

Crecimiento de cuasicristales, la simetría prohibida

Mauro Velasco Castro, Miguel Ángel Suárez, Ignacio A. Figueroa, Carlos Flores Morales

Nanopartículas de Silicio: un nuevo horizonte para la detección y tratamiento del cáncer

Ateet Dutt, Guillermo Santana-Rodríguez, Estrella Ramos y Jorge Gutiérrez-Flores

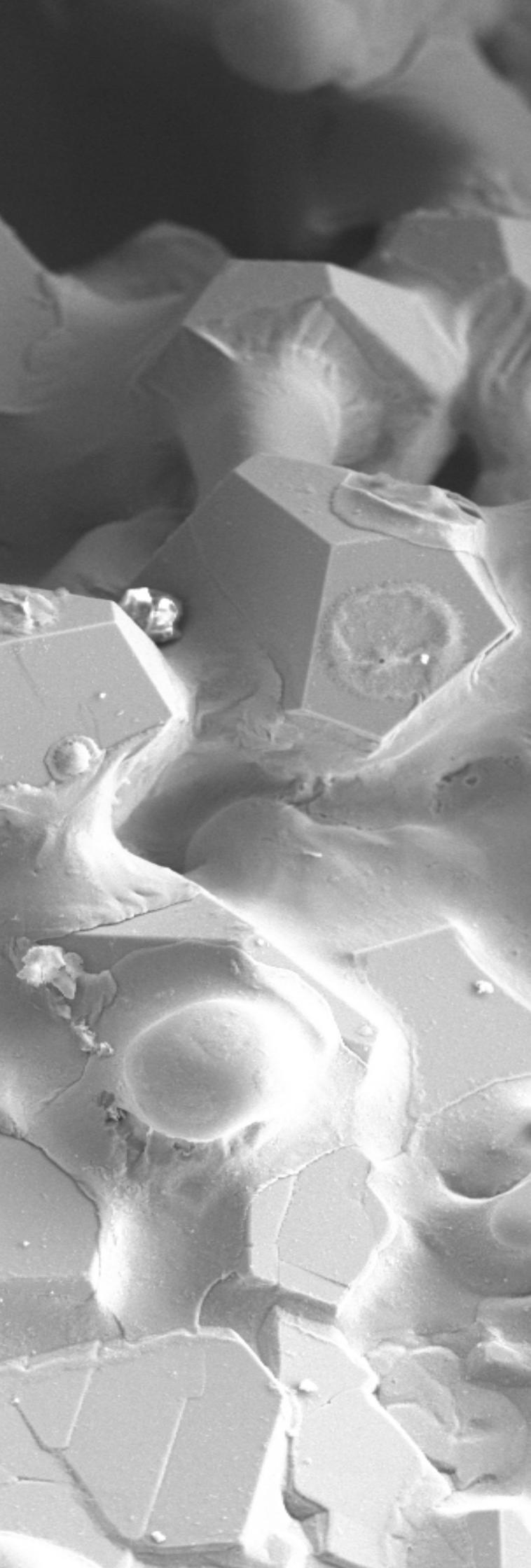
Espumas Metálicas y sus aplicaciones

Gabriel Ángel Lara R., Ignacio A. Figueroa Vargas, Omar Novelo Peralta

Forjadores de la Historia: Max Planck, ascenso y caída

Jorge Gutiérrez-Flores y Estrella Ramos





Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Enrique Luis Graue Wiechers

Rector

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

Secretario General

Dr. William Henry Lee Alardín

Coordinador de la Investigación Científica



Instituto de Investigaciones en Materiales

J. Israel Betancourt Reyes

Director

Estrella Ramos Peña

Editor Responsable

Comité Editorial

Larissa Alexandrova

Patricia Guadarrama Acosta

Ilich A. Ibarra Alvarado

Francisco Morales Leal

Guillermo Santana Rodríguez

Diego Solís Ibarra

Producción

Editorial IIM

Editor Científico: Estrella Ramos Peña

Edición Digital: Alberto López Vivas

Los editores autorizan la reproducción de los artículos que se publican en Materiales Avanzados siempre y cuando se cite la fuente.

Editorial

Materiales Avanzados, Publicaciones UNAM, es una publicación semestral del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Editor Responsable: Estrella Ramos Peña. Reserva de derechos al uso exclusivo del título ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública 04-2003-041612533600-102. Certificado de licitud de título 12619, Certificado de licitud de contenido 10191, expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1665-7071.



A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters 'ER' followed by a long horizontal stroke.

Estrella Ramos / Editora

Presentación

Materiales Avanzados es una publicación arbitrada de divulgación científica. Está dedicada a la difusión de trabajos que promueven el quehacer científico buscando alcanzar un nivel de comprensión general sobre temas relacionados con la ciencia e ingeniería de materiales. La revista es el resultado de la participación de todos los miembros de la comunidad del IIM.

En su número 27 da espacio a la publicación de algunos de los trabajos ganadores del concurso a los mejores trabajos presentados en el Simposio de Estudiantes IIM 2016.

La revista está estructurada de la siguiente manera: Iniciamos con la reseña del libro *Un mundo Finito*, escrito por el científico Carlos Amador Bedolla, un texto interesante que toca un tema de actualidad y de interés mundial. Continuamos con la presentación de la sección de noticias, que en esta ocasión toca diferentes temas alrededor de la ciencia de materiales.. Seguimos con la

presentación de la sección Forjadores de la Historia, que presenta la biografía de Max Planck, padre de la teoría cuántica y uno de los pilares de la física moderna. En la siguiente sección presentamos cuatro artículos de divulgación científica alrededor de diferentes temas: el primero es un artículo premiado en el Simposio de Estudiantes IIM 2016, trata sobre las propiedades mecánicas y estructurales de hidrogeles híbridos de quitosano y alcohol polivinílico. Además, se presentan dos fotografías premiadas en el mismo simposio. El siguiente artículo trata sobre un tipo de material con interesantes propiedades estructurales, térmicas y acústicas: las espumas metálicas. Finalmente, terminamos con un artículo que habla de una aplicación del silicio como acarreador de fármacos.

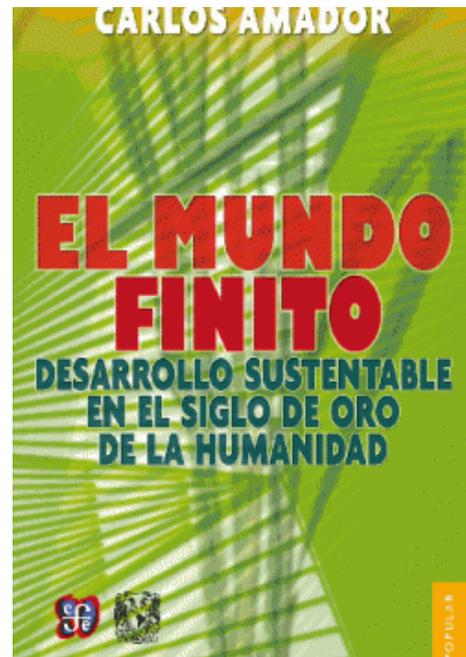
Esperamos que este número de la revista sea de su agrado.

Comité Editorial de la Revista Materiales Avanzados

Índice

01. Presentación en la página 3

02. Reseña de libro El Mundo Finito. Desarrollo Sustentable en el Siglo de Oro de la Humanidad. Carlos Amador Bedolla en la página 6

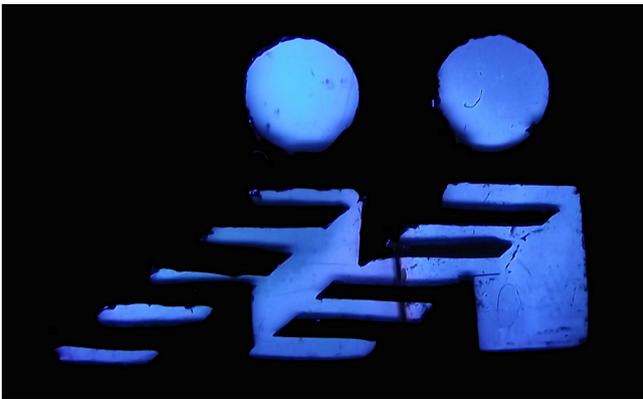


03. Noticias en la página 7

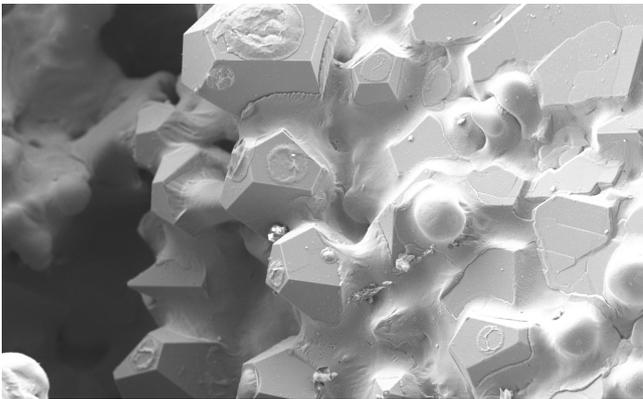


04. Forjadores de la Historia: Max Planck, ascenso y caída, Jorge Gutiérrez-flores y Estrella Ramos en la página 12

05. Influencia de Agentes Entrecruzantes Naturales y Sintéticos sobre las Propiedades Mecánicas y Estructurales de Hidrogeles Híbridos de Quitosano y Poli(Alcohol Vinílico), Marisol Garnica-Palafox y Francisco, M. Sánchez Arévalo en la página 16



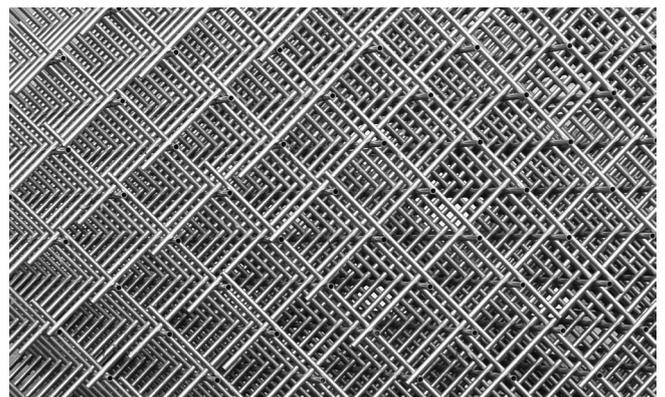
06. Imagen: Películas delgadas semiconductoras impurificadas con centros luminiscentes, Angélica Carrillo Verduzco en la página 20



07. Imagen: Crecimiento de cuasicristales, la simetría prohibida , Mauro Velasco Castro, Miguel Ángel Suárez, Ignacio A. Figueroa, Carlos Flores Morales en la página 22

08. Espumas Metálicas y sus aplicaciones, Gabriel ángel Lara R., Ignacio A. Figueroa Vargas, Omar Novelo Peralta en la página 24

09. Nanopartículas de Silicio: un nuevo horizonte para la detección y tratamiento del cáncer, ateeet Dutt*, Guillermo Santana-Rodríguez, Estrella Ramos y Jorge Gutiérrez-Flores en la página 28



Reseña

El Mundo Finito Desarrollo Sustentable en el Siglo de Oro de la Humanidad Carlos Amador Bedolla

Por Estrella Ramos

“La medida más obvia del éxito biológico de una especie es el número de sus ejemplares” ... “Los 6800 millones de personas que actualmente habitamos el planeta somos, con mucho, la mayor población humana de la historia. Nuestro éxito biológico es indiscutible...” Así inicia Carlos Amador la invitación a la conciencia en este libro. Continúa dando apabullantes datos acerca de la esperanza de vida del ser humano, de la tasa de analfabetismo global y demás señales que muestran el aparente progreso de la civilización. No mucho más adelante el autor escribe una frase contundente: “En un mundo con límites, nada puede crecer indefinidamente”. Esta es la primera impresión que tiene el lector acerca del contenido del libro. Escrito con elegancia y un total dominio del español, es un libro que habla de nuestra sociedad, de la civilización, del petróleo, del cambio climático, de la responsabilidad moral de la ciencia como herramienta de control, en resumen, nos muestra un panorama sobre la viabilidad del estado actual de la humanidad como sociedad y como especie. Pero no todo es fatalismo, Carlos Amador da alternativas “*Es-tación Esperanza*” como él llama al proyecto, proporciona una vía de acción que combina las posibilidades de la ciencia, la tecnología y, por supuesto, la educación: La granja de generación de energía y la escuela de formas de vida sustentables.



Dr. Carlos Amador Bedolla

El libro termina con un epílogo en el que sentencia duramente que el estado actual de la humanidad --nuestra civilización, nuestra alimentación, nuestros usos y costumbres- va a cambiar radicalmente en los próximos lustros. ... La energía, el agua y el alimento volverán a ser bienes preciados cuyo desperdicio será impensable. La naturaleza volverá a ser hostil. El lugar, en este mundo, de los bienes más preciados de la modernidad – la educación, la democracia, la igualdad, la paz—que, aunque no hayan alcanzado cobertura universal, se extendieron como nunca antes, se verá amenazado.

Sin lugar a dudas, este libro es removedor de conciencias y una excelente invitación a la reflexión de la situación actual y de un futuro caótico que se acerca vertiginosamente.

El mundo finito.

Desarrollo sustentable en el siglo de oro de la humanidad

Carlos Amador

Noticias

Más allá de cuatro enlaces

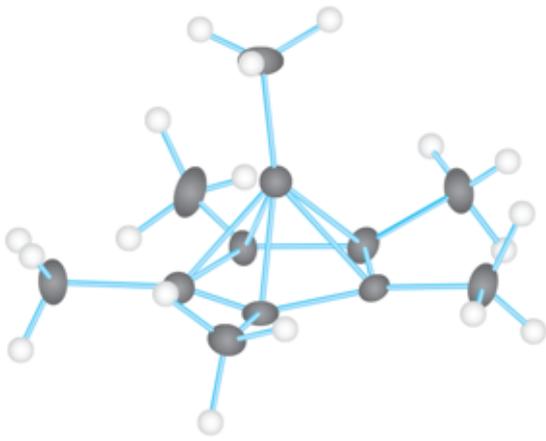


Figura: Molécula de hexametilbenceno al perder dos electrones [Imagen tomada de Science News].

