objetivo mejorar la integración y funcionalidad de los implantes óseos [7].

En el ámbito de la regeneración ósea, la búsqueda de materiales que favorezcan la formación de nuevo tejido es crucial. En este contexto, en 2021 se llevó a cabo un estudio sobre *scaffolds* biodegradables que incluían carbonato cálcico (CC), sílice mesoporosa y microesferas de ácido poli (láctico-co-glicólico) (PLGA), con el objetivo de evaluar su capacidad osteogénica. Específicamente, se analizó el impacto del carbonato de calcio en la biocompatibilidad y la promoción de la formación ósea en andamios celulares. Los resultados de este estudio revelaron que el carbonato de calcio desempeña un papel crucial en la mejora de la biocompatibilidad de los *scaffolds* de microesferas sinterizadas,



así como en la estimulación de la formación ósea. Se observó un aumento significativo en la absorción de proteínas funcionales, la adhesión celular y la diferenciación osteogénica en los andamios que contenían CC en comparación con aquellos que no lo tenían. Este efecto se corroboró mediante la mayor actividad de fosfatasa alcalina y la secreción de calcio en las células implantadas en los *scaffolds* con carbonato de calcio [8].

Adicionalmente, Jodati, H., *et al* [9], abordan estrategias para mejorar la resistencia mecánica de los *scaffolds* biocerámicos altamente porosos, destacando la efectividad de la infiltración de polímeros, como la policaprolactona (PCL), para aumentar su tenacidad y por ende resistencia a la fractura. Se enfatiza la importancia de equilibrar estas mejoras mecánicas con la biocompatibilidad de los andamios, reconociendo que la combinación de biocerámicas con polímeros puede mejorar las propiedades mecánicas, aunque podría afectar la integración biológica [9].

La combinación de biocerámicas con polímeros mediante impregnación o recubrimiento se identifica como una forma de mejorar las propiedades mecánicas, aunque puede afectar la integración biológica de los *scaffolds*. Se resalta la necesidad de optimizar las propiedades de dichos *scaffolds* biocerámicos para su aplicación en ingeniería de tejidos, considerando desafíos como la fragilidad de las biocerámicas y las limitaciones en los métodos de fabricación [1].

Así pues, el objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de adicionar distintas proporciones de  $Al_2O_3$  sobre las propiedades de *scaffolds* de  $CaCO_3$  fabricados por el método de pasta cerámica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Para la preparación de los *scaffolds* cerámicos, se utilizó  $CaCO_3$  de la marca comercial Químicos LM<sup>®</sup> y  $Al_2O_3$  de la marca Leco<sup>®</sup>. En cuanto al agente porogénico, se utilizó acetato de polivinilo (PVA) disuelto en agua. Finalmente, para la prueba *in vitro*, se usó suero fisiológico.

### 2.2. Preparación de los materiales

Previo a la fabricación de los *scaffolds* cerámicos, se realizó un proceso de tamizado al  $CaCO_3$  pasando el material a través de una malla Tyler 325 (45  $\mu m$ ), para asegurar una distribución uniforme de las partículas. Por su parte, la  $Al_2O_3$  ya contaba con un tamaño de partícula  $d_{90}=0,3 \mu m$ , por lo que no fue necesario tamizar.

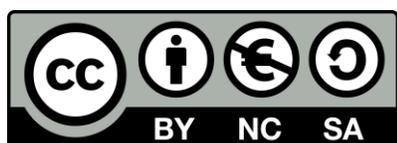
### 2.3. Preparación de los *scaffolds* por método de pasta cerámica

#### 2.3.1. Preparación de la solución de PVA 3% en peso.

Se añadió PVA sólido a agua a temperatura controlada (70 - 80 °C), hasta llegar a un 3 % peso/volumen. Para facilitar la disolución del PVA sólido en el agua, la mezcla se agitó magnéticamente a una velocidad de aproximadamente 115 rpm.

