



Development of the magnesium alloy industry in Colombia - An opportunity

Luisa Fernanda Berrio-Betancur ^a, Mónica Echeverry-Rendón ^a, Esteban Correa-Bedoya ^b, Alejandro Alberto Zuleta-Gil ^c, Sara María Robledo-Restrepo ^d, Juan Guillermo Castaño-Gonzalez ^a & Félix Echeverría-Echeverría^a

^a Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. luisa.berrio@udea.edu.co, monica.echeverry@udea.edu.co, juan.castano@udea.edu.co, felix.echeverria@udea.edu.co

^b Grupo de Investigación Materiales con Impacto – MAT&MPAC, Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. escorrea@udem.edu.co

^c Grupo de Investigación de Estudios en Diseño - GED, Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Medellín, Medellín, Colombia. alejandro.zuleta@upb.edu.co

^d Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales PECET, Instituto de Investigaciones Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. sara.robledo@udea.edu.co

Received: July 18th, 2017. Received in revised form: September 4th, 2017. Accepted: September 21th, 2017.

Abstract

Magnesium and its alloys are some of the materials that have had notable growing progress in recent years. This interest in magnesium base alloys is due to both, its physical and mechanical properties, as well as the search for alternatives to less polluting materials. In order to provide an overview of the possibilities that the use of this material has in the domestic industry, this work gives a look at the basic aspects of the material and the processes of obtaining; its most promising applications and with potential to be developed in Colombia. Finally, the authors discuss their research and results on this material, seeking to be employed as inputs for the implementation of processes and products at the commercial level.

Keyword: Magnesium; magnesium synthesis; magnesium applications; magnesium sustainability.

Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad

Resumen

Dentro de los materiales que más avance han tenido en las últimas décadas, se encuentran el magnesio y sus aleaciones, cuyo volumen de producción mundial se ha incrementado notoriamente en los últimos años. El creciente interés en el magnesio se debe tanto a sus propiedades físicas y mecánicas como a la búsqueda de alternativas de materiales menos contaminantes. Con el objeto de proporcionar una visión general de las posibilidades que el uso de este material tiene en la industria nacional, en este trabajo se da una mirada a los aspectos básicos del material y de los procesos de obtención del mismo, así como a sus aplicaciones más promisorias y con potencial de ser desarrolladas en Colombia. Para finalizar, los autores discuten sus investigaciones y resultados acerca de este material, buscando su aprovechamiento como insumo para la implementación de procesos y productos a nivel comercial.

Palabras clave: magnesio; síntesis de magnesio; aplicaciones del magnesio; sostenibilidad del magnesio.

1. Introducción

El magnesio fue descubierto como elemento en 1808 por Sir Humphrey Davy. En 1831, Atoine Bussy lo produjo en su forma

metálica, a partir de cloruro de magnesio. Posteriormente, se inició su producción comercial por un proceso electrolítico en Alemania en 1886. La producción se extendió a otros países impulsada por las dos guerras mundiales; sin embargo, el desarrollo del mercado

How to cite: Berrio-Betancur, L.F., Echeverry-Rendón, M., Correa-Bedoya, E., Zuleta-Gil, A., Robledo-Restrepo, S.M., Castaño-Gonzalez, J.G. and Echeverría-Echeverría, F., Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad DYNA, 84(203), pp. 55-64, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia. 
 Revista DYNA, 84(203), pp. 55-64, December, 2017, ISSN 0012-7353
 DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n203.66440>

se ha visto limitado por el bajo costo del aluminio [1]. El magnesio es el metal estructural más liviano y contando todas las fuentes de las cuales se puede extraer, podría considerarse como el más abundante en la tierra. Sin embargo, la producción mundial de magnesio es de solo algo más de 1 millón de toneladas por año, comparada con la de aluminio que es aproximadamente 58 millones de toneladas por año (cifras de 2015) [2]. El magnesio es un metal alcalino de bajo número atómico (12), con densidad de 1.738 g/cm³ (20 °C) y punto de fusión de 650 °C. Adicionalmente, se puede resaltar su comportamiento mecánico y su facilidad de conformación. La gran abundancia de este metal hace posible su producción en muchos lugares, siendo extraído tradicionalmente de minerales (dolomita y magnesita) y de cloruros de magnesio disueltos en lagos salados o en el mar. A pesar de esta enorme disponibilidad, los costos de extracción son mayores que los del aluminio, haciéndolo un 20% más costoso y limitando sus aplicaciones, en las que puede reemplazar al aluminio en la mayoría de los casos. Lo anterior es indicativo de la enorme potencialidad de este material [3].

Con este artículo se quiere discutir diferentes aspectos relacionados con el desarrollo de la industria del magnesio, así como algunos aspectos básicos de sus propiedades, fuentes naturales para su extracción, áreas principales de aplicación y sostenibilidad de este material. Y finalmente, se desea muestran brevemente algunos desarrollos científicos con este metal, realizados en el Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales de la Universidad de Antioquia, con el fin de proporcionar información básica para el desarrollo de este material estratégico en el país donde aún falta innovar más en este tema.

2. Aspectos básicos en la metalurgia de las aleaciones de Mg

El magnesio tiene una estructura atómica hexagonal compacta y un diámetro atómico de 0.320 nm, lo cual permite usar un amplio rango de elementos como aleantes, entre los que se encuentra aluminio, cinc, cerio, plata, torio y circonio, entre otros [4]. En este contexto es también posible obtener una gran variedad de compuestos intermetálicos, los cuales pueden adoptar otras estructuras cristalinas, tales como cúbica u ortorrómbica [5]. Entre las aleaciones de magnesio más comerciales están aquellas que contienen aluminio, cinc y manganeso. La presencia de impurezas de hierro, níquel y cobre, induce un incremento en la velocidad de corrosión del magnesio y sus aleaciones

[6], lo cual se puede reducir por efecto de cinc y manganeso. Otro problema de metales base magnesio es que el tamaño de grano tiende a ser grande y variado, lo cual resulta en pobres propiedades mecánicas.

Esta circunstancia se puede controlar por medio de la adición de circonio, el cual tiene un particularmente fuerte efecto refinador de grano en las aleaciones de magnesio. Sin embargo, el circonio forma compuestos estables con aluminio y manganeso y por tanto se limita su uso en estas aleaciones, pero en aquellas donde se puede emplear genera elevadas propiedades mecánicas, incluso a alta temperatura. Como ilustración, en la Tabla 1 se han incluido algunas de las familias más populares de aleaciones de magnesio junto con sus características generales.