Convencionalmente, se dice que entre dos átomos hay un enlace químico cuando entre ellos se comparte, al menos, un par de electrones. En nuestras primeras clases de Química nos enseñaron que el carbono tenía, con base en su configuración electrónica, cuatro electrones de valencia y que, por lo tanto, éste era capaz de formar enlaces hasta con cuatro átomos vecinos para dar lugar a estructuras con geometría tetraédrica. Recientemente, en la Universidad Libre de Berlín, un grupo de investigadores demostró que esta regla no siempre se cumple, y que un átomo de carbono puede enlazarse con más de cuatro átomos de la misma especie.

Un átomo de carbono puede enlazarse con más de cuatro átomos de la misma especie.

Aunque esta idea no es reciente, en la década de los años 70's, un grupo de científicos alemanes descubrieron y sugirieron algo inusual en la molécula de hexametilbenceno: al remover dos electrones y dejar a la molécula con carga positiva, ésta cambiaba su geometría, de tal forma que un átomo de carbono se enlazaba con otros seis. Sin embargo, fallaron en el intento de obtener datos experimentales que soportaran este cambio de geometría y es que para formar el catión de la molécula de hexametilbenceno, se necesitan condiciones ácidas fuertes. No fue sino hasta en enero de este año que Moritz Malischewski y Konrad Seppelt de la Universidad Libre de Berlín lograron optimizar el procedimiento en el laboratorio, obteniendo al fin la molécula cargada para luego cristalizarla y analizar su estructura mediante difracción de rayos X, confirmando así, después de muchos años, la reorganización de átomos para el hexametilbenceno cargado.

De acuerdo a los datos estructurales obtenidos, se encontró que un átomo de carbono que formaba parte del benceno sale del anillo, colocándose justo arriba de éste, provocando que el anillo de seis miembros se transformara en una pirámide con base pentagonal. Así, con esta nueva geometría, el átomo que cambia de posición (punta de la pirámide) logra enlazarse a seis átomos de carbono diferentes. Al determinar las longitudes de enlace, el grupo de trabajo alemán encontró que dichos enlaces eran de mayor amplitud (más débiles) que un enlace C-C convencional. Por lo tanto, mientras más vecinos tenga el átomo de carbono, de menor fuerza serán las interacciones entre los átomos enlazados.

Los enlaces formados no son como los enlaces C-C típicamente conocidos, dado que el átomo de carbono sigue contando con cuatro electrones en su capa de valencia. La interacción con seis átomos de carbono se puede deber a que el carbono central se "protege" compartiendo electrones entre todos los vecinos a los cuales se encuentra enlazados.

Este ejemplo muestra que algunas veces en la ciencia, si bien las ideas revolucionarias pueden ser planteadas, es hasta la confirmación con evidencia experimental que adquieren la relevancia y solidez necesarias para pasar a la historia. Un átomo de carbono con más de cuatro vecinos para Lewis hubiera resultado extraño; sin embargo, ahora esta idea puede ser posible.

Fuente: Science News (<https://www.sciencenews.org/article/carbon-can-exceed-four-bond-limit>)

Siendo como geckos



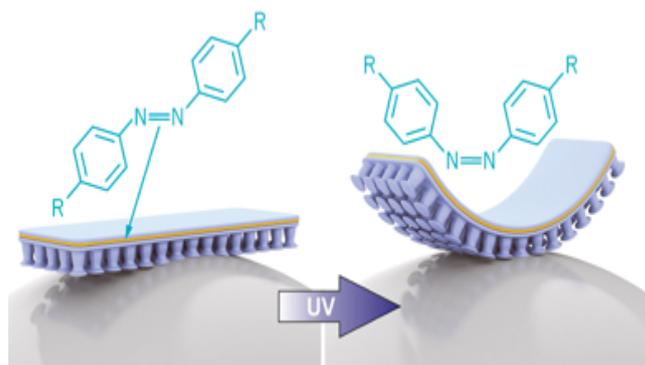
Gecko [Imagen tomada de Pinterest.com]

Un grupo de investigadores de la Universidad de Kiel, Alemania trabaja en el desarrollo de un adhesivo basado en los pies pegajosos de un animal curioso llamado gecko, a partir de un compuesto capaz de responder estructuralmente cuando éste es expuesto a radiación ultravioleta (UV).

Los geckos son pequeños reptiles (de 1.6 hasta 60 centímetros de longitud), conocidos por ser de los lagartos más coloridos del mundo, pero ¿qué los hace tan interesantes? Pues bien, estos animalitos son capaces de caminar sobre cualquier superficie, sin importar su grado de inclinación o nivel de humedad; todo esto sin dejar algún rastro de adhesivo en sus patas o sobre la zona en la cual se encuentran. ¿Cómo lo logran? Las escamas de sus patas están conformadas por alrededor de medio millón de filamentos conocidos como seate, cada uno de éstos, a su vez, se divide en cientos de nanoestructuras con forma de espátula, capaces de adaptarse a la superficie donde se posan. ¿Qué importancia tiene? Al incrementar la superficie de contacto, se permite la formación de diversas interacciones de van der Waals; que si bien de manera individual, se podrían considerar fuerzas débiles, al ser

aditivas y teniendo en cuenta que en las patas del gecko existe un número inmenso de ellas, el resultado final es la impresionante habilidad de este pequeño animal para adherirse fuertemente a cualquier espacio.

En su trabajo, Emre Kizilkan y colaboradores utilizaron superficies adhesivas previamente elaboradas, las cuales contaban con microestructuras de polidimetilsiloxano en forma de hongo para simular la adhesión de las patas del gecko. Una vez logrado esto, el siguiente reto era poder manipular el sistema de tal forma que pudieran fijar y separar su adhesivo a voluntad empleando luz.



Para lograr esta tarea, incorporaron una capa de un elastómero elástico, cristalino y líquido que contenía moléculas de azobenceno por debajo de la superficie adhesiva del sistema. El azobenceno es capaz de isomerizarse de trans a cis en presencia de luz UV, lo que provoca que las capas adhesivas se doblen, disminuyendo el contacto y, por lo tanto, desfavoreciendo las interacciones de van der Waals. El sistema vuelve a su normalidad cuando se deja de estimular con luz UV.

En resumen, al reposar sobre una superficie plana, el sistema dotado con moléculas de azobenceno es capaz de adherirse. Cuando éste es estimulado con luz UV, se dobla, perdiendo contacto y liberándose de la superficie. Kizilkan demostró que este dispositivo puede mover objetos como cuentas o láminas de cristal. También, este tipo de sistemas permitirían cargar eficientemente objetos pesados sin dejar rastro de pegamento. Interesante ¿no?

Fuente: Chemical&Engineering News

[<http://cen.acs.org/articles/95/i4/Gecko-inspired-adhesion-controlled-light.html?type=paidArticleContent>]

Premio Nobel de Química 2016

Premio Nobel de Química 2016. Un trío que construye motores y dispositivos del tamaño de una fracción de un cabello humano

El francés Jean-Pierre Sauvage, el británico Fraser Stoddart y el holandés Bernard Feringa ganaron recientemente el premio Nobel de Química por el desarrollo de minúsculas máquinas a nivel molecular, proyectando así el escenario para un nuevo tipo de industria. De acuerdo a los científicos, las máquinas moleculares podrían tener un impacto tecnológico mayor al del microchip, e incluso podrían llegar a incorporarse al cuerpo humano para realizar tareas específicas de reparación... ¡el potencial es inimaginable!

El primer descubrimiento vino de Sauvage en 1983. El químico francés logró unir dos moléculas en una cadena, satisfaciendo la exigencia de que una máquina necesita varias partes que pueden moverse una con respecto a la otra (catenanos y nudos moleculares; figura 1).



Figura 1. Nudos y catenanos moleculares que responden a estímulos externos para exhibir movimiento controlado

La aportación de Stoddart llegó en 1991, cuando creó un ensamblaje molecular (rotaxano) entre un anillo y un eje, en donde el anillo se movía a lo largo del eje de manera controlada cuando se aplicaba calor (figura 2).

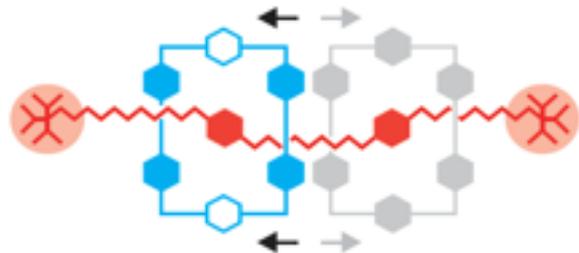


Figura 2. Vehículo molecular con movimiento a lo largo de un eje, de manera controlada

El trabajo de Feringa vino después; en 1999, y se basó en la investigación de Sauvage y Stoddart para construir el primer motor molecular del mundo, una pequeña hélice que gira continuamente sobre un eje, de manera monodireccional y por efecto de la luz (figura 3).

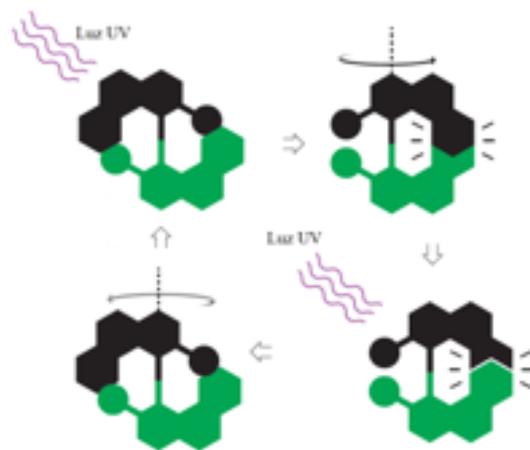


Figura 3. Rotor molecular con movimiento monodireccional conducido por luz

Poliureas que se rompen fácilmente

Las poliureas son relativamente baratas y su síntesis es sencilla, además de que presentan muy buena resistencia química, por lo cual se usan en aplicaciones que requieren durabilidad. Ying y Cheng de la Universidad de Illinois, han cambiado las propiedades de estos polímeros al diseñar y sintetizar poliureas que se hidrolizan fácilmente (J. Am. Chem. Soc. 2014, DOI: 10.1021/ja5093437). Al añadir sustituyentes voluminosos como el grupo tert-butilo en las poliureas desestabiliza la estructura de la cadena polimérica y la vuelve susceptible a la hidrólisis, haciendo que se degraden en pocos días. Pueden tener aplicaciones en la liberación de fármacos, liberación controlada y aplicaciones en donde se requiera que el polímero se rompa con facilidad. Existen otras clases de polímeros hidrolizables, pero las nuevas poliureas se sintetizan de una manera más fácil que los demás, sin catalizador o generación de subproductos. Sin embargo la toxicidad de los productos al romperse los polímeros debe ser estudiada.

Recubrimiento bimetálico de nanocubos

Al variar el grado en el cual nitrato de plata se adiciona a una solución de nanocubos de paladio, se puede controlar con precisión cuando los átomos de plata se adhieren y crecen en un, tres o los seis lados del cubo (Ang. Chem. Int. Ed., DOI 10.1002/anie.201107061). Estos nanocristales bimetálicos

son de interés por su uso en fotónica y catalizadores tándem. Xia de la Universidad de Washington dice que la deposición selectiva se lleva a cabo debido al suministro y demanda: con un índice de adición lento de AgNO_3 , la concentración de plata es muy baja, por lo que la nucleación y crecimiento está limitado a un lado del cubo. En un índice moderado, la nucleación puede propagarse a tres lados adyacentes del cristal y con un índice muy rápido es ilimitado, por lo cual la plata forma un revestimiento alrededor del cubo de paladio. Nanocristales bimetálicos se fabrican por otros métodos, pero sólo con este se tiene un control preciso de los sitios donde la nucleación heterogénea y el crecimiento ocurren. Esta metodología se puede aplicar a otros sistemas bimetálicos, dice Xia.

Por qué el agua tiene libertad de congelación

Un estudio teórico muestra que las moléculas de agua se congelan no solamente al bajar la temperatura sino debido a un reordenamiento cristalino espontáneo. El estudio ayuda a explicar el por qué el agua se mantiene líquida por debajo de su temperatura de congelación e indica que -48°C es la temperatura más baja a la que puede ocurrir el fenómeno. (Nature, DOI: 10.1038/nature10586). Usualmente una impureza o un cristal pequeño induce la cristalización. Pero en el caso de agua ultrapura y superenfriada la reestructuración molecular espontánea que inicia la cristalización en cascada ocurre demasiado rápido para una observación experimental. Molinero y Moore, de la Universidad de Utah desarrollaron un modelo computacional que muestra que cerca de la temperatura de -48°C , en moléculas de agua empieza rápidamente la formación de tetraedros que se unen a otros cuatro tetraedros, estimulando la cristalización.



Max Planck: ascenso y caída

Jorge Gutiérrez-Flores, Estrella Ramos

Seguramente en más de una ocasión has escuchado hablar de la Mecánica Cuántica, aquella extraña teoría capaz de explicar el comportamiento poco común del mundo microscópico. Esta teoría, considerada uno de los pilares más importantes de la Física Moderna, es el resultado de muchos años de esfuerzo y del trabajo de numerosos científicos; sin embargo, gran parte del avance y de los logros conseguidos por esta teoría no hubieran sido posibles sin la notable aportación de Max Karl Ludwig Planck, mejor conocido como el padre de la Teoría Cuántica.

Nacido el 23 de abril de 1858 en Kiel, Schleswig-Holstein (ahora Alemania), hijo de Julius Wilhelm Planck y Emma Patzig, Max Planck estuvo influenciado de forma importante por el ambiente académico familiar. Por una parte, su padre era profesor de Leyes en la Universidad de Kiel (posteriormente en Múnich), mientras que su abuelo y tatarabuelo fueron profesores de Teología en Göttingen; así que cuando tocó el turno a Max de iniciar su trayectoria escolar, no fue sorpresa que tuviera un notable desempeño y que además arraigara fuertemente valores como la honestidad, justicia y generosidad.