#### 2.3.2. Preparación de la pasta cerámica

Se realizaron las mezclas listadas en la Tabla 1, presentada a continuación:



**Tabla 1.** Proporciones de los materiales utilizados para la elaboración de los scaffolds

Material	Blanco	M5	M15	M25
		5 % en peso	15 % en peso	25 % en peso
CaCO <sub>3</sub> (g)	1,12	1,06	0,95	0,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	0,00	0,05	0,14	0,21

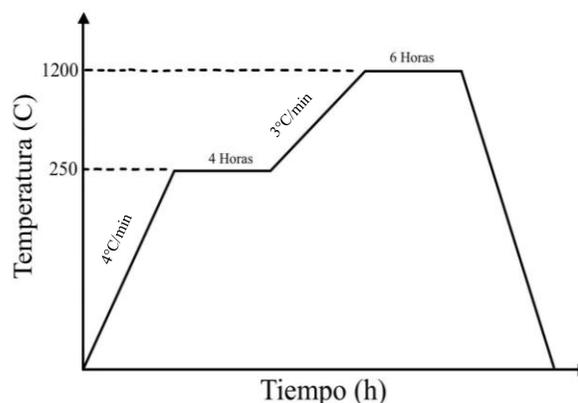
Posteriormente se agregó la solución de PVA a 3% peso/volumen gradualmente hasta conseguir la consistencia pertinente que permitiera el moldeo, el cual se realizó en un molde cilíndrico metálico de dimensiones 25,4 mm de diámetro y 10 mm de altura. El PVA actúa como un aglutinante para mejorar la cohesión de la pasta cerámica y facilitar la formación de poros durante el proceso de cocción.

### 2.3.3. Secado de piezas

Las piezas moldeadas se sometieron a un proceso de secado durante un día a temperatura ambiente para eliminar la humedad y consolidar la estructura de la pasta cerámica. Este paso es crucial para prevenir la formación de grietas y deformaciones durante la sinterización.

### 2.3.4 Sinterización.

Las piezas secas se sometieron a un proceso de sinterización en una mufla, siguiendo la misma curva de sinterización mostrada en la figura 1. Durante este proceso, el PVA se descompuso, dejando poros en la estructura cerámica.

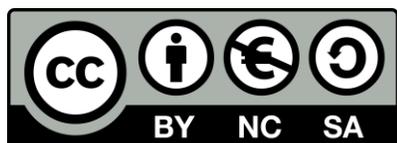


**Figura 1.** Curva de sinterización para los scaffolds

## 2.4. Caracterización

### 2.4.1. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB y Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (EDS).

El equipo MEB de marca JSM-6490LV SEM JEOL con fuente de tungsteno e imagen generada con electrones secundarios, así como el software de análisis de imagen Image J, fueron empleados para la caracterización de las probetas de CaCO<sub>3</sub> reforzado con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dicho MEB, ayudado por el software de análisis de imagen, posibilitan el análisis detallado de la morfología superficial y la distribución de poros en múltiples escalas de aumento, permitiendo determinar con precisión tanto la porosidad total como la porosidad interconectada del scaffold, siendo este un factor esencial para evaluar su idoneidad en aplicaciones biomédicas, como la ingeniería de tejidos, donde la porosidad desempeña un papel crucial en la difusión de nutrientes, la adhesión celular y la vascularización del tejido regenerado. Por su parte, el EDS se realizó con el propósito de analizar la composición química elemental, así como la distribución de dichos elementos en los scaffolds cerámicos de carbonato de calcio reforzado con alúmina.



### 2.4.2. Densidad

Se determinó la densidad por picnometría a cada una de las 4 probetas, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C329 [10], lo cual proporciona información importante para la aplicación de regeneración de tejido óseo [8-9].

### 2.4.3. Ensayo *in vitro*

Se llevó a cabo pruebas *in vitro* en las diferentes muestras elaboradas mediante un proceso de degradación controlada utilizando suero fisiológico. Las muestras fueron sumergidas en esta solución y se monitoreó su degradación a lo largo de un periodo de 24 h. Durante este intervalo de tiempo, se realizaron observaciones y se registraron los cambios físicos en las muestras, lo que permitió una evaluación del proceso de degradación en condiciones simuladas [11].

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de la preparación de los *scaffolds* cerámicos se muestran en la figura 2 presentada a continuación:



**Figura 2.** *Scaffolds* sinterizados: a) Blanco, b) M5 - 5% en peso de alúmina, c) M15 - 15% en peso de alúmina y d) M25 - 25% en peso de alúmina

De la figura 2 es de notar los cambios en contracción sufridos por las muestras. Se nota de forma cualitativa que la contracción disminuye con el aumento de alúmina.