La fundición de magnesio requiere tomar exhaustivas precauciones para proveer una atmósfera inerte dada la alta reactividad del magnesio fundido. Por lo tanto, se usan diferentes compuestos para formar una capa de escoria que aisle el metal líquido del aire. Las aleaciones de magnesio son apropiadas para fundición a presión, dada principalmente su alta fluidez, bajo calor específico y baja tendencia a adherirse a las paredes del molde de acero. La fundición en molde de arena también es posible, pero se deben tomar precauciones para controlar la oxidación y además considerar, para el diseño del molde, la baja densidad y el bajo calor específico del material, de manera que se logre el llenado del molde. El maquinado de aleaciones de magnesio es posiblemente el más ventajoso entre los materiales estructurales; por ejemplo, debido a su bajo peso y maleabilidad ayuda a que el proceso de mecanizado sea rápido y además permite un excelente acabado superficial [7]. De igual manera, los procesos de soldadura son efectivos, ya sea por sistemas TIG (Tugnsten Inert Gas) o MIG (Metal Inert Gas), usando en general, material de aporte con la misma composición.

3. Obtención de magnesio metálico

Los minerales considerados como fuentes de magnesio explotables a nivel comercial son la dolomita, magnesita, brucita, carnalita y olivino, aun cuando este metal hace parte de más de 60 minerales diferentes [3]. De esta manera, el magnesio es el octavo elemento más abundante en la corteza terrestre, con alrededor de un 2%. Además, como fuentes de magnesio se tienen los cuerpos de agua salada, siendo el tercer elemento con mayor presencia en el océano, con un porcentaje de 0.13%.

Tabla 1.
Características generales de algunas aleaciones de magnesio.

Designación ASTM	Composición Química Nominal	Propiedades de la aleación
AZ91	Al: 9.5, Zn: 0.5, Mn:0.3	Aleación de propósito general
AM50	Al: 5, Mn: 0.3	Apropiada para colado a alta presión
AS41	Al: 4, Zn: 0.3, Si: 1	Buenas propiedades de termofluencia a 150 °C
EZ33	Zn: 2.7, Zr: 0.7, RE: 3.2	Buena colabilidad, soldable, resistente a termofluencia a 250 °C
HK31	Zr: 0.7, Th: 3.2	Buena colabilidad, soldable, resistente a termofluencia a 350 °C
HZ32	Zn: 2.2, Zr: 0.7, Th: 3.2	Similar a HK31
QE22	Zr: 0.7, RE: 2.5, Ag: 2.5	Soldable, alta resistencia a la tensión a 250 °C
QH21	Zr: 0.7, RE: 1, Ag: 2.5, Th: 1	Soldable, alta resistencia a la tensión a 300 °C
WE54	Zr: 0.5, RE: 3.25, Y: 5.1	Alta resistencia mecánica a alta temperatura, buena resistencia a la corrosión, soldable
ZK51	Zn: 4.5, Zr: 0.7	Buena resistencia mecánica a temperatura ambiente y ductilidad.
ZE41	Zn: 4.2, Zr: 0.7, RE: 1.3	Buena resistencia mecánica a temperatura ambiente y colabilidad mejorada.
ZC63	Zn: 6, Mn: 0.5, Cu: 3	Buena resistencia mecánica a alta temperatura y soldable.

Fuente: Adaptado de [4].

Entre los procesos de extracción de magnesio más utilizados se encuentran el proceso Pidgeon y los procesos electrolíticos. En el primero, se parte de dolomita, la cual luego de calcinarse, se somete a un proceso de desoxidación por medio de ferrosilicio. Este método es empleado por el mayor productor mundial de magnesio, China [8]. Entre las desventajas de este proceso se tiene que durante la calcinación se genera dióxido de carbono; además, se requiere el uso de gran cantidad de energía, principalmente de origen fósil [9]. Por otra parte, los procesos electrolíticos son aplicados tanto para obtener magnesio a partir de minerales, como para extraer el magnesio disuelto en el agua de mar y otros cuerpos de agua salada. En ambos casos, por medio de procesos de disolución en ácido clorhídrico en el caso de la fuente mineral (Australia) o por evaporación en el caso del agua salada (Estados Unidos), se obtiene cloruro de magnesio sólido, el cual es procesado en una celda electrolítica para obtener el magnesio metálico con aproximadamente un 99.8% de pureza [10]. Este último proceso es mucho más amigable con el medio ambiente, en contraste con el proceso Pidgeon, dado que los subproductos generados pueden ser recolectados y reutilizados en el proceso, e incluso el sistema es diseñado para el uso y generación de energía renovable [11].

En Colombia, las fuentes encontradas son las siguientes: (1) Marítimas, pues el país tiene cerca de dos millones de kilómetros cuadrados de área marítima, lo cual junto con la extensa longitud de sus costas, proporciona no solamente una fuente casi inagotable de magnesio, sino una gran disponibilidad de sitios para el montaje de una planta; (2) Hidrotermales, ya que Colombia cuenta con cerca de 300 fuentes hidrotermales, las cuales tienen un alto contenido de magnesio; (3) Minerales de magnesio, que en la actualidad son utilizados únicamente como materia prima para la fabricación de fertilizantes y en la industria cerámica [12].

De esta manera se tiene que, a pesar de que el Gobierno Nacional expidió la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012, "Por la cual se determinan unos minerales estratégicos para el país", entre los cuales se consideran estratégicos los minerales de magnesio, el aprovechamiento de los mismos está dirigido principalmente a productos de bajo valor agregado. A pesar de que la producción mundial de magnesio está cumpliendo actualmente con la demanda del mercado, también se debe recalcar que en los últimos 15 años esta producción ha aumentado no menos de 4 veces, lo cual indica la gran expansión del mercado y el incremento continuo de nuevas aplicaciones del magnesio [2]. Además, se revela una enorme potencialidad de este metal y sus aleaciones, si se considera el tamaño del mercado de los materiales con los cuales compite el magnesio, como el aluminio (cerca de 58 millones de toneladas) y los plásticos (más de 300 millones de toneladas); estos últimos con aportes negativos respecto a la contaminación ambiental [13].

4. Aplicaciones de las aleaciones de magnesio

Las aplicaciones del magnesio han sido principalmente impulsadas por su baja densidad, lo cual permite la fabricación de productos entre un 36 y 77% más livianos que aquellos producidos en aluminio o acero, respectivamente.

Además, asociado al menor peso hay una reducción en el consumo de energía en productos móviles y en transporte, lo cual a su vez impacta la reducción en generación de gases contaminantes. Además de esto, este material ofrece otras ventajas con respecto a materiales de baja densidad, como una excelente relación resistencia/peso, alta conductividad eléctrica, buen apantallamiento electromagnético, alta capacidad de absorción de vibraciones y muy atractivas propiedades de procesamiento. Todo lo anterior permite que las aleaciones de magnesio estén encontrando un amplio campo de aplicación como se verá a continuación.

4.1. Transporte

Es uno de los campos con mayor potencialidad de aplicación, que se estima en cerca del 70% de las aplicaciones actuales, dadas las ventajas implícitas en sistemas móviles con la reducción de peso [14]. Dicha reducción no solamente se refleja en el desempeño del vehículo respecto a la cantidad de energía necesaria, sino en la posibilidad de uso de otras fuentes de energía más sostenibles. Entre las propiedades mecánicas que hacen del magnesio un material estructural que mejora la seguridad en vehículos, se tiene su alta resistencia específica (relación entre su resistencia mecánica y densidad), buena ductilidad y absorción de energía.