Max Planck inició su vida académica en

Kiel y más tarde, cuando su padre aceptó un puesto de profesor en la Universidad de Múnich, continuó sus estudios en el Maximilian Gymnasium (un colegio muy renombrado de la ciudad), donde tuvo sus primeros acercamientos a la física y las matemáticas. Sin embargo, a pesar de tener talento en diversas materias, al momento de graduarse, Planck no tenía idea de qué estudiar al ingresar a la universidad. Una de sus opciones fue la música; no obstante, al acercarse a un profesional de esta área y compartir sus inquietudes, éste le recomendó que estudiara algo más¹. Después de este primer desaire y un tanto desconcertado, más tarde, decidió estudiar la carrera de Física.

En el otoño de 1864, nuestro protagonista entra a la Universidad de Múnich, donde recibe opiniones poco alentadoras por parte de su profesor de física Philipp von Jolly. De acuerdo a su mentor, la Física era una ciencia casi completa por lo que había poco que hacer². Afortunadamente, Planck decidió continuar con sus estudios,

¹ ¿Hubiera sido un gran músico? Nunca sabremos, pero se sabe que mostraba grandes habilidades en el piano.

² Lo cual era erróneo. En aquel tiempo aún se buscaba una relación entre la mecánica de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell. También había una gran cantidad de experimentos y fenómenos que la Física de aquel entonces era incapaz de explicar.

a pesar del panorama lúgubre que le habían hecho creer.

Posteriormente, en una estancia realizada en la Universidad de Berlín (entre 1877 y 1878), personalidades como Hermann von Helmholtz y Gustav Robert Kirchhoff fueron profesores del joven Planck. A pesar de sentir cierta admiración hacia su trabajo, Planck quedó poco satisfecho con sus clases al considerarlas monótonas y aburridas. Gran parte de su formación académica en Berlín se debió al trabajo autodidacta realizado al estudiar de forma independiente los artículos sobre termodinámica de Rudolph Clausius. En el año de 1879, a la edad de veintinueve años, Planck regresa a Múnich y recibe el grado de doctorado, continuando con sus trabajos sobre termodinámica.

Al igual que sucede con muchos estudiantes de doctorado en la actualidad, al momento de acabar su preparación, Planck no tuvo una experiencia del todo agradable en el campo laboral, ya que en 1880 entra a trabajar como Privatdozent (profesor no remunerado) en la Universidad de Múnich, obligándolo a vivir por más tiempo con su familia, de la cual recibió, con cierta culpa, apoyo económico. Con ayuda de su padre, en el año de 1885,

Antes de ser considerado como candidato por la Universidad de Berlín, Ludwig Boltzmann y Heintich Hertz fueron invitados a ejercer dicho puesto, pero para fortuna de Planck, ninguno de los dos estuvo interesado.

En el mismo año de su boda, en la Universidad de Berlín fallece Kirchhoff; por lo que, en 1889, bajo la amplia recomendación de Helmholtz, Planck fue entrevistado y comienza a trabajar en dicha universidad como profesor extraordinario. En 1892, fue nombrado profesor de tiempo completo, cargo que ejerció hasta su retiro en el año de 1927; y es en este lugar donde Planck da a conocer la idea que cambiaría por completo la concepción de la Física y el mundo.

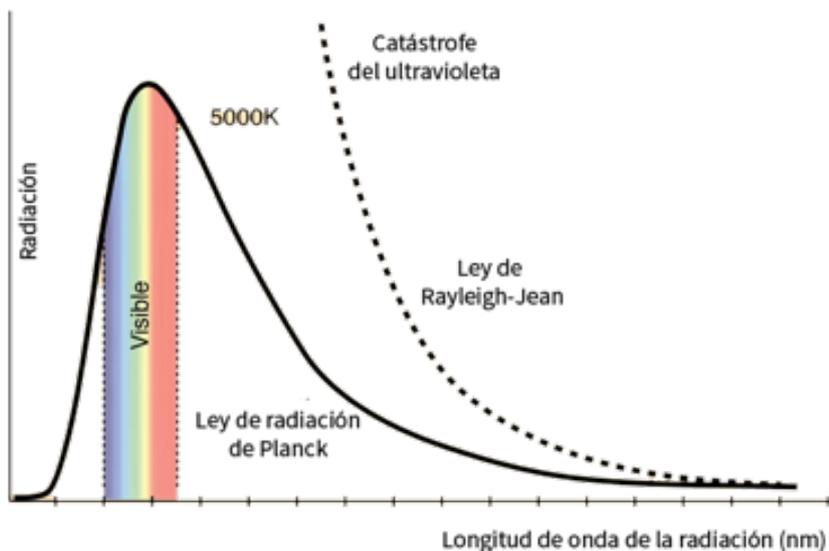
Indudablemente, en más de una ocasión, has volteado a ver al cielo nocturno para contemplar las estrellas, esos cuerpos celestes que se encuentran a altas temperaturas y que emiten algún tipo de radiación (razón por la cual las vemos y somos capaces de estudiarlas). Pues bien, todos los

objetos son capaces de emitir radiación; sin embargo, la intensidad de esta emisión depende de la temperatura a la que se encuentre el objeto en cuestión. En los tiempos de Planck, los científicos estaban interesados en describir cómo es que emitía radiación un objeto muy peculiar: un cuerpo negro. De acuerdo a Kirchhoff, este objeto era un sistema capaz de absorber y emitir radiación de forma perfecta, es decir, la radiación que absorbía era la misma radiación que emitía, sin pérdida alguna. A través de diversas aproximaciones experimentales para simular un cuerpo negro, numerosos datos fueron obtenidos por lo que la tarea ahora fue tratar de entender, interpretar y reproducir la información encontrada. Dos casos famosos en conseguir una expresión matemática capaz de reproducir los espectros de emisión de un

cuerpo negro fueron Wilhelm Wien y Lord Rayleigh. El primero consiguió una ecuación capaz de reproducir los espectros de emisión a frecuencias altas (pequeñas longitudes de onda) pero no a frecuencias bajas (grandes longitudes de onda); mientras que el segundo fue capaz de reproducirlos pero a frecuencias bajas pero no a frecuencias altas¹. Ocupando las expresiones de Wien y de Rayleigh, Planck fue capaz de obtener una nueva capaz de reproducir el espectro electromagnético. A esta expresión se le conoce como la ley de radiación de Planck.

¹ El error que se tenía con su expresión a frecuencias altas se le conoce como "catástrofe del ultravioleta", dado que su ecuación divergía a frecuencias correspondientes a la región del espectro electromagnético del ultravioleta.





Radiación del cuerpo negro a 5000K.
[Imagen modificada de HyperPhysics]

Planck no creía en la teoría atómica, por lo que nombra osciladores a las partículas que forman a la materia.

A pesar del éxito de su ecuación, Max Planck no estaba del todo satisfecho dado que consideraba su logro como un golpe de suerte; motivo por el cual se enfocó a re-obtener su expresión desde principios más básicos¹. Como resultado de sus esfuerzos, el 14 de diciembre de 1900, anunció su nueva propuesta, la cual consistía en lo siguiente: el material por el cual estaba hecho un cuerpo negro estaba conformado por osciladores, entes capaces de vibrar en función de la temperatura a la que se encuentre dicho objeto; por lo que la energía emitida por estas partículas estaba relacionada con el número de vibraciones (frecuencia) de éstas, es decir, a mayor frecuencia mayor energía y viceversa. Sin embargo, la energía emitida estaría restringida a ciertos valores dado que los osciladores solamente eran capaces de tener determinadas frecuencias. En otras palabras, la energía estaba cuantizada.

¹ Lo cual le costó mucho trabajo. Planck creía que la segunda ley de la Termodinámica era absoluta, pero al replantear el problema de la radiación del cuerpo negro, tomó en cuenta el enfoque estadístico de esta ley propuesto por Ludwig Boltzmann.

¿Idea revolucionaria? Claro que sí, sin embargo ¿causó gran impacto? Sería una respuesta difícil de dar, ya que esta idea fue base para el nacimiento de la Teoría Cuántica, pero en el momento en que fue planteada no causó gran revuelo en la comunidad científica, debieron pasar algunos años para que otros científicos ocuparas esta propuesta para que se entendiera su importancia. El mismo Planck no se dio cuenta de la importancia de esta idea, él lo consideró como algún tipo de ajuste, algo para llegar a los resultados deseados; ya que en realidad, no creía que la energía estuviera cuantizada (que llegara en forma de paquetes).

Los años pasaron y la idea que Planck planteó fue utilizada como base para la generación de otras teorías, por lo que en 1918 fue galardonado con el Premio Nobel de Física debido a que sus aportaciones contribuyeron al avance de la Física mediante el descubrimiento de la cuantización de la energía.

Sin embargo, no todo es miel sobre hojuelas: la vida personal de Max no fue

nada fácil. Nueve años después de haber propuesto su idea revolucionaria, en 1909 falleció su esposa Marie² con la cual tuvo cuatro hijos: Erwin, Karl, Margarete y Emma (siendo éstas dos últimas gemelas). En 1916, durante la Primera Guerra Mundial, su hijo menor Karl murió en combate y tristemente, poco tiempo después, en 1917 y 1919, mueren sus hijas Margarete y Emma, respectivamente, ambas en labor de parto. Al vivir en Berlín, Planck vio de forma directa los estragos de la Segunda Guerra Mundial: en 1944 su casa fue destruida durante un bombardeo y más tarde, hacia el final de la guerra en 1945, Erwin Planck (su hijo mayor) es asesinado por la Gestapo al ser declarado cómplice en un intento de asesinato contra Hitler. Al término de la guerra, Max Planck y su segunda esposa, Marga von Hösslin, son llevados a Göttingen, donde fallece en 1947 a la edad de 89 años.

Pese a las dificultades que vivió, Planck fue reconocido por su labor científica y por los grandes valores que poseía y que guiaron su vida. Sin importar qué tan pequeña haya sido su aportación, sus ideas fueron la base para el pensamiento de otros científicos y el inicio de una nueva para la Física. ¿La cuantización de la energía está presente en nuestras vidas cotidianas? ¡Claro! Basta con que las cosas tengan color para que las ideas de Planck estén implícitas, pero eso lo dejaremos para otra historia...

² Dos años después, en 1911 se casa con Marga von Hösslin (sobrina de Marie), con quien más tarde tiene otro hijo.

Fuentes:

-*"The Nobel Prize in Physics 1918"*. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 22 enero de 2017. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918

-*"Max Karl Ernst Ludwig Planck"*. School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews 2003. Web. 22 de enero de 2017. <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Planck.html>

-*"Max Planck"*. Encyclopædia Britannica, Inc. 2017. Web. 23 de enero de 2017. <https://global.britannica.com/biography/Max-Planck>

-*"Cuántica: guía de perplejos"* Jim Al-Khalili. Alianza Editorial. 2003.



Influencia de Agentes Entrecruzantes Naturales y Sintéticos sobre las Propiedades Mecánicas y Estructurales de Hidrogeles Híbridos de Quitosano y Poli(Alcohol Vinílico)

Garnica-Palafox I.M.^{1,2}, Sánchez Arévalo F.M.¹

¹ Departamento de Reología y Mecánica de Materiales, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM

² Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, UNAM

INTRODUCCIÓN

Los hidrogeles son redes macromoleculares reticuladas o entrecruzadas capaces de absorber grandes cantidades de líquido sin disolverse, son permeables al oxígeno, poseen una estructura suave y elástica, y presentan una baja tensión interfacial con el agua o fluidos biológicos [1]. Pueden estar compuestos por polímeros sintéticos, por polímeros naturales o bien, por una mezcla de ambos, conformando así los denominados hidrogeles híbridos.

El quitosano (CS) y el poli(alcohol vinílico) (PVA), son dos polímeros ampliamente usados en la formación de hidrogeles híbridos. El CS es un polisacárido biocompatible, biodegradable y con propiedades antimicrobianas; sin embargo, por sí solo, forma hidrogeles sumamente frágiles. Con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, se ha buscado mezclarlo con polímeros de origen sintético entre los que destaca el PVA, un polímero soluble en agua, semicristalino, altamente hidrófilo, elástico y no tóxico. Algunos autores han llevado a cabo investigaciones para entender la respuesta mecánica, térmica y biológica de la mezcla CS/PVA [2, 3], evidenciando el potencial de estos hidrogeles para ser usados como liberadores de fármacos, como andamios celulares para la regeneración de tejidos ó incluso como membranas de adsorción. No obstante, algunas de estas aplicaciones requieren mayor estabilidad en ambientes húmedos y mejores propiedades mecánicas que las que la mezcla CS/PVA puede ofrecer. Es por ello que para optimizar su uso y ampliar su gama de aplicaciones, se ha promovido el uso de diversos agentes entrecruzantes, siendo el glutaraldehído (GA) el agente frecuentemente empleado. El GA es un producto químico sintético altamente citotóxico y mutágeno, lo cual compromete la viabilidad y biocompatibilidad de los hidrogeles de CS/PVA si no reacciona por completo. Debido a ello, en este trabajo se propone el uso de genipin (GEN), un entrecruzante natural entre 5,000-10,000 veces menos citotóxico que el GA [4], como agente entrecruzante de la mezcla CS/PVA.

MÉTODOLOGÍA

Con la finalidad de comparar la eficiencia de ambos agentes entrecruzantes (GA y GEN) así como sus efectos sobre las propiedades mecánicas y estructurales de los hidrogeles de CS/PVA, tres grupos de hidrogeles híbridos en forma de membranas delgadas (CS/PVA, CS/PVA/GEN y CS/PVA/GA) fueron sintetizados mediante el método de evaporación de los disolventes o solvent casting. La concentración de los entrecruzantes, en sus respectivas disoluciones CS/PVA/GEN o CS/PVA/GA, fue de 0.05% p/v.

Una vez que las membranas se formaron, fueron caracterizadas mediante espectroscopía de infrarrojo (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), pruebas de hinchamiento y ensayos de tracción uniaxial. A través de FT-IR se buscaba confirmar el entrecruzamiento químico de la red polimérica debido al genipin o glutaraldehído y mediante DRX determinar cuantitativamente el porcentaje de cristalinidad de los hidrogeles.