### 3.1. Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (EDS)

Los resultados de composición química obtenidos por EDS se resumen en la Tabla 2 presentada a continuación:

**Tabla 2.** Resultados de la composición química por EDS para los *scaffolds*

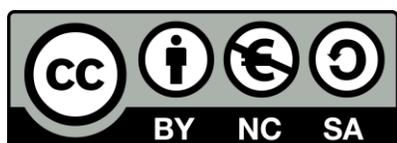
Elemento	% en peso			
	Blanco	M5	M15	M25
Ca	69,84	61,28	54,81	47,09
Al	0,418	5,17	11,61	17,65
Otros*	Balance	Balance	Balance	Balance

\*: Trazas de Si, Mg, Fe, P, W, K, Sr, Cl, Cu, Pb, Ti, Mn, S, Ni, Cr, Sc, Zn, Zr, Mo, Br con valores < 0,418 % en peso

Específicamente en la Tabla 2 se puede observar que para el blanco, el elemento mayoritario fue el Ca (69,84 % en peso), lo cual es consistente pues dicha muestra está compuesta esencialmente de  $\text{CaCO}_3$  sin adición alguna. Todos los demás componentes son trazas, siendo el Al el mayor de dichas trazas (0,418 % en peso). Es de esperar que el Ca en esta muestra esté en forma de óxido ( $\text{CaO}$ ), ya que durante el proceso de sinterizado, el  $\text{CaCO}_3$  se descompone térmicamente, liberando  $\text{CO}_2$  y produciendo  $\text{CaO}$ , como se muestra en la Reacción 1.



En cuanto a las muestras M5, M15 y M25 (Tabla 2), se evidenció una disminución de Ca (M5: 61,28 % en peso, M15: 54,81 % en peso y M25: 47,09 % en peso) y un incremento de Al (M5: 5,17 % en peso, M15: 11,61 % en peso y M25: 17,65 % en peso) frente al blanco, lo que se explica por la adición de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a la mezcla. Los valores de



los demás elementos que se encuentran en trazas se mantuvieron  $< 0,418$  % en peso.

### 3.2. Análisis de la estructura

A partir de los resultados obtenidos mediante MEB (figuras 3-4), se observa la interconexión de los poros con poros alargados en cada muestra. Esto no es un dato menor, ya que como los poros no están aislados, se facilita el paso de fluidos, nutrientes y células a través del *scaffold*, lo cual favorece el crecimiento del tejido.

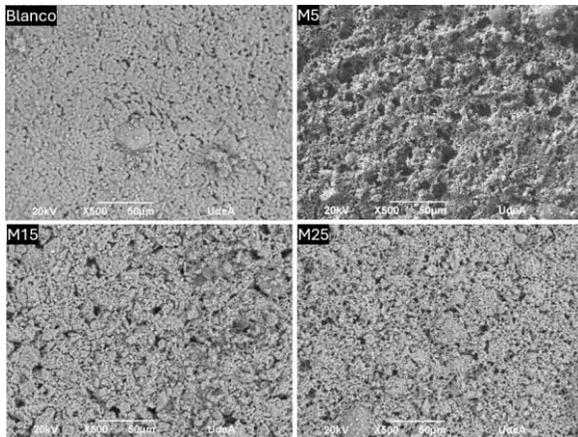


Figura 3. Resultados MEB para los scaffolds a 500X

Según el estudio realizado por Dai, W., *et al.* [12], donde se ha investigado la importancia de la porosidad interconectada. Se revela que los poros interconectados de diferentes dimensiones cumplen diversas funciones importantes en la regeneración ósea. Los poros más grandes promueven el crecimiento óseo, proporcionando espacios y túneles para el flujo de fluidos y la formación de vasos sanguíneos. Por otro lado, los poros de menor tamaño son esenciales en el aumento de la rugosidad superficial y la mejor absorción de proteína. Esta variedad en la estructura porosa facilita el intercambio de nutrientes, favorece la adhesión celular y, en última instancia, la osteogénesis [12].