Entre las aleaciones más empleadas en movilidad están las Mg-Al-Zn, las cuales contienen entre 0.1 y 9% en peso de Al y 0.1 y 1.5% en peso de Zn. El aluminio genera mejor resistencia a la tracción y mayor dureza, gracias a la presencia de intermetálicos tales como Mg₁₇Al₁₂. A su vez, el cinc mejora la resistencia a la tracción al disminuir la solubilidad del aluminio, y por tanto incrementar la formación de fases durante el tratamiento térmico [4].

A pesar de lo anterior, como limitantes a una mayor aplicación de aleaciones de magnesio en transporte se tiene su pobre resistencia a la corrosión y al desgaste. Las aleaciones Mg-Al-Zn tienen una particular baja resistencia a la corrosión bajo tensión, lo cual es generado por efectos galvánicos con segundas fases o impurezas (Fe, Cu y Ni). A diferencia del aluminio, el magnesio no genera una capa pasiva estable en su superficie, lo cual permite el ataque de agentes agresivos presentes en el medio que rodea el material. Varias estrategias para enfrentar este problema se han venido desarrollando, entre las que se encuentra la modificación superficial con diferentes tipos de películas protectoras. Sin embargo, se requiere mayor desarrollo en este campo, debido a que, en general, los procesos industriales existentes no son ambientalmente sostenibles y encarecen el precio de la pieza terminada.

Entre las piezas de magnesio fabricadas para la industria automotriz se encuentran volantes de conducción, columnas de dirección, elementos de sujeción, paneles de instrumentos, pedales, carcasas en el motor, sistema de transmisión, contenedores para bolsas de aire y embrague. Así mismo, algunas aleaciones especiales son empleadas en la industria aérea, aeroespacial y en automóviles deportivos, particularmente en componentes de cajas de cambios. Por otro lado, las aleaciones de magnesio han encontrado uso en marcos de silletería para autos y aviones. Son varias los fabricantes de automóviles que utilizan magnesio en

diferentes partes del vehículo, buscando no solamente menor uso de combustible sino mayor desempeño y disminución de costos de procesamiento, gracias a la mayor facilidad para conformar piezas de geometrías complejas de las aleaciones de magnesio. En aplicaciones aeronáuticas, las aleaciones de magnesio ganan terreno, dado que siendo un material ligero tiene capacidad de resistir altas temperaturas, la exposición al ozono y el impacto de partículas a alta velocidad.

4.2. Salud

El uso del magnesio en aplicaciones médicas fue visionado desde mediados del siglo pasado. Sin embargo, su aplicación ha sufrido recientemente un enorme aumento, debido principalmente a sus propiedades únicas, que junto a su bajo peso, lo hacen un material adecuado para su uso en el campo de implantes óseos. Una de las características de este material es que sus propiedades mecánicas se asemejan a las del hueso, lo cual no sucede con otros materiales empleados en aplicaciones ortopédicas, como el titanio y el acero inoxidable. Esta ventaja permite mejores procesos de recuperación natural del hueso.

Por otro lado, el magnesio es un elemento encontrado naturalmente en el cuerpo humano, teniendo participación en diferentes reacciones metabólicas y funciones biológicas [15–17]. Se almacena en los huesos y su exceso se puede excretar de manera natural por vía urinaria. Así, el magnesio es un material biocompatible y no tóxico, permitiendo el desarrollo de implantes bioabsorbibles, a los cuales se les puede regular su tiempo de permanencia en el cuerpo para cumplir una función determinada de recuperación de un tejido y posteriormente degradarse de manera natural [18].

Lo anterior ofrece grandes potencialidades, dado que no solamente se evita la necesidad de una segunda cirugía para retirar el implante, sino que en casos donde esta opción no es viable se evitan los efectos secundarios que la permanencia del implante origina en el cuerpo del paciente. Para la regulación de la duración del implante de magnesio se pueden emplear, ya sea recubrimientos, o trabajar sobre la composición de la aleación. En este último aspecto se debe considerar con extremo cuidado la inclusión de elementos que puedan llegar a generar algún efecto secundario por acumulación en el cuerpo, una vez se inicia el proceso de degradación del implante de magnesio.

Así mismo, en el área de la salud las aleaciones de magnesio han encontrado gran posibilidad de uso reemplazando otros materiales en la fabricación de estructuras de soporte en elementos ortopédicos externos como los estabilizadores de todo tipo de articulaciones, y las ayudas técnicas como los bastones, caminadores, y sillas de ruedas, tanto para aplicaciones terapéuticas como postoperatorias [19–21], las cuales se encuentran actualmente en estudio.

4.3. Electrónica

Con el advenimiento del boom de los equipos móviles, igualmente se ha visto un incremento en la búsqueda de materiales que cumplan con las propiedades requeridas por dichas aplicaciones. En especial, bajo peso, fácil

conformación de piezas complejas, resistencia mecánica, transferencia de calor apropiada y propiedades electromagnéticas son las características buscadas, y éstas se cumplen eficientemente por las aleaciones de magnesio, superando ampliamente a otros materiales como los plásticos. En su mayoría las aplicaciones están en carcasas de cámaras, teléfonos celulares, computadores portátiles, así como en otros componentes electrónicos y de instrumentación, que aprovechan la propiedad del magnesio de apantallar instrumentación electrónica de interferencias electromagnéticas y de radio frecuencia [22].

En relación con estos elementos electrónicos, otros utensilios y herramientas para el hogar pueden encontrar beneficio en el uso de aleaciones de magnesio, no solamente por tener mejores propiedades y durabilidad que los plásticos, sino porque en elementos de alto consumo, el magnesio es un material ambientalmente sostenible en contraposición a los materiales poliméricos.

4.4. Elementos deportivos

En el campo de la fabricación de algunos elementos para la práctica de deportes, las propiedades del magnesio han encontrado una muy atractiva posibilidad de desarrollo. Dentro de estas propiedades se destaca su bajo peso, alta resistencia al impacto y la habilidad de producir piezas de formas complejas. Son innumerables las aplicaciones actuales de aleaciones de magnesio en deportes, incluyendo: Palos de golf, raquetas, bates de béisbol, arcos, bicicletas, patines, garrochas, sillas de ruedas de competencia, motociclismo y elementos de protección para deportistas [23]. En todos los casos las aleaciones de magnesio presentan importantes beneficios para los deportistas dada su habilidad de absorber vibraciones, lo cual no solamente puede influir en el desempeño mismo del usuario, sino también en reducir riesgos de lesiones.

4.5. Otras aplicaciones

Otros campos de aplicación se relacionan con el uso de magnesio, no como material estructural sino como reactivo o materia prima en procesos productivos. Es el caso de la industria del acero, donde el magnesio se utiliza para remoción de azufre, lo cual también aplica en la producción de hierro fundido, titanio, circonio, hafnio y uranio. Por otro lado, está su uso como aleante en la producción de latas para bebidas, que en la actualidad es el más importante consumidor de magnesio. Así mismo, se emplea como ánodo en sistemas de protección catódica en tanques de sustancias químicas, tuberías y barcos. Finalmente, dada su reactividad cuando se encuentra como polvo fino, se usa en la producción de juegos pirotécnicos.