Por otro lado, las pruebas de hinchamiento fueron útiles para conocer la cinética de absorción de los hidrogeles (i.e. la cantidad de líquido presente en su red polimérica como función del tiempo) y para determinar el porcentaje de agua que pueden retener una vez que se alcanza el equilibrio. En este sentido, el índice de hinchamiento es obtenido por la relación (1):

$$Q (\%) = \frac{w_f - w_0}{w_0} \times 100 \quad (1)$$

en donde Q es el porcentaje de líquido al interior de la red, w_f es el peso de la muestra hinchada a un tiempo t y w_0 el peso en seco de la misma muestra a $t = 0$, es decir, antes de ser inmersa en el líquido [5].

A través de los ensayos de tracción uniaxial evaluamos las propiedades mecánicas de los hidrogeles de CS/PVA, CS/PVA/GA y CS/PVA/GEN; estas pruebas consisten en colocar una muestra con geometría definida (también conocida como probeta) entre dos mordazas y tirar del material por un extremo mientras el otro se encuentra fijo. Conociendo la fuerza aplicada, el desplazamiento que sufre el material y las dimensiones de la probeta, es posible trazar un gráfico de esfuerzo vs. deformación (σ vs. ϵ) a través del cual se determinan propiedades mecánicas como el módulo elástico (E), el esfuerzo último a la ruptura (UTS, por sus siglas en inglés) y el porcentaje de deformación a la ruptura. La caracterización mecánica de los hidrogeles se llevó a cabo en estado hidratado y debido al comportamiento no lineal que presentaron, una vez obtenido el gráfico σ vs. ϵ , se utilizó el modelo de Ogden para ayudar a determinar su módulo elástico.

$$\sigma(\lambda) = \frac{2\mu}{\alpha} \left[\lambda^{(\alpha-1)} - \lambda^{(-\frac{1}{2}\alpha-1)} \right] \quad (2)$$

En el modelo de Ogden (2), σ es el esfuerzo (Pa), λ es la razón de elongación ($\lambda=\epsilon+1$), μ es el módulo de corte y α es un parámetro relacionado con los invariantes de deformación para materiales incompresibles [6]. El esfuerzo (σ) es calculado como $\sigma=f/A_t$, donde f es la fuerza de tensión que se le aplica a la probeta para deformarla y A_t corresponde al área transversal de la misma, es decir, el área perpendicular a la dirección de deformación. La razón de elongación, λ , corresponde a $\lambda=\epsilon+1$, donde $\epsilon=(l-l_0)/l_0$; l_0 corresponde a la distancia inicial de la zona calibrada de la probeta y l al cambio en distancia. Los parámetros μ y α son obtenidos fácilmente en Mathematica, mediante el ajuste no lineal de los datos σ vs. λ . Finalmente, tomando en cuenta que los hidrogeles pueden ser considerados materiales isotrópicos e incompresibles, el módulo elástico (E) se determina a través de la relación entre las constantes elásticas μ y E , dada por la relación (3), en donde ν representa el coeficiente de Poisson y toma un valor de 0.5 para hidrogeles [5].

$$E = 2\mu(1 + \nu) \quad (3)$$

RESULTADOS

Síntesis de los hidrogeles

En la Tabla I se presentan imágenes de los hidrogeles sintetizados y el valor de su espesor promedio; todas las membranas tuvieron un diámetro de 90 mm y su espesor fue de ~ 0.09 mm. Es posible observar que el entrecruzamiento del genipin con el CS/PVA implica un cambio de coloración de las membranas, las cuales pasan de ser translúcidas a tener un color azul oscuro y en el caso de las entrecruzadas con GA un color amarillo claro.

Tabla I. Imágenes de los hidrogeles sintetizados y su espesor correspondiente.

HIDROGEL	CS/PVA	CS/PVA/GA	CS/PVA/GEN
Espeor (mm)	0.086±0.003	0.086 ±0.003	0.080±0.002

Espectroscopía de infrarrojo (FT-IR)

Como se mencionó previamente, mediante FT-IR se buscó confirmar el entrecruzamiento químico de la red polimérica debido al GEN o al GA. De este modo, las bandas principales de los espectrogramas obtenidos (Figura 1) fueron asociadas con su grupo químico correspondiente de acuerdo con lo reportado en la literatura.

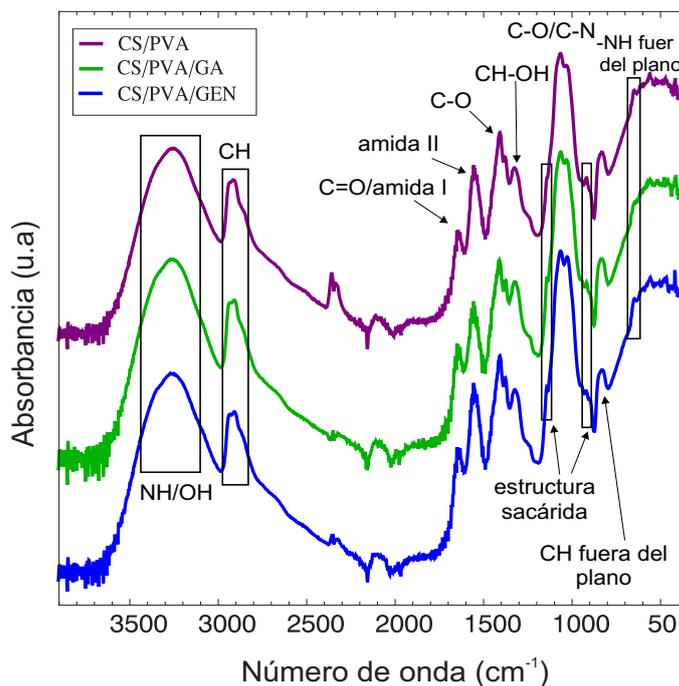


Figura 1. Espectrogramas de los hidrogeles de CS/PVA (violeta), CS/PVA/GA (verde) y CS/PVA/GEN (azul).

En el espectro violeta de la Figura 1, correspondiente a los hidrogeles de CS/PVA, la banda de absorción a 3500-3000 cm^{-1} está asociada a la vibración de los grupos -OH en el PVA, a la vibración simétrica del enlace N-H de las aminas primarias en el CS y a la formación de puentes de hidrógeno intermoleculares e intramoleculares como resultado de la interacción entre el CS y el PVA. A 1650 cm^{-1} se ubica la banda amida I, correspondiente a las amidas de las unidades acetiladas del CS (NH-C=O) y a 1570 y 640 cm^{-1} se

presenta la banda amida II, correspondiente a la flexión del grupo N-H. Finalmente, la banda a 1090 cm^{-1} corresponde a la tensión C-N y C-O de los grupos alcohol y amino presentes en el PVA y en la estructura sacárida del CS, respectivamente [2].

El espectrograma de las membranas de CS/PVA/GA (Figura 1, verde) muestra algunos cambios químicos respecto a la mezcla CS/PVA, los cuales pueden ser explicados tomando en consideración los mecanismos de reacción del GA con el CS y el PVA. De este modo, el espectrograma muestra un decremento en la intensidad de la banda a $3500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ debido al consumo de grupos -OH y -NH durante el entrecruzamiento de las cadenas de CS y/o PVA con el GA. La banda a $1090\text{-}1030\text{ cm}^{-1}$ asociada a la tensión del enlace C-O de los grupos alcohol incrementa en intensidad indicando la formación de acetales como resultado del entrecruzamiento del PVA [7]. Finalmente, la aparición de una pequeña banda a 1630 cm^{-1} indica la formación de iminas (-C=N-) debido a la reacción de las cadenas de CS con el GA.

Es sabido que el GEN únicamente reacciona con los grupos amina presentes en el CS [4], por lo que al analizar el espectrograma de las membranas de CS/PVA/GEN (Figura 1, azul) es posible apreciar un ligero decremento en la intensidad de la banda a $3500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ debido al consumo de grupos -NH durante el entrecruzamiento del CS con el GEN; no obstante, el decremento no es tan notorio debido a la formación de puentes de hidrógeno entre las cadenas de PVA [7]. La banda a $1090\text{-}1070\text{ cm}^{-1}$ asociada a la tensión del enlace C-N incrementa en intensidad indicando la formación de este tipo de enlaces durante el entrecruzamiento del CS y el GEN. Así mismo, el decremento de la banda asociada a las aminas primarias del CS (1570 y 640 cm^{-1}) y la aparición de una pequeña banda a 1630 cm^{-1} indican la formación de aminas secundarias (-NH) a expensas de las aminas primarias (NH_2) [7].

Estos resultados indican que el proceso de entrecruzamiento se llevó a cabo exitosamente entre las cadenas de CS y PVA para la mezcla CS/PVA/GA y entre las cadenas de CS para la mezcla CS/PVA/GEN.

Difracción de rayos X (DRX)

En la Tabla II se muestran los porcentajes de cristalinidad de cada grupo de hidrogeles. La mezcla pura (CS/PVA) mostró ser la menos

Tabla II. Porcentaje de cristalinidad de los hidrogeles entrecruzados

HIDROGEL	CRISTALINIDAD (%)
CS/PVA	22.7 ± 0.2
CS/PVA/GA	23.9 ± 2.6
CS/PVA/GEN	26.5 ± 6.1

Índice de Hinchamiento

Los hidrogeles usualmente presentan un comportamiento altamente hidrófilo, siendo ésta una característica importante en este tipo de materiales, de tal forma que la cantidad de líquido que son capaces de retener en su red polimérica se encuentra directamente relacionada con su comportamiento mecánico.

Los hidrogeles de CS/PVA mostraron un hinchamiento al equilibrio de 500.67% , mientras que los hidrogeles de CS/PVA/GA y CS/PVA/GEN presentaron un hinchamiento de 188.67% y 271.19% , respectivamente. Los hidrogeles entrecruzados (CS/PVA/GA y CS/PVA/GEN) mostraron un menor índice de hinchamiento que los hidrogeles de CS/PVA, debido a que gran parte de los grupos hidrófilos presentes (-OH y -NH_2) son consumidos durante el entrecruzamiento. Así mismo, el índice de hinchamiento de los hidrogeles de CS/PVA/GEN es mayor al presentado por los entrecruzados con GA debido a que en ellos únicamente se consumieron los grupos amino, dejando intactos a los grupos mas hidrófilos de la red, los -OH.

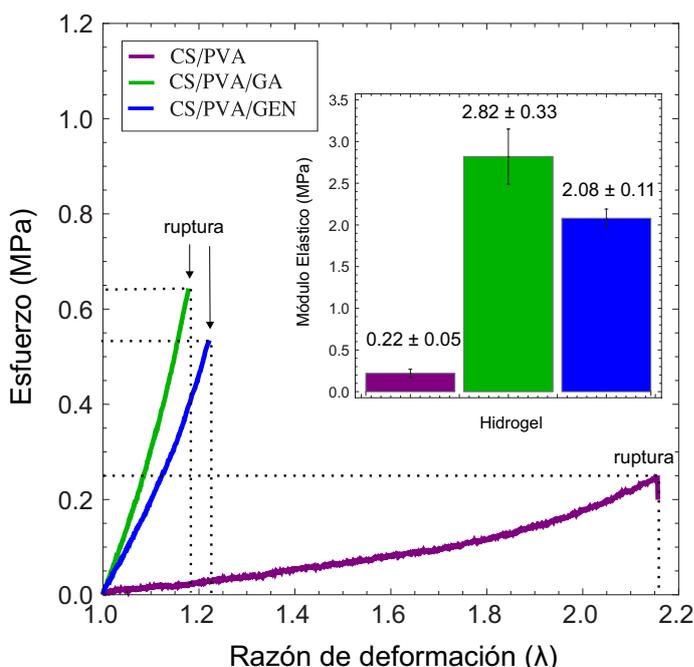


Figura 2. Respuesta mecánica de los hidrogeles de puros (CS/PVA, curva violeta) y entrecruzados (CS/PVA/GA y CS/PVA/GEN; curvas verde y azul, respectivamente). En el inset de la gráfica se muestra un comparativo del

Pruebas de tracción uniaxial

La Figura 2 muestra la respuesta mecánica bajo tracción uniaxial de los hidrogeles híbridos de CS/PVA puros y entrecruzados. Como se puede apreciar en esta Figura, y de acuerdo con los resultados previos de cristalinidad, los hidrogeles entrecruzados presentaron un menor porcentaje de deformación pero una mayor resistencia última a la tensión (UTS), lo cual se debe a la limitada movilidad de las cadenas poliméricas debido a su configuración ordenada.

En estado hidratado, la mayoría de los hidrogeles se comportan como elastómeros; lo cual significa que su comportamiento mecánico es no lineal y depende altamente de la arquitectura de su red polimérica. Así, como se discutió anteriormente, la respuesta mecánica de los hidrogeles está fuertemente relacionada con su hinchamiento y estructura cristalina; por lo que, a mayor índice de hinchamiento, menor cristalinidad, mayor porcentaje de deformación y menor módulo elástico (Tabla III). Esto se debe, en parte, a que la movilidad de las cadenas se ve reducida y como resultado de ello los hidrogeles se vuelven menos flexibles, limitan la entrada de líquido a su red e incrementan sus propiedades mecánicas (E y UTS).

En el inset de la Figura 2, se muestra un comparativo entre el módulo elástico de los hidrogeles de CS/PVA y de los hidrogeles entrecruzados (CS/PVA/GA, CS/PVA/GEN), evidenciándose que el entrecruzamiento químico de la mezcla (ya sea mediante un agente natural como el GEN o bien sintético como el GA) mejora significativamente el módulo elástico de la mezcla. De esta forma, el GA lo incrementa alrededor de 13 veces, mientras que el GEN lo hace 9.5 veces.

Tabla III. Relación entre las propiedades mecánicas y el índice de hinchamiento de las membranas.