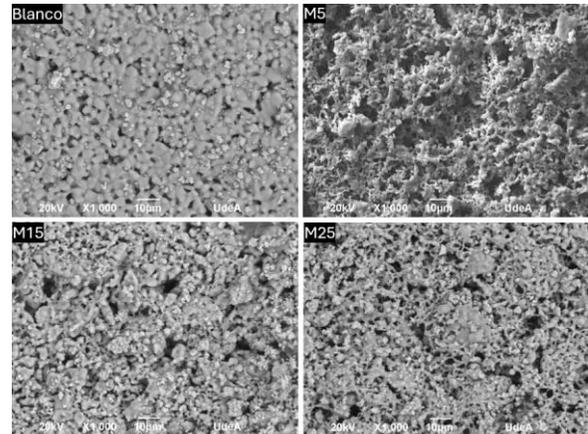


Figura 4. Resultados MEB para los scaffolds a 1000X

En lo que respecta a la contracción, el análisis de las muestras sinterizadas reveló diferencias atribuibles principalmente a la presencia de alúmina como refuerzo [13]. La muestra sin alúmina (Blanco), mostrada en la figura 2, experimentó la mayor contracción. En contraste, las muestras con refuerzo de alúmina (M5, M15, M25), ilustradas igualmente en la figura 2, exhibieron una contracción menor. Este fenómeno se explica por el papel de la alúmina como fase rígida, que inhibe la contracción excesiva del carbonato de calcio durante el sinterizado, manteniendo la porosidad (figuras 3-4) [14]. La alúmina debido a su baja tendencia a la densificación (alta refractariedad), mantiene la estabilidad estructural y por ende la porosidad, lo que a su vez limita la contracción global de las muestras sinterizadas. Además, como se mencionó antes, durante el proceso de sinterizado, el  $\text{CaCO}_3$  se descompone térmicamente, liberando  $\text{CO}_2$  y  $\text{CaO}$ , lo que contribuye significativamente a la contracción observada en el blanco [15].

Por su parte, los resultados de porosidad obtenidos con análisis de imagen a partir de las imágenes MEB se muestran en la Tabla 3:

**Tabla 3. Porcentaje de porosidad para los scaffolds**

Muestras	Porosidad [% en área]
Blanco	9,01
M5	15,40
M15	34,78
M25	34,69

Estos resultados revelan una tendencia clara del aumento de la porosidad con el aumento de la adicción de alúmina [15]. A pesar de que se añadió un 3% en peso/volumen de PVA para generar una cantidad significativa de porosidad, los resultados muestran que la porosidad aumentó de 9,01 % en área en el blanco a  $\approx 35,00$  % en área en las muestras con 15 y 25 % en peso de alúmina, lo que podría ser explicado por la poca tendencia a la densificación de la alúmina antes mencionada, lo cual termina por estabilizar la porosidad [16].

El análisis MEB de las figuras 3-4 también permitió obtener los diámetros promedio de los poros para las algunas muestras, como se observa en la Tabla 4. Estos valores promedio indican un bajo diámetro de poro que, en principio, podría parecer insuficiente para la difusión celular adecuada. Sin embargo, al revisar y analizar los diámetros máximos de poro en cada una de las muestras, éstos diámetros máximos son más representativos de las características críticas de las muestras para la difusión celular, lo cual se relaciona con la interconexión de estos poros antes mencionada [6].

**Tabla 4. Tamaño de poro para los scaffolds**

Muestra	Diámetro Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Diámetro Máximo [ $\mu\text{m}$ ]
Blanco	3,33	5,14
M5	3,74	6,5
M15	3,74	6,87
M25	4,31	6,75

### 3.3. Densidad

Los resultados de densidad se resumen en la Tabla 5 presentada a continuación:

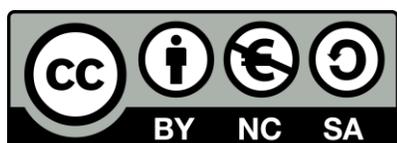
**Tabla 5. Densidad medida para los scaffolds**

Blanco	M5	M15	M25
[g/mL]			
0,053	0,073	0,079	0,087

En la Tabla 5, se puede observar que la densidad de las muestras presentó un pequeño aumento con el aumento de la alúmina, esto a pesar de que la porosidad también aumentó (Tabla 3). Este fenómeno se podría explicar precisamente con la presencia de la alúmina, ya que este material es más denso que el  $\text{CaCO}_3$  y solo el aumento de masa por el ingreso de alúmina en la mezcla, puede compensar la disminución del volumen de material sólido producida por el aumento de porosidad, manteniendo la densidad casi constante.