5. Sostenibilidad del magnesio

Como se ha mencionado anteriormente, es posible producir el magnesio mediante métodos ambientalmente limpios, ya que en otros casos se generan sustancias que causan enfermedades en los seres humanos [24], incluso cuando se parte de fuentes sólidas como son los minerales de

dolomita y magnesita. En este grupo de métodos de producción de magnesio, se tiene como factores comunes el uso de la electroquímica y la obtención inicial de hidróxido de magnesio seco. Los subproductos de estos procesos, se pueden disponer directamente al ambiente sin ningún tratamiento, dada la ausencia de otros reactivos contaminantes.

Ahora bien, en lo que tiene que ver con el procesamiento y conformación de aleaciones de magnesio, son varios los procesos que han logrado altos niveles de eficiencia y bajo impacto ambiental. Uno es el método de Rauch Fertigungstechnik GmbH (Gmunden, Austria,) el cual es un método denominado de colado a baja presión (LVC por sus siglas en inglés). Este proceso trae ventajas operacionales en el procesamiento de aleaciones de magnesio, así como mejores propiedades del producto terminado. Además, conlleva beneficios ambientales, dado que se emplea menor cantidad de gas de protección del magnesio fundido, lo cual adicionalmente disminuye los costos de producción y de emisiones y mejora las condiciones ambientales de los operarios [25]. De manera similar Oskar Frech GmbH + Co., KG (Schorndorf, Germany), desarrolló maquinaria capaz de disminuir hasta un 70 % el consumo de energía en el proceso de fundición de magnesio. Lo anterior, además de los importantes ahorros en costos de producción, genera un beneficio ambiental por menor uso de energía. El método de colado a alta presión, desarrollado por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) y denominado ATM (Advanced Thixotropic Metallurgy), usa un sistema de alimentación revolucionario que reduce las emisiones contaminantes y al tiempo que disminuye los costos, mejora la calidad de las piezas obtenidas [26]. Por otra parte, Magnesium Elektron (Manchester, UK), ha desarrollado nuevos procesos de fundición y colado, incluyendo gases de protección del metal fundido con bajo impacto ambiental. De esta manera, han logrado reducir el uso de SF₆ como gas de protección, generando menores costos y disminuyendo el impacto al medio ambiente en un 90%. Logros similares son reportados por la empresa LG Electronics (Seoul, South Korea) y Meridian Magnesium Products of America (MAP), Eaton Rapids (Michigan, USA) [27].

Como se puede ver, los métodos de fundición y colado de aleaciones de magnesio, han tenido en los últimos años importantes avances para reducir los efectos ambientales de esta industria, los cuales son bajos comparados con la mayoría de metales y materiales. Así mismo, los métodos de conformación empleados pueden ser ambientalmente amigables, siendo la extrusión uno de los más populares. Por ejemplo, Morgo Magnesium Ltd., The Netherlands, produce partes en diferentes aleaciones de magnesio por el método de extrusión en caliente, sin uso de lubricantes, a temperaturas entre 300 y 400 °C.

El proceso de reciclado de aleaciones de magnesio, en general emplea métodos similares a aquellos desarrollados para la producción del metal primario, las cuales se han descrito anteriormente en el texto. Sin embargo, el magnesio tiene varias opciones de reciclaje: La primera, cuando la chatarra es de suficiente calidad, se puede reprocesar para obtener de nuevo piezas con buenas especificaciones; como

segunda opción está el usar la chatarra de magnesio para la producción de otros materiales metálicos y, finalmente, otra posible opción de reciclaje de magnesio es su utilización como materia prima en la producción de fertilizantes.

6. Desarrollos y estudios sobre el uso del magnesio en aplicaciones comerciales

En este apartado se reportan los avances que hasta el momento se han logrado en el Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales – CIDEMAT de la Universidad de Antioquia, resultado de varios años de trabajo con aleaciones y compuestos de magnesio, en busca de brindar oportunidades para el desarrollo del uso de este material en la industria nacional, generando productos de alto valor agregado y que tengan potencial de exportación.

6.1. Aplicación de magnesio en salud

6.1.1. Problemas cardiovasculares

A nivel de salud, debido al aumento en la expectativa de vida y a cambios asociados a la forma de vida, donde la población mundial se ve expuesta a situaciones de estrés, sedentarismo, obesidad entre otras, la probabilidad de padecer una enfermedad cardiovascular se está incrementado considerablemente. Es por esta razón que se requiere disponer en el mercado de alternativas terapéuticas basadas en el uso de implantes, los cuales deben ser versátiles, biocompatibles y económicos.

Actualmente, el uso de implantes permanentes para el tratamiento de estenosis o aneurismas requiere el uso de stents, los cuales son unos dispositivos médicos con memoria de forma y apariencia de muelle o resorte que permiten la canalización y apertura de los vasos sanguíneos para permitir la correcta irrigación de sangre en el cuerpo. Actualmente, los materiales para este tipo de aplicaciones son metales permanentes tales como el cromo-cobalto, níquel, titanio y aceros inoxidables. Estos materiales son efectivos en las primeras etapas del tratamiento, pero con el tiempo pueden causar problemas secundarios como la re-oclusión del lumen del vaso sanguíneo, problema conocido como reestenosis [28,29]

Adicionalmente, algunos problemas asociados a la interacción sangre-material, pueden concluir en la formación de coágulos, lo cual puede ser altamente peligroso para el paciente. Por esta razón, han emergido las formulaciones donde medicamentos anticoagulantes son inmovilizados en la superficie del implante como una solución a este problema, que termina siendo paliativa hasta que el medicamento finalmente se consuma.

En la actualidad, los implantes bioabsorbibles han emergido como una solución definitiva a los problemas antes descritos. Para esta condición, diversos materiales poliméricos y metálicos, están siendo objetivo de estudio, por nombrar algunos se encuentran los polisacáridos, las proteínas, por el lado de polímeros naturales y por el otro, los sintéticos están el PLA, PGA y PHB entre otros. Para los metales se tiene al Mg y sus aleaciones [30], siendo estos últimos un excelente candidato debido a que es un material

biocompatible, dúctil y liviano. Sin embargo, a pesar de estas características, el magnesio presenta como principal problema su alta reactividad, que puede ser crítica en un ambiente biológico. Algunos estudios como el realizado por Liu et sobre la degradación in-vitro de la aleación Mg-Ca, como también Witte et el cual realizaron ensayos in vivo a un conejillo de indias, reportaron que después de la implantación subcutánea de magnesio se forman cavidades de gas debido a la reacción de degradación del material, causando necrosis (muerte de tejido) alrededor del implante [31][32]. La velocidad de degradación del material puede ser controlada de dos formas: mediante el uso de aleaciones de magnesio o mediante recubrimientos protectores. En el caso del uso de aleaciones, es importante considerar que los elementos adicionados a la matriz de magnesio deben ser biocompatibles y estar en el rango de concentraciones admisibles por el cuerpo para no generar problemas posteriores asociados con toxicidad.