HIDROGEL	^a Q _e (%)	^b E (MPa)	^c UTS (MPa)	Deformación (%)
CS/PVA	500.67	0.22 ± 0.05	0.24 ± 0.06	101.7 ± 18.9
CS/PVA/GA	188.67	2.82 ± 0.33	0.52 ± 0.1	14.4 ± 2.9
CS/PVA/GEN	271.19	2.08 ± 0.11	0.41 ± 0.15	16.7 ± 4.7

^a Q_e representa el índice de hinchamiento al equilibrio, ^b E el módulo elástico de los hidrogeles y ^c UTS es la resistencia última a la tensión.

CONCLUSIONES

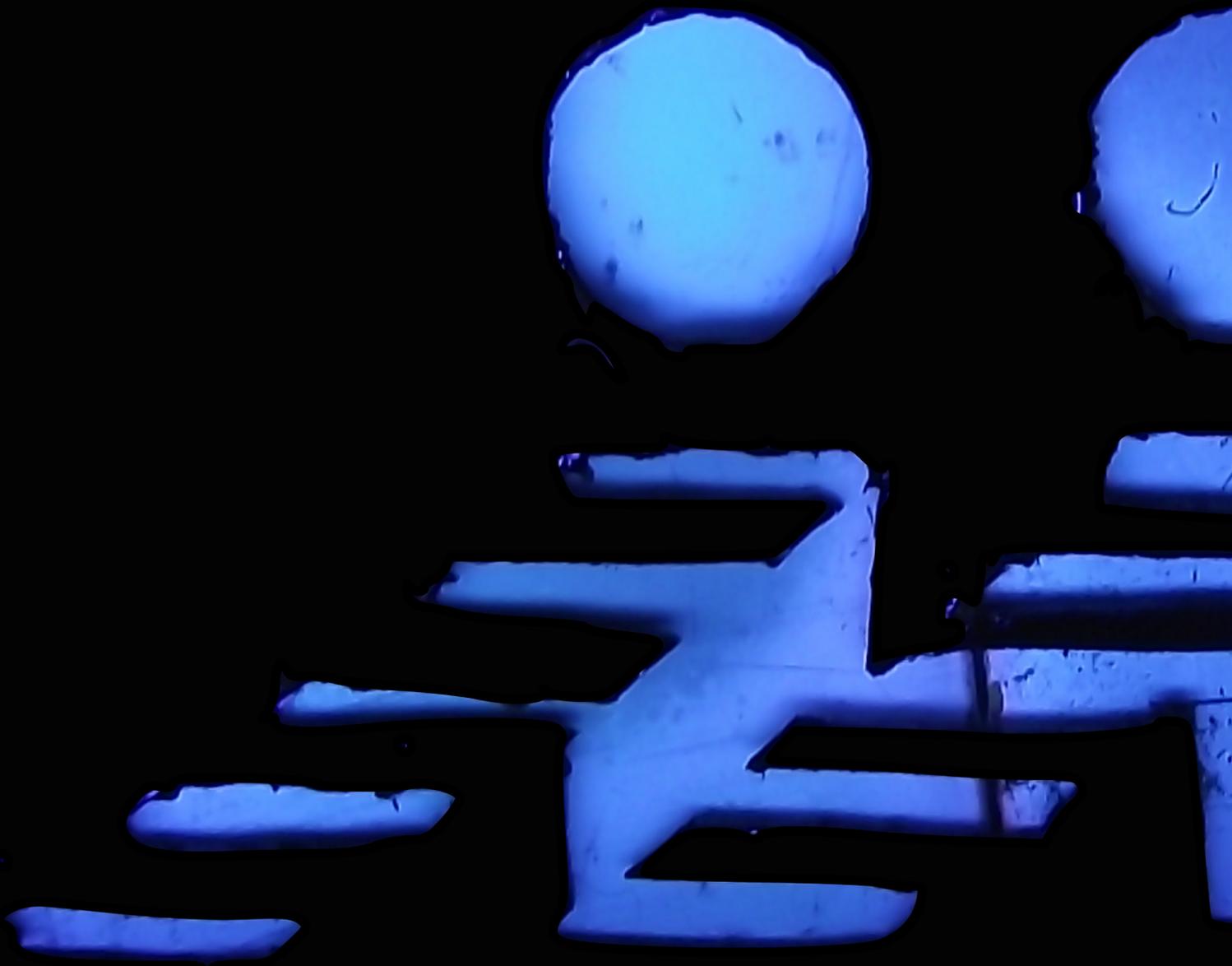
- Los hidrogeles híbridos de CS/PVA/GEN ofrecen un porcentaje de cristalinidad, UTS y porcentaje de deformación parecido al de los entrecruzados con GA .
- A pesar de que los hidrogeles de CS/PVA/GEN presentaron un módulo elástico menor, éste podría modificarse al cambiar las proporciones de los componentes de la red polimérica.
- Los hidrogeles de CS/PVA/GEN presentan un menor riesgo citotóxico por lo que podrían tener aplicaciones en ingeniería de tejidos, medicina regenerativa, liberación controlada de fármacos o agricultura.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo con recursos otorgados por el programa PAPIIT DGAPA-UNAM (IT100215). Igualmente, los autores agradecen a la M.C. Adriana Tejada por los estudios de DRX (IIM-UNAM) y al MC. Miguel A. Canseco por las mediciones de FT-IR.

REFERENCIAS

- [1] Omidian H, Park K. Introduction to Hydrogels. In: Ottenbrite RM, editor. Biomedical Applications of Hydrogels Handbook. New York: Springer Science; 2010. p. 1-16.
- [2] El-Hefian EA, Nasef MM, Yahaya AH. Preparation and characterization of chitosan/poly(vinyl alcohol) blended films: Mechanical, thermal and surface investigations. E-Journal of Chemistry. 2011;8:91-6.
- [3] Zhuang PY, Li YL, Fan L, Lin J, Hu QL. Modification of chitosan membrane with poly(vinyl alcohol) and biocompatibility evaluation. International Journal of Biological Macromolecules. 2012;50:658-63.
- [4] Chen MC, Liu CT, Tsai HW, Lai WY, Chang Y, Sung HW. Mechanical properties, drug eluting characteristics and in vivo performance of a genipin-crosslinked chitosan polymeric stent. Biomaterials. 2009;30:5560-71.
- [5] Garnica-Palafox IM, Sánchez-Arévalo FM, Velasquillo C, García-Carvajal ZY, García-López J, Ortega-Sánchez C, et al. Mechanical and structural response of a hybrid hydrogel based on chitosan and poly(vinyl alcohol) cross-linked with epichlorohydrin for potential use in tissue engineering. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition. 2014;25:32-50.
- [6] Ogden RW. LARGE DEFORMATION ISOTROPIC ELASTICITY - ON



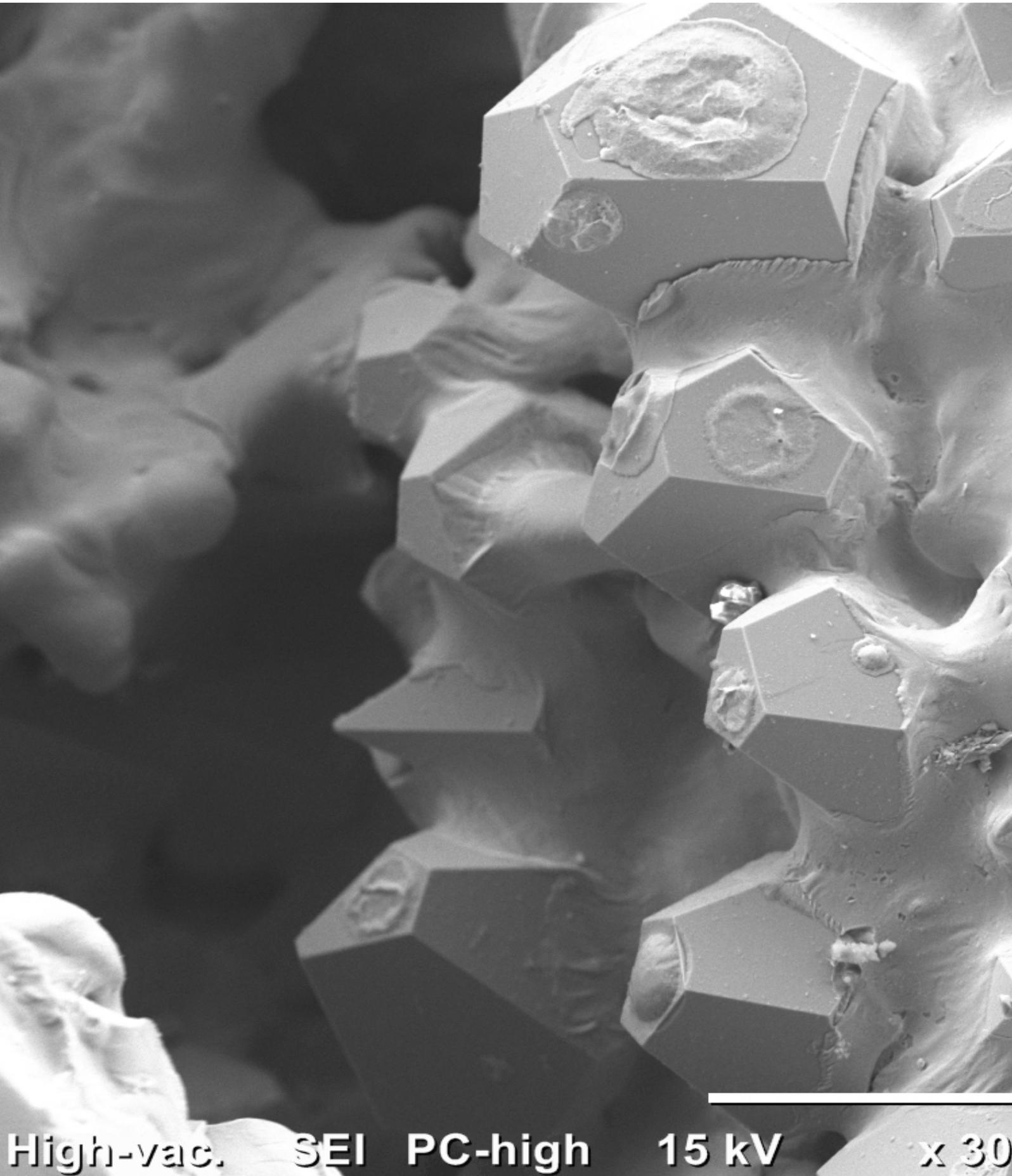
Angélica



Películas delgadas
semiconductoras
impurificadas con centros
luminiscentes obtenidas
por la técnica de rocío
pirolítico ultrasónico.

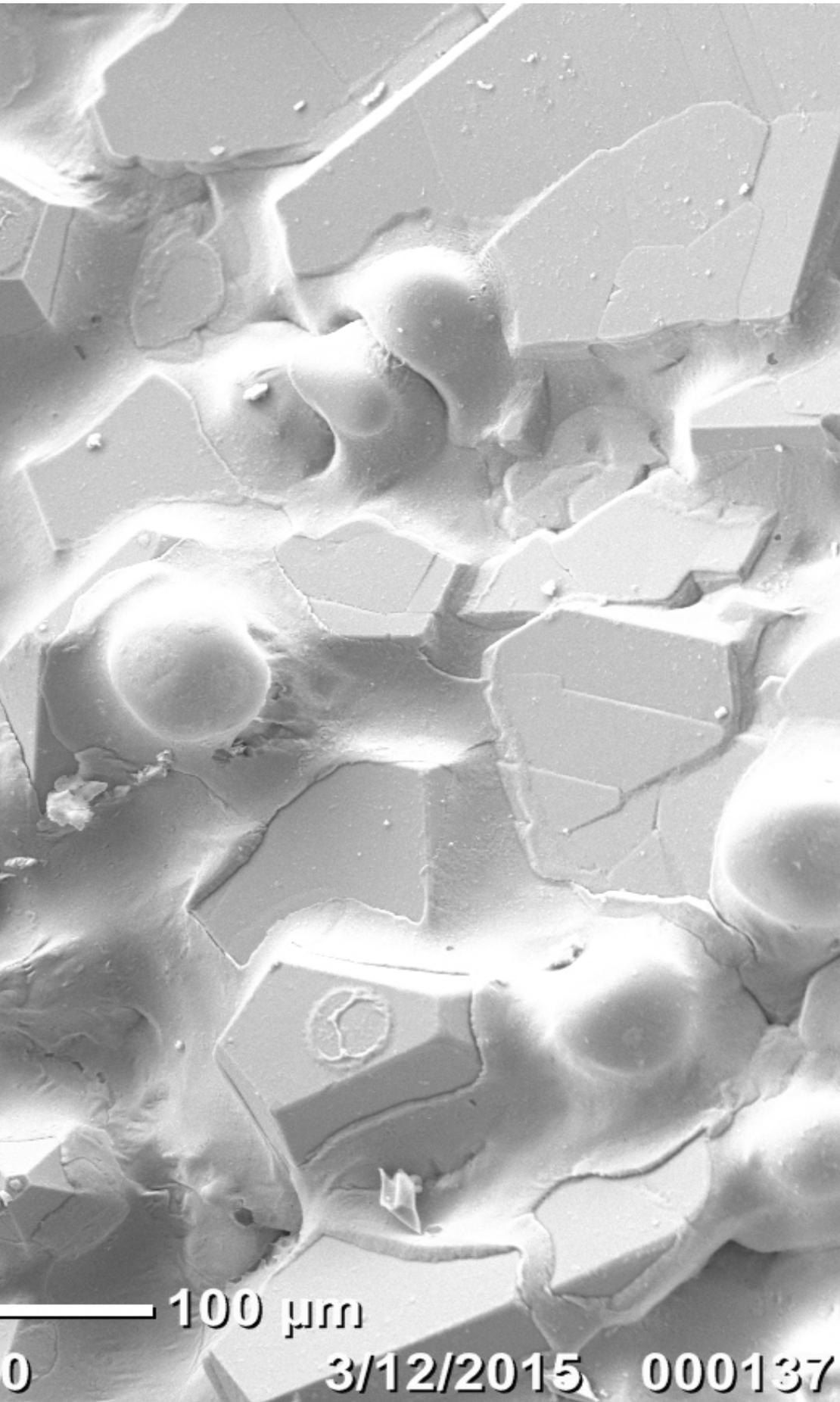
Estas películas brillan en color azul al incidir sobre ellas luz ultravioleta con una longitud de onda de 254 nanómetros.