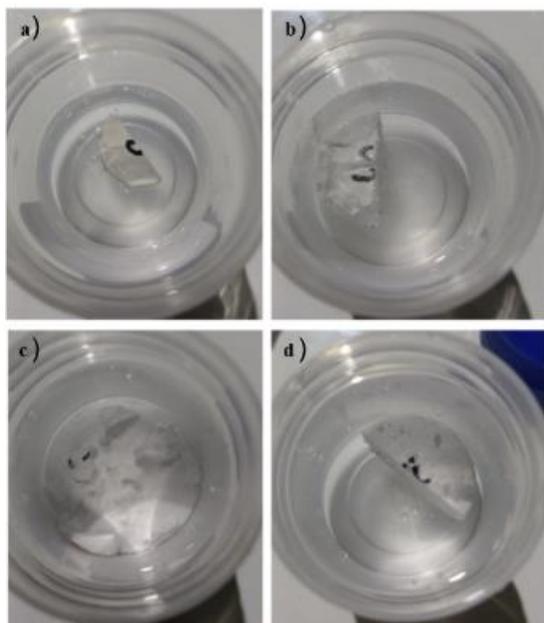
### 3.4. Degradación In-vitro

La solución de Ringer es una solución que contiene una mezcla de sales inorgánicas como cloruro de sodio, cloruro de potasio,



cloruro de calcio y bicarbonato de sodio, disueltos en agua destilada [11]. Esta solución se utiliza en ensayos *in vitro* dado que su composición se asemeja al líquido extracelular del cuerpo humano. Ahora bien, el suero fisiológico se puede usar para imitar la solución de Ringer en ensayos *in vitro*, dado que tienen una composición química y osmolaridades similares. El suero fisiológico, es una solución estéril de cloruro de sodio al 0,9 % en peso en agua destilada, lo cual representa una osmolaridad muy cercana a la del líquido extracelular del cuerpo humano [11].

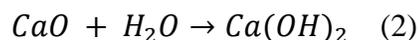
En la figura 5 se presentan las muestras sumergidas en suero fisiológico, con un volumen entre 10-15 veces mayor al de cada *scaffold* cerámico.



**Figura 5.** Ensayo de prueba *in vitro* para los *scaffolds* transcurridas 12 h. a) Blanco b) M5 – 5 % en peso de alúmina c) M15 – 15 % en peso de alúmina y d) M25 - 25% en peso de alúmina.

En dichas imágenes se comienzan a observar degradaciones de la muestra a diferentes

tiempos. Es de notar que las muestras con un mayor contenido de alúmina mostraron una mayor resistencia a la degradación en comparación con aquellas con un contenido más bajo. Esto podría explicarse teniendo en cuenta el contenido de alúmina y la Reacción 2 presentada a continuación:

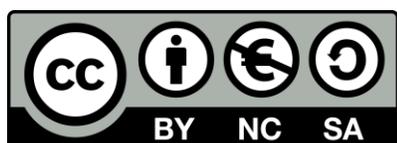


Según la reacción 2, las muestras con mayor cantidad de CaO (las que no tienen refuerzo de alúmina) reaccionan con el agua del suero fisiológico, generando hidróxido de calcio [6]. Esta reacción es exotérmica y altamente reactiva, lo que provoca una rápida degradación de dichas muestras.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se estudió el efecto de adicionar distintas proporciones de  $Al_2O_3$  sobre las propiedades físicas, estructurales y la biodegradación de los *scaffolds* cerámicos de  $CaCO_3$  fabricados por el método de pasta cerámica. Dichos *scaffolds* presentan propiedades mejoradas por lo que podrían ser de utilidad para la industria de regeneración de tejidos óseos como plataformas de crecimiento celular.