Adicionalmente, las aleaciones no solo mejoran las propiedades de corrosión del material, sino que también tienen un fuerte impacto en las propiedades mecánicas, sobre todo en el caso del diseño de un stent cardiovascular, donde el dispositivo es insertado a través de un catéter, requiere ser enrollado y luego expandido en la zona afectada. Por otro lado, el recubrimiento del material no solo disminuye las velocidades de degradación del magnesio, sino que al mismo tiempo mejora las propiedades biológicas debido a que se pueden controlar parámetros como composición, topografía y propiedades físico-químicas del recubrimiento [17][33].

Una excelente opción para el manejo del magnesio en esta aplicación, podría ser la combinación de estas dos opciones -aleación y su posterior tratamiento superficial- para así obtener una mejor opción de implante. En la Fig. 1 se muestran dos imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de sustratos de magnesio modificados por la técnica oxidación electrolítica por plasma PEO antes y después de ser expuesto a un ensayo biológico para evaluación de la superficie.

6.1.2. Problemas ortopédicos

En cualquier aplicación, sea industrial o médica, es importante que el magnesio sea tratado para mejorar sus propiedades físicas y/o químicas y por ende el comportamiento del material en el medio donde vaya a ser usado. En la actualidad, algunos estudios buscan optimizar los métodos y procesos de modificación para que preste un alto desempeño en las áreas requeridas. Por ejemplo, se están implementando técnicas de conversión sobre la superficie del Mg a través de anodizados que tienen como objetivo generar capas protectoras de óxidos y otros compuestos a partir del sustrato, de electrolitos y parámetros eléctricos pre-seleccionados. La técnica mencionada anteriormente es conocida como oxidación electrolítica por plasma (PEO por sus iniciales en inglés), la cual hace del Mg un mejor material de ingeniería debido al incremento de su resistencia a la corrosión y desgaste, además de hacerlo más biocompatible [34-43].

Una de las variables más importantes a tener en cuenta en el proceso PEO es la composición de los electrolitos, los cuales deben ser alcalinos, ya que son los responsables en gran medida de la morfología obtenida e influyen en que se produzca un adecuado contacto con las células vivas. Tal vez los menos estudiados y de mayor interés en este trabajo son los que contienen iones de fosfato, debido a que en combinación con fluidos corporales precipitan en el compuesto apatita, que es muy compatible con el ambiente en cuestión.

En la Fig. 2 se muestra una micrografía SEM, correspondiente a una investigación sobre recubrimientos obtenidos por el proceso PEO con dicho electrolito, en la que se observa una alta porosidad de la película anódica. En ella se puede notar que los poros formados en general son circulares y de diferentes tamaños, además de obtenerse una capa anódica homogénea. El espesor de la película es aproximadamente 3 μm .

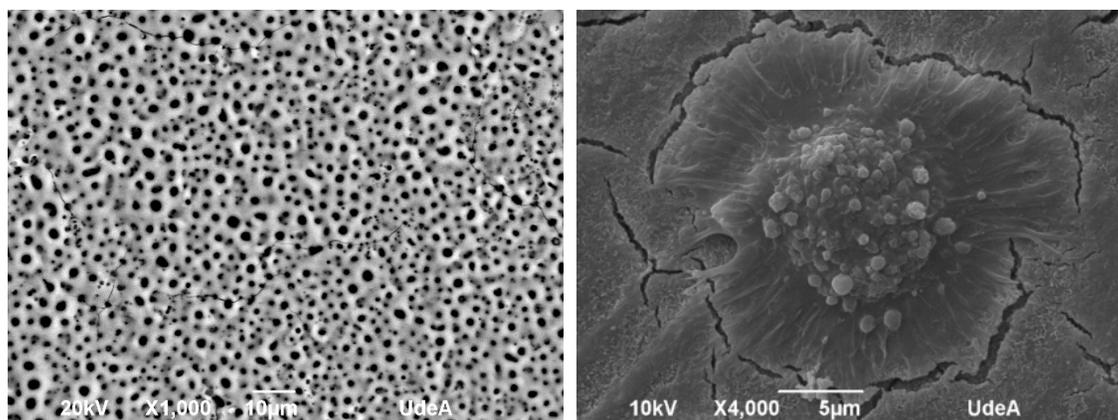


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de un recubrimiento de magnesio anodizado por PEO (izquierda) y de una célula adherida a la superficie del recubrimiento (derecha) realizados para el estudio de este. Fuente: Los autores

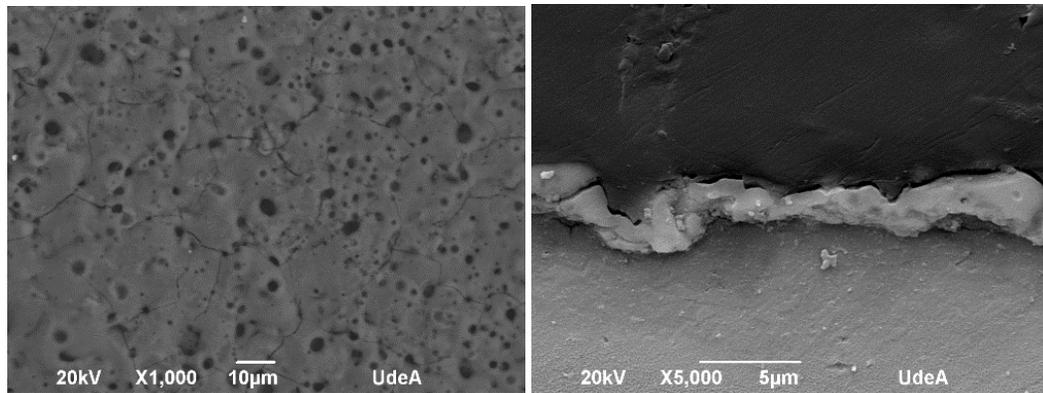


Figura 2. Micrografías SEM de la superficie recubrimiento obtenido por PEO con electrolitos que contienen iones de fosfatos y su respectivo corte trasversal.
Fuente: Los autores

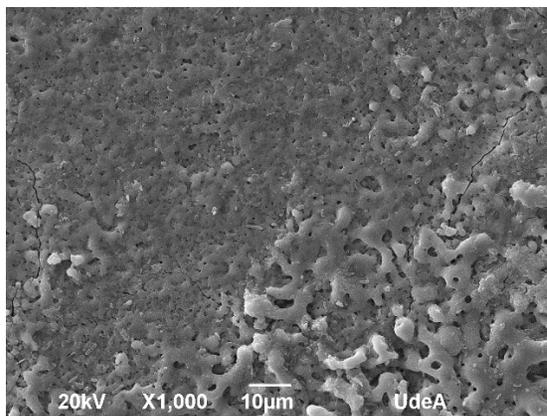


Figura 3. Micrografía SEM del recubrimiento obtenido por PEO después del ensayo de inmersión en SBF.