“Crecimiento de cuasicristales, la sim



Mauro Velasco Castro, Miguel Ángel Suárez, Ignacio A. Figueroa, Carlos Flores

etría prohibida”



La imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido, muestra estructuras

icosaedrales localizadas en las celdas de una espuma de aleación Al68Cu20Fe12. La

formación de estas estructuras se llevó a cabo mediante un tratamiento térmico aplicado en

dicha aleación para generar espumas metálicas in-situ con matriz cuasicristalina. Las espumas

con estructura cuasicristalina se pueden emplear como aislantes térmicos, filtros,

absorbedores de impacto, entre otras aplicaciones estructurales.

Espumas metálicas y sus aplicaciones

Gabriel Ángel Lara R*. Ignacio A. Figueroa Vargas, Omar Novelo Peralta

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Cd. Universitaria, C.P. 04510 México, CDMX, México. e-mail: laragab@unam.mx

Las espumas metálicas representan una nueva clase de materiales que pueden ser utilizados en una gran cantidad de nuevas aplicaciones debido al conjunto de propiedades interesantes que poseen, tanto estructurales, térmicas y acústicas. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son desarrolladas en la industria automotriz y aeronáutica, donde las propiedades estructurales de las espumas metálicas tales como su capacidad de absorción de energía, colapso plástico a esfuerzo constante y su resistencia mecánica, las convierte en materiales candidatos para la fabricación de diversos componentes estructurales ultraligeros aprovechando sus propiedades de amortiguamiento mecánico. Lo anterior, permitirá construir vehículos más ligeros, obteniendo, entre otros beneficios, la reducción de consumo de combustible y emisiones contaminantes [1,2].

En los últimos años en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, se han realizado diversas investigaciones, que se han enfocado en el diseño de nuevos procesos de producción para las espumas metálicas, principalmente de aluminio y magnesio [3-5], mismos que permitan obtener características definidas de las celdas mediante el control del proceso, de manera que se puedan producir en serie espumas con una estructura homogénea y uniforme; disminuyendo su costo de producción.

1. Definición de espuma metálica.

Un sólido celular es aquel que está compuesto por una red interconectada de brazos o platos, que forman bordes y caras de lo que será definido como celda, la cual es el espacio volumétrico acotado por los elementos mencionados. Un arreglo celular puede ser bidimensional o tridimensional, figura 1. Este último caso, es definido como espuma [1].

El material sólido que constituye a un material celular tridimensional o espuma puede ser de varios tipos: polimérico, de un material metálico o cerámico. Por lo tanto, su descripción y nomenclatura también dependerá del tipo de material con el que sea fabricada la espuma [1].

Es entonces, que las espumas metálicas son materiales celulares (Figura 2), cuya fracción de sólido está constituida por un metal o aleación. Dada su naturaleza celular, llegan a presentar un conjunto de propiedades to-

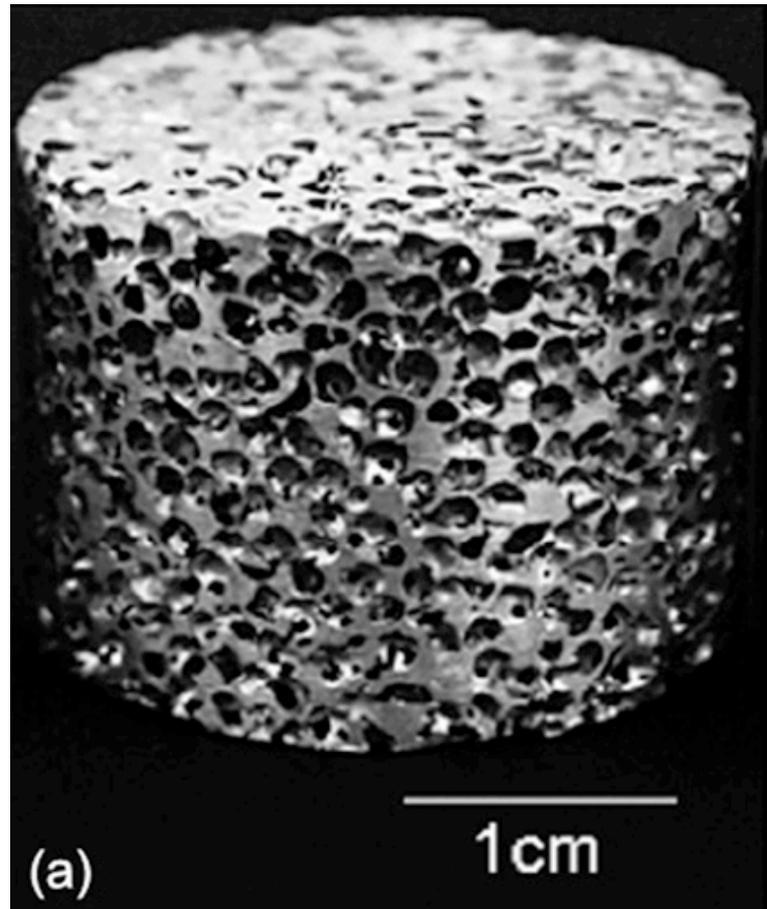


Figura 1(a). Espuma metálica de aluminio

talmente diferentes a las de un sólido convencional, como por ejemplo mayor rigidez, amortiguamiento mecánico, alta transferencia de calor, aislamiento acústico de alta eficiencia, lo anterior presentando una muy baja densidad relativa y, por ende, un bajo peso del componente o artefacto, lo que permite generar todo un nuevo campo de aplicaciones [1,5].

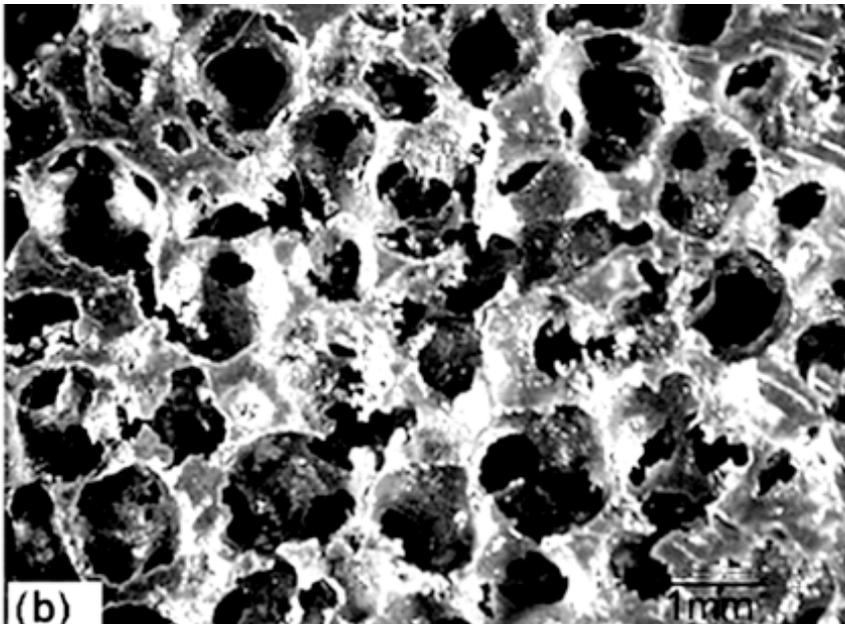


Figura 1(b) Arreglo celular correspondiente a una espuma tridimensional de celdas (poro) abierto [3].

2. Métodos de fabricación de las espumas metálicas.

Las espumas metálicas pueden ser obtenidas a partir de un metal puro o de una aleación y formar una estructura de poros abiertos o de poros cerrados. Los métodos de fabricación de las espumas metálicas se pueden clasificar en función del estado físico en el que el metal es procesado. Por ello, se definen en cuatro familias de procesos diferentes como se enuncian a continuación (ver figura. 3):

- A partir de metal líquido.
- A partir de una solución de iones de metal.
- A partir de metal sólido en forma de polvo.
- A partir de vapor de metal o compuestos metálicos gaseosos.

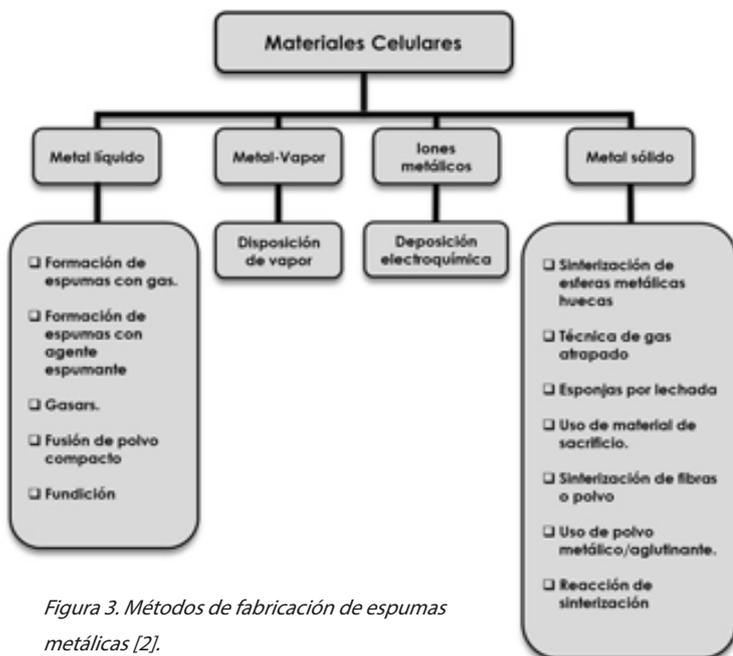


Figura 3. Métodos de fabricación de espumas metálicas [2].

3. Campo de aplicación de las espumas metálicas.

Como ya se ha mencionado, las espumas metálicas, por ser materiales de tipo celular, presentan un conjunto de propiedades y características de gran interés para diversas aplicaciones ingenieriles, tales como propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas.

Las propiedades de las espumas metálicas dependen en gran medida de su densidad, así como del tamaño, la distribución y la morfología de sus poros. Por lo tanto, el tipo de porosidad (el cual está relacionado directamente con la distribución del material sólido alrededor del mismo e indirectamente con la cantidad de poros, su forma y tamaño) de una espuma es uno de los factores determinantes para su utilidad en una determinada aplicación.

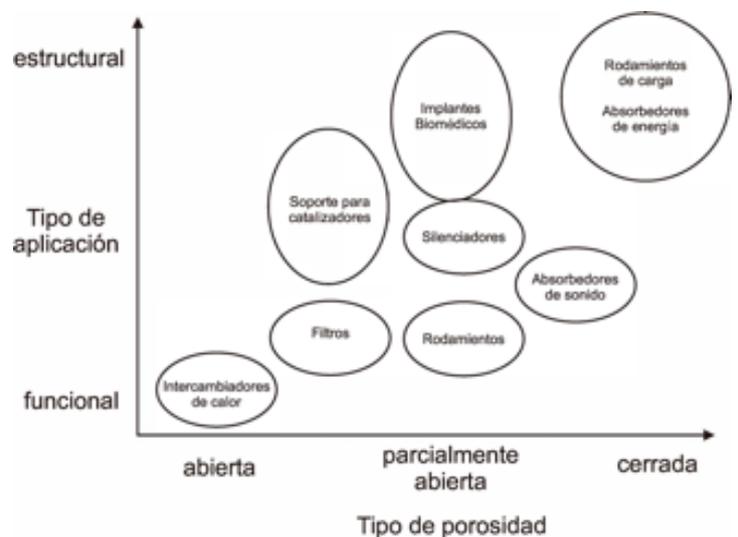


Figura 4. Diagrama de relación entre tipo de porosidad y tipo de aplicación para espumas metálicas [2].

En la figura 4, se presenta la relación entre el tipo de porosidad de las espumas y las aplicaciones correspondientes.

3.1 Aplicaciones estructurales.

En la industria automotriz, la aplicación de las espumas metálicas –principalmente de aluminio– se enfoca en los siguientes rubros: Componentes para construcción ligera, absorción de impactos, así como elementos para reducción de ruido y control de calor.

En el primer caso, el factor más crítico es la obtención de una alta rigidez con respecto a la masa del componente; lo cual permite asegurar reducción de peso sin afectar la estructura del vehículo. Empleando espumas metálicas, esto se consigue por medio de la construcción de paneles compuestos de una estructura porosa central, rodeada por dos paneles sólidos, creando una estructura tipo sándwich (ver figura 5). Para estos componentes, es necesaria la realización de un diseño para definir el espesor de las placas y la densidad de la espuma necesaria para obtener una elevada

rigidez manteniendo un bajo peso. Por ejemplo, para un componente poroso con una quinta parte de material sólido respecto al mismo componente, pero fabricado totalmente de material sólido, se predice presentará una rigidez 5 veces mayor. Naturalmente, conforme mejores sean las espumas y menores los defectos de las celdas, puede esperarse mayor rigidez y modulo elástico. Por este último motivo, el uso de espumas metálicas en paneles estructurales debe competir con estructuras convencionales con distribución de masa optimizada y realizadas por modelamiento 3D. Sin embargo, las espumas resultan una alternativa contundente debido a que son más fáciles de manufacturar [4].

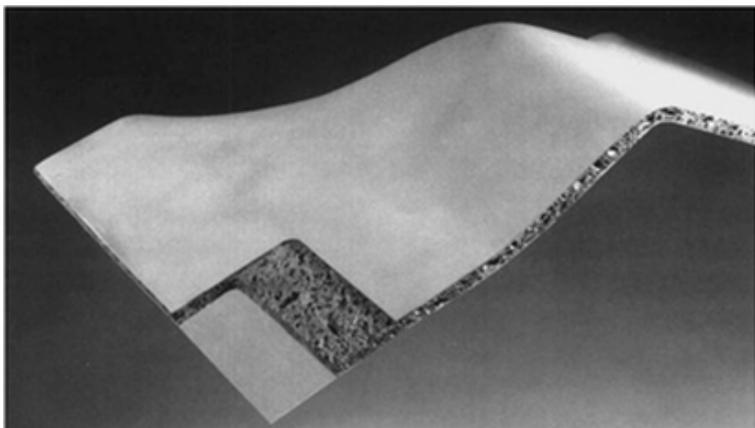


Figura 5. Panel estructural tipo "sándwich" con núcleo constituido por una espuma metálica de aluminio y rodeado por una hoja de aluminio sólido [2].