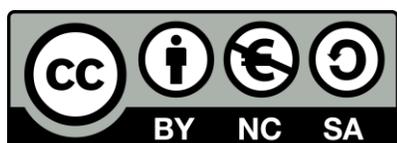
La alúmina actúa como un estabilizador mecánico que limita la contracción excesiva y mantiene la integridad estructural de las muestras. Adicionalmente, la alúmina también actúa como un estabilizador químico pues reduce la cantidad de Ca en las formas de CaO y  $CaCO_3$  en las mezclas, las cuales son reactivas y por ende negativas a nivel de biocompatibilidad. A nivel de porosidad, se destaca el haber obtenido porosidades adecuadas en



tamaño e interconectividad para el desarrollo y crecimiento celular.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Miri, Z., Haugen, H. J., Loca, D., *et al.*, "Review on the strategies to improve the mechanical strength of highly porous bone bioceramic scaffolds", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 44, no. 1, pp. 23-42, 2024.
- [2] Wang, J., Cheng, Z., Chen, D., *et al.*, "An injectable porous bioactive magnesium phosphate bone cement foamed with calcium carbonate and citric acid for periodontal bone regeneration", *Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials*, vol. 142, 2023.
- [3] Liu, X., Wang, Z., "Chitosan-calcium carbonate scaffold with high mineral content and hierarchical structure for bone regeneration", *Smart Materials In Medicine*, vol. 4, pp. 552-561, 2023.
- [4] Sirkiä, S. V., Qudsia, S., Siekkinen, M., *et al.*, "Physicochemical and biological characterization of functionalized calcium carbonate", *Materialia*, vol. 28, 2023.
- [5] Vidane, A. S., Nunes, F. C., Ferreira, J. A., *et al.*, "Biocompatibility and interaction of porous alumina-zirconia scaffolds with adipose-derived mesenchymal stem cells for bone tissue regeneration", *Heliyon*, vol. 9, no. 9, 2023.
- [6] Salomão, R., Ferreira, V. L., Oliveira, I., *et al.*, "Mechanism of pore generation in calcium hexaluminate (CA6) ceramics formed in situ from calcined alumina and calcium carbonate aggregates", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 36, no. 16, pp. 4225-4235, 2016.
- [7] Camilo, C. C., Silveira, C. A., Faeda, E., *et al.*, "Bone response to porous alumina implants coated with bioactive materials, observed using different characterization techniques", *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, vol. 15, no. 3, pp. 223-235, 2017.
- [8] Xu, W., Zhao, R., Wu, T., Li, G., Wei, K., Wang, L., "Biodegradable calcium carbonate/mesoporous silica/poly (lactic-glycolic acid) microspheres scaffolds with osteogenesis ability for bone regeneration", *RSC Advances*, vol. 11, no. 9, pp. 5055-5064, 2021.
- [9] Jodati, H., Yilmaz, B., Evis, Z., "A review of bioceramic porous scaffolds for hard tissue applications: Effects of structural features", *Ceramics International*, vol. 46, no. 10, pp. 15725-15739, 2020.
- [10] ASTM, C329 - Standard Test Method for Specific Gravity of Fired Ceramic Whiteware Materials, 2020.
- [11] Clínica Universidad de Navarra, SOLUCIÓN DE RINGER, [Online], Available: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/solucion-ringer#:~:text=La%20soluci%C3%B3n%20de%20Ringer%20es,y%20electrolitos%20en%20el%20cuerpo>, [Accessed: 05-Jun-2024].
- [12] Dai, W., Li, S., Jia, H., Zhao, X., Liu, C., Zhou, C., Xiao, Y., Guo, L., Fan, Y., Zhang, X., "Impresión 3D indirecta de estructuras CDHA con estructura porosa jerárquica para promover la osteoinductividad y la regeneración ósea", *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 207, pp. 295-307, 2025.
- [13] Duque-Urbe, C., *et al.*, "Production of ceramic alumina scaffolds via ceramic stereolithography with potential application



in bone tissue regeneration", *Materials Today Communications*, vol. 40, 2024.

[14] Kalmodia, S., Goenka, S., Laha, T., Lahiri, D., Basu, B., Balani, K., "Microstructure, mechanical properties, and *in vitro* biocompatibility of spark plasma sintered hydroxyapatite–aluminum oxide–carbon nanotube composite", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 30, no. 8, pp. 1162-1169, 2010.

[15] DeLellis, D. P., Krause, A. R., "Large pores promote abnormal grain growth behavior in calcia doped alumina", *Scripta*

*Materialia*, vol. 245, p. 116058, 2024.

[16] Naeem, M. A., Armutlulu, A., Kierzkowska, A., & Müller, C. R. "Development of High-performance CaO-based CO<sub>2</sub> Sorbents Stabilized with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or MgO", *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 158-166.