En conclusión, las capas anódicas formadas por la técnica PEO, protegen el sustrato de una forma controlada como se mostró en la evolución de hidrógeno y adicionalmente tienen la cualidad que en combinación con fluidos corporales forman apatita en la superficie, mejorando su bioactividad en aplicaciones ortopédicas.

Fuente: Los autores

El efecto protector del recubrimiento se comprobó por una prueba de evolución de hidrógeno en 0.9 %w NaCl, encontrando que hay una disminución de aproximadamente 50% en la reducción de la velocidad de corrosión de la muestra anodizada, comparada con el sustrato de Mg comercialmente puro sin recubrimiento. Dado la aplicación final, las muestras recubiertas se ensayaron por inmersión en SBF durante 5 días, encontrado que además del recubrimiento se tienen precipitaciones de apatita, lo cual indica que además de proteger el sustrato el recubrimiento induce la formación de este compuesto, muy importante para el desarrollo de hueso (Fig. 3).

6.2. Aplicaciones industriales

6.2.1 Recubrimientos electroless

Existen múltiples razones para aplicar o formar recubrimientos metálicos sobre sustratos de diferente naturaleza (metales, polímeros, etc.). Entre las razones más importantes que pueden ser mencionadas, están el aumento a la resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico, es decir, aumentar la vida útil del sustrato y poder utilizarlo en diversas aplicaciones. Este tipo de soluciones son, probablemente, las más atractivas desde la óptica del costo-

beneficio, toda vez que el producto final es un tipo de “material compuesto” que aprovecha las ventajas del sustrato y del recubrimiento, eliminando las desventajas del sustrato [44]. En este caso, el producto final es un elemento de magnesio supremamente liviano, con adecuada resistencia mecánica y con propiedades mejoradas en cuanto a resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico.

La industria cuenta con numerosos procesos tecnológicos que permiten formar recubrimientos metálicos sobre sustratos metálicos. Dentro de esos procesos está el conocido como deposición electroless. Este proceso, que es diferente a la electrodeposición, es bastante versátil ya que copia de forma precisa la geometría de la pieza que está siendo recubierta, provee superficies homogéneas, espesores uniformes, recubrimientos adherentes y libres de poros. Sin embargo, la cualidad quizás más importante es que el procedimiento no emplea grandes cantidades de energía eléctrica para formar el recubrimiento, ya que, como su nombre lo indica, el proceso se caracteriza por ser autocatalítico, requiriendo solamente energía eléctrica para calentar la solución química donde es llevado el proceso de deposición.

Los recubrimientos metálicos base níquel son altamente empleados en ingeniería como recubrimientos funcionales, ya que estos poseen una adecuada combinación entre

resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico [45]. Mediante el proceso electroless es posible formar recubrimientos base níquel tanto sobre materiales metálicos como poliméricos. Los recubrimientos electroless base níquel tiene una apariencia superficial similar a la de una coliflor, de ahí que, en parte, se pueda explicar su excelente comportamiento frente al desgaste mecánico. Además, los recubrimientos son de estructura amorfa, aunque realizando un tratamiento térmico adecuado se pueden obtener estructuras cristalinas. Las durezas de los recubrimientos se encuentran entre 500 y 700 kg/ [mm] ², los módulos de elasticidad reportados varían entre 50 y 70 GPa y la densidad varía entre 7.8 y 8.6 g/ [cm] ³ [45]. Estas propiedades dependen de los elementos químicos que hacen parte del recubrimiento junto al níquel, ya que es posible formar recubrimientos de níquel aleados con fósforo o boro mediante el proceso electroless. En términos generales, los recubrimientos electroless níquel – fósforo (Ni-P) son más resistentes a la corrosión que los recubrimientos níquel – boro (Ni-B); sin embargo, estos últimos son más resistentes al desgaste que los primeros. Además, el procedimiento para depositar uno u otro es bastante similar.

Es importante resaltar que la naturaleza química del magnesio hace que sea considerado un metal muy activo. De hecho, el magnesio es utilizado como ánodo de sacrificio en diversas aplicaciones industriales, lo que significa que tiene una tendencia natural a corroerse. Por el contrario, el níquel es químicamente más estable que el magnesio en cuanto a corrosión se refiere. Por lo anterior, se podría pensar que formar un recubrimiento de níquel sobre una superficie de magnesio es una idea bastante arriesgada ya que, el par galvánico generado por los dos materiales es considerable, lo que causaría, ante un eventual fallo del recubrimiento, la corrosión a gran velocidad del sustrato del magnesio. Sin embargo, industrial y académicamente la formación de recubrimientos electroless níquel es llevada a cabo sin mayores contratiempos, pero con el empleo de sustancias altamente contaminantes y nocivas para la salud humana como por ejemplo ácido fluorhídrico o compuestos con cromo hexavalente.

En trabajos realizados por algunos de los presentes autores [46–49], se ha reportado la formación exitosa de recubrimientos electroless base níquel con fósforo o boro. El desarrollo logrado cuenta con una preparación superficial de los sustratos de magnesio que garantiza la adherencia de los recubrimientos, pero no emplea sustancias con flúor o cromo. Además, el procedimiento sirve tanto para recubrir sustratos de magnesio puro como varias de sus aleaciones (AZ91D, AZ31, etc.). Los resultados son bastante alentadores, puesto que, luego de aplicar los recubrimientos a las aleaciones de magnesio, se encontró que dichos materiales mejoraron en un 92 % su resistencia a la corrosión y en un 36 % su resistencia al desgaste. Se espera entonces que con la implementación de este nuevo procedimiento para obtener recubrimientos metálicos de manera directa sobre la superficie de un material tan reactivo como lo es el magnesio, aumente cada vez más su utilización en la manufactura de nuevos productos y podamos así disponer de dispositivos tales como computadores, carcasas de teléfonos, herramientas portables y tabletas, cada vez más livianos y duraderos.

6.2.2. Otros estudios en procesamiento de aleaciones de magnesio

Entre otros procesos que se están desarrollando se tiene el desarrollo de procesos de modificación superficial, ya sea por formación de compuestos inter-metálicos en su superficie, o por aplicación de procesos de manufactura avanzada, que permitan ampliar las aplicaciones de estas aleaciones en la industria automotriz y aeroespacial del país.

De igual forma, en el campo de la nanotecnología, la síntesis y funcionalización de nanopartículas de compuestos de magnesio, se está estudiando con miras a su aplicación en tratamientos clínicos, que empleando compuestos bioabsorbibles e inoocuos para el organismo, puedan cumplir una función en el tratamiento de diferentes afecciones tanto cutáneas como internas del ser humano [50].

Estos últimos estudios se encuentran en etapas preliminares pero los resultados obtenidos hasta el momento son bastante alentadores y se trabaja conjuntamente con investigadores de otros países en la comprobación de la potencialidad de este tipo de materiales en procesos y productos comerciales.