3.2 Componentes para absorción de energía.

La absorción de energía es un importante campo de aplicación para las espumas metálicas, debido a que estas pueden alcanzar grandes deformaciones al ser sometidas a un régimen de esfuerzo constante, siendo un aspecto crucial para los componentes mecánicos diseñados para absorber energía mecánica por deformación. Estos componentes deben cumplir con las siguientes características:

- Comportamiento cuasi-rectangular de la curva esfuerzo deformación (largas deformaciones a un esfuerzo cuasi constante) presentando fluencia y endurecimiento sólo después de que el esfuerzo permisible haya sido alcanzado.
- Alta capacidad de absorción de energía por volumen o por unidad de masa (Eficiencia de absorción).
- Capacidad de absorción isotrópica, de manera que el componente absorba la misma cantidad de energía sin importar la dirección del impacto.

Dentro de las investigaciones realizadas, se ha encontrado que las espumas homogéneas de aluminio pueden presentar propiedades de absorción adecuadas, ya que suelen presentar elevadas deformaciones sin incremento del esfuerzo (régimen de deformación a esfuerzo cuasi- constante ó "plateau" largo); aunque llegan a presentar un incremento residual de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación. Su comportamiento es por lo general isotrópico, a menos de que el método de fabricación genere anisotropía.

La mayoría de estas aplicaciones, emplea el uso de paneles densos para rodear el núcleo de tipo celular, ya que además de mejorar la resistencia a la corrosión, estos aumentan la capacidad de absorción energía. Estos componentes pueden emplearse en estructuras que se someten a cargas axiales [1].

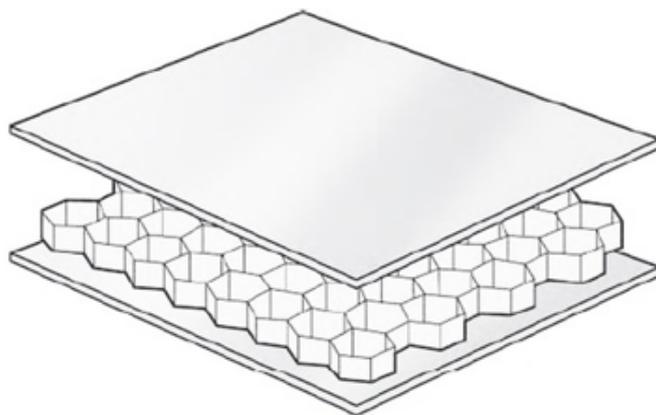


Figura 6. Estructura tipo panel (honeycomb).

En el campo aeronáutico, las aplicaciones estructurales son muy similares a las ya mostradas para la industria automotriz, donde el objetivo principal es la sustitución de costosas estructuras tipo panel (honeycomb, figura 6) por paneles de espumas de aluminio, manteniendo el desempeño de la estructura y disminuyendo su costo. Otra ventaja de los paneles de espumas de aluminio es que permiten dar soporte para la construcción de materiales compuestos (composites), sin tener que recurrir a aglutinantes para su formación. Además, estos paneles pueden ser construidos en complejas formas 3D, a diferencia de las estructuras tipo panel, las cuales están disponibles solo de formas planas. Estas estructuras con espumas metálicas, además de aluminio, pueden estar constituidas por otras aleaciones base titanio o base magnesio. Otras aplicaciones potenciales, son la construcción de componentes estructurales para turbinas (para mejorar rigidez y amortiguamiento de vibraciones) [2].

3.3 Control de ruido.

A pesar de que este campo se centra en las espumas poliméricas, existe un gran potencial para el uso de las espumas metálicas para el control de ruido. Esto debido a que su capacidad para absorber vibraciones, lo cual amortigua la transmisión de ondas de sonido. A su vez, dado su menor módulo elástico con respecto a un sólido, la frecuencia de resonancia, de la estructura o el cuerpo, se mueve hacia valores bajos; además la superficie de la espuma (sobre todo espumas interconectadas por pequeños canales) tiende a provocar una interferencia destructiva.

3.4 Aislamiento acústico y térmico.

El aislamiento acústico y térmico es un gran campo de aplicación en la industria automotriz, ya que los componentes utilizados para estos fines deben ser resistentes al calor y soportarse a sí mismos. En este rubro, las espumas metálicas de aluminio no son consideradas como aislantes acústicos altamente eficientes, sin embargo, ofrecen un desempeño suficiente, además de que son resistentes al calor de la aplicación ("paredes de fuego" en el compartimiento del motor de un automóvil) y se soportan a sí mismas sin la ayuda de un sujetador.

Por lo tanto, el control de la porosidad durante la fabricación de una espuma es un aspecto fundamental, ya que el proceso empleado deberá garantizar, principalmente, la homogeneidad de la estructura porosa, de manera que las propiedades tengan un comportamiento altamente isotrópico.

Además de las aplicaciones mencionadas en el área mecánica, las espumas metálicas tienen una amplia gama de aplicaciones en función del tipo de metal con que se fabrican, el tipo de poro abierto o cerrado, y el tipo de proceso de fabricación, abriendo así un gran campo de aplicaciones en diferentes áreas de la ingeniería, algunos ejemplos que se pueden mencionar son los siguientes: filtros para captura de CO₂, soportes de catalizadores, intercambiadores de calor, silenciadores, etc., las cuales que se basan en la gran interface de área superficial de las espumas de celda abierta.

Conclusiones.

Debido a que en el país existe un gran número industrias que trabajan con aluminio y magnesio, resulta atractiva la inversión en el rubro de las espumas metálicas por parte del sector empresarial. A nivel académico, se está despertando el interés en la investigación de estos materiales. Con base a lo anterior, en la presente publicación se abordó en forma muy general los as-

pectos más importantes en la producción de espumas metálicas. Dentro de los temas más importantes que se mencionan en esta obra fueron; los métodos de fabricación de estos materiales, y las principales aplicaciones. Cabe mencionar que existen otros puntos a considerar dentro de esta área del conocimiento, como son: las propiedades mecánicas, térmicas, acústicas, químicas, etc., sin embargo, estos temas serán tratados en una próxima publicación.

Agradecimientos.

Los autores agradecen a Adriana Tejada, Gerardo Aramburo, Sergio García, Alberto López V., Juan Manuel García, y Carlos Flores por el apoyo técnico para el desarrollo de las investigaciones. El presente trabajo fue realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME: PE103416

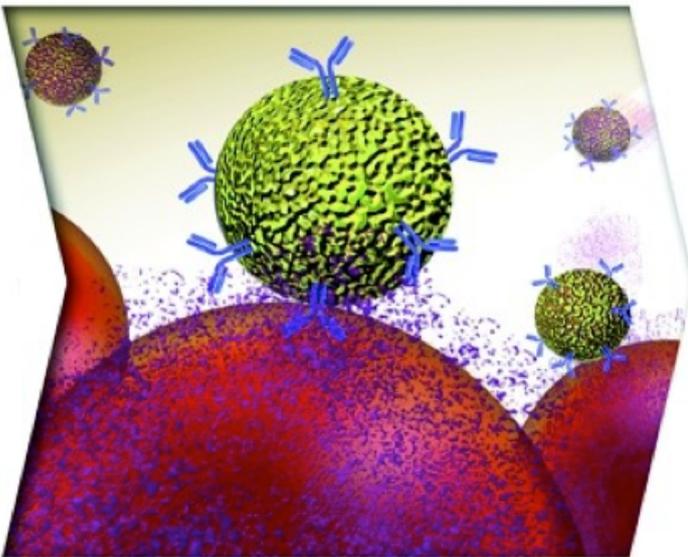
Referencias

- [1] M. Ashby, L. Gibson. Cellular solids structure and properties. Cambridge solid state science series, 2nd edition. Inglaterra, 1997.
- [2] J. Banhart. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science. Vol. 46, (2001); 559-632.
- [3] J.O. Osorio-Hernández, M.A. Suarez, R. Goodall, G.A. Lara-Rodríguez, I. Alfonso, I.A. Figueroa. Manufacturing of open-cell Mg foams by replication process and mechanical properties. Materials and Design. Vol:64, (2014); 136-141
- [4] Oscar David Molina Ramírez. Caracterización microestructural y mecánica de espumas metálicas de aluminio fabricadas por un nuevo proceso de infiltración. Abril 2015. Grado maestría. Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM.
- [5] J. H. Cadena, I. A. Figueroa, M. A. Suarez, O. Novelo-Peralta, G. González, G.A. Lara-Rodríguez, I. Alfonso. Production of Al foams using the SDP method: Processing parameters and introduction of a new sintering device. J. Min. Metall. Sect. B-Metall. Vol. 52. (2016); 47 - 52.

Nanopartículas de Silicio: un nuevo horizonte para la detección y tratamiento del cáncer

Ateet Dutt*, Guillermo Santana-Rodríguez, Estrella Ramos y Jorge Gutiérrez-Flores

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Cd. Universitaria, C.P. 04510 México, CDMX, México. e-mail: adutt@iim.unam.mx



Nanopartículas combinadas con anticuerpos para combatir el cáncer

Históricamente, el arte de la medicina ha sido practicado guiándose por la identificación de señales que indican que algo no está bien en el cuerpo de un paciente. Éstas pueden ser percibidas por el paciente (síntomas) o por los médicos (signos) a simple vista o a través de sofisticadas técnicas de exploración, tales como el microscopio, la radiografía, las imágenes de resonancia magnética, entre otras. Pero, por más compleja que sea la técnica y poderosa que sea la máquina utilizada, el modelo subyacente es el mismo: para explorar y dictaminar una enfermedad, los médicos primero tienen que encontrar signos y síntomas. No todas las enfermedades son fáciles de identificar, ya que pueden presentar numerosas señales que puedan ser confundidas al momento de identificar la enfermedad. Este es el caso de una de las enfermedades más mortales a las que haya tenido que enfrentarse el ser humano: el cáncer. Para poder diagnosticarlo, entre otras cosas, es necesario notar la presencia de un tumor.

El cáncer es la segunda causa de muerte en todo el mundo. En el caso del cáncer de mama, los estudios epidemiológicos apuntan a más de un millón de nuevos casos diagnosticados por año (a nivel mundial) y una mortalidad anual cercana a 450,000 muertes.

Cáncer proviene del latín "cancer" y hace alusión al cangrejo. Galeno, famoso médico griego, encontraba similitud entre la forma de los vasos sanguíneos de los tumores y las patas de un cangrejo

Como civilización hemos avanzado muchísimo en el tratamiento de múltiples enfermedades; sigue cobrando la vida de millones de personas. Una de las evidencias de que la medicina necesita urgentemente desarrollar procedimientos para combatirla es la proliferación de métodos alternativos –curas milagrosas–, que juegan con la esperanza de los humanos para conservar la vida. Sobra decir cuántas opciones poco o nada serias pueden encontrarse actualmente para pelear la dura batalla con tan terrible enemigo.

Para lograr lanzar al mercado un medicamento nuevo, entre pruebas pre-clínicas y clínicas, es necesario esperar entre 10 y 15 años. Sin mencionar el tiempo necesario para que una patente venza y el precio sea más accesible al público...

Para encontrar un medicamento, se requiere un largo, costoso y laborioso proceso de ensayos de prueba y error; probando millones de compuestos para encontrar al menos uno que pueda funcionar. Una de las alternativas más novedosas para tratar esta enfermedad está basada en el silicio, ampliamente utilizado en el campo biológico gracias a que es inerte, a su gran estabilidad y a su biocompatibilidad. Por otra parte, la nanotecnología, que ha permitido el control, la manipulación, el estudio y fabricación de estructuras y dispositivos a escala nanométrica, ha tenido gran impacto en las ciencias biomédicas al permitir diseñar y desarrollar nuevos artefactos de carácter

multifuncional en los que sea posible encapsular fármacos, resolviendo así algunas limitaciones de los sistemas convencionales de suministro.

Más allá de su biocompatibilidad, las nanopartículas basadas en silicio no resultan nocivas para el organismo dado que, a diferencia de aquellas constituidas por oro, plata y óxido de titanio, por ejemplo, éstas pueden ser excretadas por el organismo, evitando efectos adversos

La encapsulación es una metodología versátil para controlar la liberación de los fármacos, debido a que un fármaco encapsulado presenta ventajas de dosificación con respecto a otras formas de administración. Entre las ventajas más comunes se encuentran la disminución de los temibles efectos adversos, el tiempo de actividad prolongado y el brindar protección contra ataques enzimáticos o degradación ácida debido al pH local, entre otros. Las nanopartículas de sílice son una buena opción para encapsular fármacos por su alta estabilidad química y térmica, gran área superficial, alta estabilidad en suspensiones acuosas y, además, son inertes para el ambiente [7]. Por otra parte, poseen propiedades físicas y químicas que son técnicamente atractivas, por ejemplo, son transparentes, poco apetecidas por microorganismos, y pueden actuar como una barrera, limitando el efecto del ambiente exterior en el núcleo de la partícula [8-9].

Apoptosis: muerte programada con el fin de controlar el desarrollo y crecimiento celular. Puede ser de naturaleza fisiológica y ser desencadenada por señales celulares controladas genéticamente

Partículas de silicio, caballos de Troya para la potencial terapia contra el cáncer

Las partículas de silicio han mostrado ser, potencialmente [1], una excelente opción como acarreadores de fármacos [2-4] y en el tratamiento contra el cáncer [5-8]. En la mayoría de los métodos, las partículas se dirigen hacia las células blanco mediante la fijación de anticuerpos unidos a sus superficies, y controlados por su efecto mejorado de permeabilidad y detección (EPR por sus siglas en inglés) [9]. En algunas de las estrategias de aplicación de dichas nanopartículas, el calentamiento de las mismas se realiza aplicando campos magnéticos o electromagnéticos oscilantes externos, induciendo la

apoptosis[9] de células cercanas a través de magnetotermia[10,11] o fototermia [6,12-15].