Conclusiones

- El magnesio y sus aleaciones ofrecen una gran variedad de propiedades que potencializan su uso para diferente tipo de aplicaciones, pudiendo ser útiles para reemplazar materiales cuando se requiere baja densidad o altas propiedades mecánicas, entre otras características.
- La modificación superficial del magnesio y sus aleaciones permite aumentar su durabilidad y su resistencia a la corrosión sin detrimento de las interesantes propiedades del material, extendiendo el abanico de aplicaciones potenciales del mismo.
- La industria del magnesio tiene gran factibilidad de ser sostenible, dado que, tanto en su extracción como en su procesamiento, se cuenta con procesos limpios y con bajo impacto ambiental.
- El uso de aleaciones de magnesio, ha venido en continuo aumento en particular desde principio de este siglo, encontrándose en una gran variedad de implementos de uso diario de alto valor agregado, lo cual se puede considerar como una oportunidad para el desarrollo de la industria nacional alrededor de este metal con un atractivo potencial exportador.
- El país cuenta con investigadores trabajando en el estudio y desarrollo de procesos con aleaciones de magnesio, lo cual puede servir de apoyo al desarrollo de esta industria gracias a la disponibilidad de recurso humano formado en el tema y a acceso a conocimiento localmente.

Bibliografía

- [1] Bell, T., Learn about magnesium, 2017. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: <https://www.thebalance.com/metal-profile-magnesium-2340142>.
- [2] USGS Mineral Resources Program. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available: <https://minerals.usgs.gov/>.
- [3] International Magnesium Association. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available: <http://www.intlmag.org/>.

- [4] Polmear, I.J., *Light alloys: Metallurgy of the light metals*, Third. Londres: J. Wiley & Sons, 1995.
- [5] Kainer, K.U. Ed., *Magnesium alloys and technology*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [6] Shaw, B.A., *Corrosion resistance of magnesium alloys*, ASM Handb., vol. 13, pp. 692-696, 2003.
- [7] Peloubet, J.A., *Machining magnesium*, Magnesium Technology Centre, Swinton, Manchester, 2012.
- [8] China Magnesium Corporation, *The Pidgeon Process*, 2011. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available: <http://www.chinamagnesiumcorporation.com/our-business/the-pidgeon-process>.
- [9] Mihriban, M.O., Pekgülyüz, O., Kainer, K.U. and Kaya, A.A., *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. 2013.
- [10] Abdel-Aal, H.K., *Prospects for the role of magnesium in solar-hydrogen energy-system*, Science Direct, 40(3), pp. 1408-1413, 2014.
- [11] Wilkomirsky, I., *Metalurgia extractiva de metales no ferrosos*, 2009.
- [12] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. *Subdirección de Planeación Minera. Mercado de los insumos minerales para la producción de fertilizantes*, 2003. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: www.upme.gov.co/mineria/EstudiosYAnalisisSectoriales/MineralesFertilizantesColombia.pdf.
- [13] Vital Signs Online. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: <http://vital Signs.worldwatch.org/>.
- [14] Monteiro, W.A., Buso, S.J. and Da L.V., *Application of magnesium alloys in transport*, in *New Features on Magnesium Alloys*, InTech, 2012.
- [15] Vormann J., *Magnesium: Nutrition and metabolism*, Mol. Aspects Med., 24(1-3), pp. 27-37, 2003.
- [16] Homayun, B. and Afshar, A., *Microstructure, mechanical properties, corrosion behavior and cytotoxicity of Mg–Zn–Al–Ca alloys as biodegradable materials*, J. Alloys Compd., 607, pp. 1-10, 2014.
- [17] Jang, Y., Tan, Z., Jurey, C., Collins, B., Badve, A., Dong, Z., Park, C., Kim, C.S., Sankar, J. and Yun, Y., *Systematic understanding of corrosion behavior of plasma electrolytic oxidation treated AZ31 magnesium alloy using a mouse model of subcutaneous implant*, Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl., 45, pp. 45-55, 2014.
- [18] Song, G., *Control of biodegradation of biocompatible magnesium alloys*, Corros. Sci., 49(4), pp. 1696-1701, 2007.
- [19] Luthringer, B.J.C., Feyerabend, F. and Willumeit-Römer, R., *Magnesium-based implants: A mini-review*, Magnesium Research, 27(4), pp. 142-154, 2014. DOI: 10.1684/mrh.2015.0375
- [20] Shimizu, Y., Yamamoto, A., Mukai, T., Shirai, Y., Kano, M., Kudo, T., Kanetaka, H. and Kikuchi, M., *Medical application of magnesium and its alloys as degradable biomaterials*, Interface Oral Heal. Sci., pp. 318-320, 2009.
- [21] Brown, B.K., *Wheelchairs & Assistive Devices | CURRENT Diagnosis & Treatment: Physical Medicine & Rehabilitation | AccessMedicine | McGraw-Hill Medical*, 2014. [Online]. [Accessed: 15-Sep-2017]. Available at: <https://accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1180§ionid=70383529>.
- [22] *Electronic Applications - International Magnesium Association*. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: http://intlmg.site-ym.com/?page=app_electronic_ima.
- [23] *Magnesium applications - International Magnesium Association*. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: http://www.intlmg.org/page/mg_applications_ima.
- [24] CNR COP, *Producción de magnesio*. [en línea]. [consultado en: 11-Sep-2017]. Disponible en: <http://www.cnr-cop.es/gc/iniciativas-no-gubernamentales/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/procesos-termicos-de-la-industria-metalurgica-no-mencionados-e>.
- [25] Rauch S., *Rauch fertigungstechnik: Low-pressure casting Al | Mg*. [Online]. [Accessed: 11-Sep-2017]. Available at: <http://www.rauch-ft.com/en/non-ferrous-metals/low-pressure-casting-al-mg/>.
- [26] O'Donnel, R.L., *Advanced thixotropic metallurgy, a revolution in casting technology*, Die Cast. Eng., 49(1), pp. 50-54, 2005.
- [27] *Meridian Lightweight Technologies: Magnesium automotive solutions*. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: <http://www.meridian-mag.com/>.
- [28] Talha, M., Behera, C.K. and Sinha, O.P., *A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications*, Mater. Sci. Eng. C, 33(7), pp. 3563-3575, 2013.
- [29] Zhu, Y., Yang, K., Cheng, R., Xiang, Y., Yuan, T., Cheng, Y., Sarmento, B. and Cui, W., *The current status of biodegradable stent to treat benign luminal disease*, Mater. Today, May 2017.
- [30] Tan, L., Yu, X., Wan, P. and Yang, K., *Biodegradable materials for bone repairs: A review*, J. Mater. Sci. Technol., 29(6), pp. 503-513, 2013.
- [31] Liu, C.L., Wang, Y.J., Zeng, R.C., Zhang, X.M., Huang, W.J. and Chu, P.K., *In vitro corrosion degradation behaviour of Mg–Ca alloy in the presence of albumin*, Corros. Sci., 52(10), pp. 3341-3347, 2010.
- [32] Witte, F., Fischer, J., Nellesen, J., Crostack, H.-A., Kaese, V., Pisch, A., Beckmann, F. and Windhagen, H., *In vitro and in vivo corrosion measurements of magnesium alloys*, Biomaterials, 27(7), pp. 1013-1018, 2006.
- [33] Abidin, N.I.Z., Da Forno, A., Bestetti, M., Martin, D., Beer, A. and Atrons, A., *Evaluation of coatings for Mg alloys for biomedical applications*, Advanced Engineering Materials, 17(1), pp. 58-67, 2014. DOI: 10.1002/adem.201300516
- [34] Hussein, R.O., Nie X. and Northwood, D.O., *An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing*, Electrochim. Acta, 112, pp. 111-119, 2013.
- [35] Ghasemi, A., Raja, V.S., Blawert, C., Dietzel, W. and Kainer, K.U., *The role of anions in the formation and corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation coatings*, Surf. Coatings Technol., 204(9-10), pp. 1469-1478, 2010.
- [36] Peibo, S., Xiaohong, W. and Zhaohua, J., *Plasma electrolytic oxidation of a low friction casting on ZK60 magnesium alloy*, Mater. Lett., 62(17-18), pp. 3124-3126, 2008.
- [37] Pezzato, L., Brunelli, K., Gross, S., Magrini, M. and Dabalà, M., *Effect of process parameters of plasma electrolytic oxidation on microstructure and corrosion properties of magnesium alloys*, J. Appl. Electrochem., 44(7), pp. 867-879, 2014.
- [38] Stojadinović, S., Vasilčić, R., Petković, M., Kasalica, B., Belča, I., Žekić, A. and Zeković, L., *Characterization of the plasma electrolytic oxidation of titanium in sodium metasilicate*, Appl. Surf. Sci., 265, pp. 226-233, 2013.
- [39] Mori, Y., Koshi, A., Liao, J., Asoh, H. and Ono, S., *Characteristics and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31B Mg alloy formed in phosphate – Silicate mixture electrolytes*, Corros. Sci., 88, pp. 254-262, 2014.
- [40] Liu, Y., Yang, F., Zhang, Z. and Zuo, G., *Plasma electrolytic oxidation of AZ91D magnesium alloy in biosafety electrolyte for the surgical implant purpose*, Russ. J. Electrochem., 49(10), pp. 987-993, 2013.
- [41] Aliasghari, S., Skeldon, P. and Thompson, G.E., *Plasma electrolytic oxidation of titanium in a phosphate/silicate electrolyte and tribological performance of the coatings*, Appl. Surf. Sci., 316, pp. 463-476, 2014.
- [42] Hornberger, H., Virtanen, S. and Boccaccini, A.R., *Biomedical coatings on magnesium alloys - a review*, Acta Biomater., 8(7), pp. 2442-2455, 2012.
- [43] Dong, H., *Surface engineering of light alloys*. CRC Press, 2010.
- [44] Carter, V. E., *Metallic coatings for corrosion control*, First. London, Butterworth & Co, 1977.
- [45] Mallory, G.O. and Hajdu, J.B., *Electroless plating -fundamentals and applications*. William Andrew Publishing/Noyes, 1990.
- [46] Correa, E., Zuleta, A.A., Guerra, L., Gómez, M.A., Castaño, J.G., Echeverría, F., Liu, H., Baron-Wiecheć, A., Hashimoto-Skeldon, T.P., and Thompson, G.E., *Coating development during electroless Ni-B plating on magnesium and AZ91D alloy*, Surf. Coatings Technol., 232, pp. 784-794, 2013.
- [47] Zuleta, A.A., Correa, E., Sepúlveda, M., Guerra, L., Castaño, J.G., Echeverría, F., Skeldon, P. and Thompson, G.E., *Effect of NH₄HF₂ on deposition of alkaline electroless Ni–P coatings as a chromium-free pre-treatment for magnesium*, Corros. Sci., 55, pp. 194-200, 2012.
- [48] Calderón, J.A., Jiménez, P.J. and Zuleta, A.A., *Improvement of the erosion-corrosion resistance of magnesium by electroless Ni-*

- P/Ni(OH)₂-ceramic nanoparticle composite coatings, Surf. Coatings Technol., vol. In Press, 2016.
- [49] Correa, E., Zuleta, A.A., Guerra, L., Gómez, M.A., Castaño, J.G., Echeverría, F., Liu, H., Skeldon, P. and Thompson, G.E., Tribological behavior of electroless Ni-B coatings on magnesium and AZ91D alloy, Wear, 305(1-2), pp. 115-123, 2013.
- [50] Udhayakumar, G., Muthukumarasamy, N., Velauthapillai, D., Santhosh, S.B. and Asokan, V., Magnesium incorporated hydroxyapatite nanoparticles: Preparation, characterization, antibacterial and larvicidal activity, Arab. J. Chem., Jun. 2016. DOI: 10.1016/j.arabjc.2016.05.010

L. Berrio, es MSc. en Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia – UdeA. Actualmente pertenece al Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA
ORCID: 0000-0001-5104-3084.

M. Echeverry-Rendon, Dr. Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. MSc. en Biología, 2012, Universidad de Antioquia. Pregrado en Bioingeniería, 2007 de la Universidad de Antioquia. En la actualidad pertenece al Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
ORCID: 0000-0002-7452-0987

E. Correa, es Dr. en Ingeniería en 2013, Universidad de Antioquia. Con pregrado en Ingeniería de Materiales 2008 de la Universidad de Antioquia. Actualmente del Grupo de Investigación Materiales con Impacto – MAT&MPAC, Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín.
ORCID: 0000-0003-3837-8992

A.A Zuleta, Dr. en Ingeniería 2013, Universidad de Antioquia. MSc. en Ingeniería 2009, Universidad de Antioquia, pregrado en Ingeniería de Materiales 2005, Universidad de Antioquia. Actualmente Grupo de Investigación de Estudios en Diseño - GED, Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana.
ORCID: 0000-0002-5431-2603

S. Robledo, es PhD en Biología Celular y Molecular 2008, Washington University in Saint Louis, USA. Dr. en Ciencias: Inmunología en 1998 Universidad de Antioquia, MSc. en Microbiología 1996 de la Universidad del Valle. Pregrado en Bacteriología y Laboratorio Clínico 1987, Universidad de Antioquia. Actualmente pertenece al Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales PECET, Instituto de Investigaciones Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia UdeA.
ORCID: 0000-0003-2752-4931.

J.G. Castaño, Dr. en Ciencias Químicas, 2002, de la Universidad Complutense de Madrid, España. Pregrado en Ingeniería de Materiales 1995, de la Universidad de Antioquia. Actualmente Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
ORCID: 0000-0002-7972-8293

F. Echeverría, Dr. en Corrosión 1995, de University of Manchester Institute of Science and Technology. MSc. en Metalurgia 1995, de la Universidad Industrial de Santander. Pregrado en Ingeniería Metalúrgica 1992, de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Actualmente pertenece al Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
ORCID: 0000-0002-3767-5170



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomina_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 53 68