Estos materiales sufren ciertas limitaciones, tales como el uso de grandes y costosas instalaciones (el equipo de resonancia magnética, por ejemplo) requeridas para la magnetotermia y la limitada profundidad de penetración de la luz en el cuerpo en el caso de la fototermia. Otras opciones hacen uso de partículas hechas de anticuerpos funcionalizados con fármacos contra el cáncer, con el objetivo de acarrear el principio activo hasta las células tumorales [5, 16 - 19]. Las partículas de silicio poroso han sido consideradas una plataforma muy prometedora para la terapia del cáncer debido a su excelente biocompatibilidad [20] y biodegradabilidad [5, 21 23].

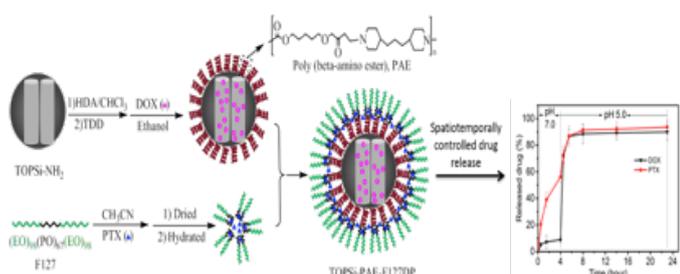
Una de las características del silicio es que tiene un potencial de reducción a silicatos (SiO_4^{4-}) de 1.697 eV y de 0.91 eV para convertirse en sílice (SiO_2), además, la sílice puede disolverse en agua formando silicatos. Por otro lado, la tendencia del silicio a sufrir oxidación es modulada por la generación espontánea de una capa de SiO_x que, cuando se expone a la atmósfera, evita el proceso de oxidación en el bulto. Esta capa de SiO_x puede disolverse en agua, particularmente en medios ligeramente ácidos. La cinética de la disolución de esta capa puede ser modulada por la funcionalización superficial de la sílice. De esta manera, al recubrir al silicio con una monocapa compacta de una molécula orgánica, la disolución del SiO_x puede retardarse o, incluso, evitarse. En algunos grupos de investigación se intenta separar las nanopartículas incrustadas en películas delgadas y disolverlas en soluciones biocompatibles para ser utilizadas en diversas aplicaciones biológicas.

En la siguiente sección se presenta un breve resumen sobre la funcionalización y diferentes métodos para usar nanopartículas de silicio en la detección de cáncer. Los datos se han tomado de la página web de la Universidad de Finlandia Oriental.

La funcionalización de una nanopartícula consiste en la modificación de su superficie proporcionándole un recubrimiento que modifica sus propiedades físicas y químicas, estabilizándolas, o permitiendo su paso a través de una barrera fisicoquímica o proporcionándole las propiedades químicas específicas que requiere para su aplicación

Sensibilidad de nanopartículas de silicio al pH

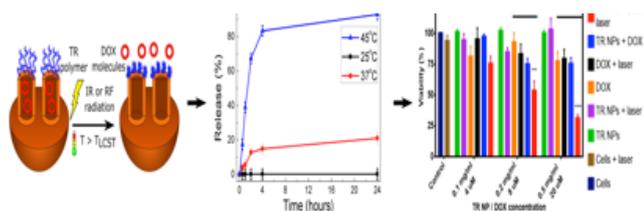
El microambiente ácido de los tumores sólidos proporciona una condición ventajosa para explotar nuevas tecnologías de terapia contra el cáncer. Las nanopartículas de silicio pueden ser sensibles a las condiciones de pH; sin embargo, aún es un desafío desarrollar sistemas de administración de fármacos anticancerígenos sensibles al pH debido a diferentes dificultades, por ejemplo, la fuga del fármaco a pH=7.4, o un pH de respuesta bajo (pH<4.5) y una baja capacidad de acarreamiento del fármaco. En el grupo de investigación de la Universidad de Finlandia en conjunto con la Universidad de Helsinki y el King's college de Londres, se desarrollan nuevos polímeros sensibles al pH.



Representación de una nanopartícula de silicio funcionalizada con un recubrimiento polimérico sensible a la acidez del medio

Termosensibilidad de nanopartículas de silicio

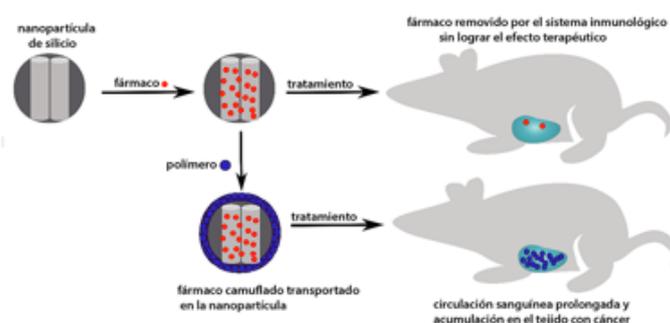
Los estímulos externos pueden ser utilizados para activar la liberación del fármaco en el sitio deseado del cuerpo. La absorción de radiación infrarroja y de radiofrecuencia de las suspensiones de nanopartículas de silicio puede utilizarse para inducir un calentamiento local que desencadene la liberación del fármaco anticancerígeno de las nanopartículas de silicio termosensibles en el sitio en el que se desea su acción. Para conseguirlo, las nanopartículas de silicio deben estar recubiertas con un polímero inteligente termosensible que permita la encapsulación de fármacos a la temperatura corporal y su posterior liberación a 41°C. Esta aplicación es muy prometedora para la terapia del cáncer in vivo. Esta investigación se desarrolla en la Universidad Estatal M. V. Lomonosov Moscow, en conjunto con el Russian Cancer Research Blokhin Center.



Representación de una nanopartícula de silicio funcionalizada con un recubrimiento polimérico capaz de encapsular un fármaco a temperatura ambiente y liberarlo cuando la temperatura sea mayor de 40°C

Nanopartículas encubiertas

Las terapias contra el cáncer podrían mejorarse con la nanotecnología mediante la utilización de nanopartículas portadoras de fármacos. Sin embargo, uno de los obstáculos a los que nos enfrentamos es la superación de las barreras biológicas del cuerpo, que sigue siendo una tarea difícil de lograr. Además del sistema inmunitario que elimina rápidamente objetos extraños, las partículas se exponen a un entorno complejo que puede degradar prematuramente las partículas o hacer que se agreguen. Para evitarlo, se diseñan nuevas estrategias de recubrimiento que protegen a las nanopartículas de estos efectos, permitiéndoles “engañar” al sistema inmunológico para poder entrar sin ser percibidas. El recubrimiento se ha ensayado in vivo y se ha reconocido que el tiempo de circulación de las nanopartículas en el cuerpo es de varias horas. Esta investigación se realiza en colaboración con el AIV Institute (UEF), la Universidad de Helsinki y el Houston Methodist Research Institute.



Representación de una nanopartícula de silicio funcionalizada con un recubrimiento polimérico que puede pasar “inadvertido” por el sistema inmunológico

El futuro de la medicina

Hemos intentado mostrar la relación entre la biología, el silicio y el futuro de la terapia individualizada, que sin duda cambiará la medicina para siempre. El esfuerzo humano para tratar la enfermedad se fortalece con el uso de herramientas digitales establecidas en base a la tecnología de silicio. El enorme esfuerzo material para encontrar síntomas está siendo reemplazado por la combinación de genética e inteligencia artificial que sabe dónde buscar problemas antes de que aparezcan. En el nuevo paradigma médico, la enfermedad será diagnosticada antes de que se haga plenamente manifiesta. Los fármacos altamente selectivos se utilizarán para intervenir antes de que los órganos sean devastados o se destruya tejido. El uso del silicio como material en aplicaciones electrónicas es muy conocido, cuando también se use en tratamientos biológicos dará lugar a una gran revolución tecnológica. Sin embargo, para la aplicación de esta tecnología hay que diseñar nuevas políticas, así como nuevas soluciones tecnológicas. Una vez que la tecnología pueda establecerse y se tengan resultados positivos, esto podría representar un cambio revolucionario en la medicina, causando un gran impacto en los efectos sociales provocados por una enfermedad tan mortal como el cáncer.

01. Fenollosa R, Garcia-Rico E, Alvarez S, et al. Silicon particles as trojan horses for potential cancer therapy. *Journal of Nanobiotechnology*. 2014;12:35. doi:10.1186/s12951-014-0035-7.
02. Randall CL, Leong TG, Bassik N, Gracias DH. 3D lithographically fabricated nanoliter containers for drug delivery. *Adv Drug Del Rev*. 2007;59:1547–1561. doi: 10.1016/j.addr.2007.08.024. [PubMed] [Cross Ref]
03. Reibetanz U, Chen MHA, Mutukumaraswamy S, Liaw ZY, Oh BHL, Venkatraman S, Donath E, Neu BR. Colloidal DNA carriers for direct localization in cell compartments by pH sensing. *Biogeosciences*. 2010;11:1779–1784. [PubMed]
04. Tasciotti E, Liu X, Bhavane R, Plant K, Leonard AD, Price BK, Cheng MM-C, Decuzzi P, Tour JM, Robertson F, Ferrari M. Mesoporous silicon particles as a multistage delivery system for imaging and therapeutic applications. *Nat Nano*. 2008;3:151–157. doi: 10.1038/nnano.2008.34. [PubMed] [Cross Ref]
05. Park J-H, Gu L, von Maltzahn G, Ruoslahti E, Bhatia SN, Sailor MJ. Biodegradable luminescent porous silicon nanoparticles for in vivo applications. *Nat Mater*. 2009;8:331–336. doi: 10.1038/nmat2398. [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
06. Hong C, Lee J, Son M, Hong SS, Lee C. In-vivo cancer cell destruction using porous silicon nanoparticles. *Anti-Cancer Drugs*. 2011;22:971–977. [PubMed]
07. Canham LT. Device Comprising Resorbable Silicon for Boron Capture Neutron Therapy. UK Patent Nr. 0302283.7. In: , editor. *Book Device Comprising Resorbable Silicon for Boron Capture Neutron Therapy*. UK Patent Nr. 0302283.7 (Editor ed. ^eds.) City: UK Patent Nr. 0302283.7; 2003.
08. Xiao L, Gu L, Howell SB, Sailor MJ. Porous silicon nanoparticle photosensitizers for singlet oxygen and their phototoxicity against cancer cells. *ACS Nano*. 2011;5:3651–3659. doi: 10.1021/nn1035262. [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
09. N. I. Jaramillo-Gómez, tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales, Medellín, Colombia, 2013, Encapsulación de un fármaco en nanopartículas de sílice sintetizadas vía sol-gel asistido por microemulsión de micelas inversas
10. Elmore S. Apoptosis: A Review of Programmed Cell Death. *Toxicologic Pathology*. 2007; 35:495-516.
11. Gil PR, Parak WJ. Composite nanoparticles take Aim at cancer. *ACS Nano*. 2008;2:2200–2205. doi: 10.1021/nn800716j. [PubMed] [Cross Ref]
12. Gomella LG. Is interstitial hyperthermia a safe and efficacious adjunct to radiotherapy for localized prostate cancer? *Nat Clin Pract Urol*. 2004;1:72–73. doi: 10.1038/ncpuro0041. [Cross Ref]
13. Maier-Hauff K, Ulrich F, Nestler D, Niehoff H, Wust P, Thiesen B, Orawa H, Budach V, Jordan A. Efficacy and safety of intratumoral thermotherapy using magnetic iron-oxide nanoparticles combined with external beam radiotherapy on patients with recurrent glioblastoma multiforme. *J Neuro-Oncol*. 2011;103:317–324. doi: 10.1007/s11060-010-0389-0. [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
14. Lal S, Clare SE, Halas NJ. Nanoshell-enabled photothermal cancer therapy: Impending clinical impact. *Acc Chem Res*. 2008;41:1842–1851. doi: 10.1021/ar800150g. [PubMed] [Cross Ref]
15. Lee C, Kim H, Hong C, Kim M, Hong SS, Lee DH, Lee WI. Porous silicon as an agent for cancer thermotherapy based on near-infrared light irradiation. *J Mater Chem*. 2008;18:4790–4795. doi: 10.1039/b808500e. [Cross Ref]
16. Osminkina LA, Gongalsky MB, Motuzuk AV, Timoshenko VY, Kudryavtsev AA. Silicon nanocrystals as photo- and sono-sensitizers for biomedical applications. *Appl Phys B*. 2011;105:665–668. doi: 10.1007/s00340-011-4562-8. [Cross Ref]
17. Jain PK, Huang X, El-Sayed IH, El-Sayed MA. Noble metals on the nanoscale: optical and photothermal properties and some applications in imaging, sensing, biology, and medicine. *Acc Chem Res*. 2008;41:1578–1586. doi: 10.1021/ar7002804. [PubMed] [Cross Ref]
18. Serda RE, Godin B, Blanco E, Chiappini C, Ferrari M. Multi-stage delivery nano-particle systems for therapeutic applications. *Biochim Biophys Acta*. 1810;2011:317–329. [PMC free article] [PubMed]
19. Xu R, Huang Y, Mai J, Zhang G, Guo X, Xia X, Koay EJ, Qin G, Erm DR, Li Q, Liu X, Ferrari M, Shen H. Multistage vectored siRNA targeting ataxia-telangiectasia mutated for breast cancer therapy. *Small*. 2013;9:1799–1808. doi: 10.1002/smll.201201510. [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
20. Park JS, Kinsella JM, Jandial DD, Howell SB, Sailor MJ. Cisplatin-loaded porous Si microparticles capped by electroless deposition of platinum. *Small*. 2011;7:2061–2069. doi: 10.1002/smll.201100438. [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
21. Xue M, Zhong X, Shaposhnik Z, Qu Y, Tamanoi F, Duan X, Zink JL. pH-operated mechanized porous silicon nanoparticles. *J Am Chem Soc*. 2011;133:8798–8801. doi: 10.1021/ja201252e. [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
22. Canham LT. Bioactive silicon structure fabrication through nanoetching techniques. *Adv Mater*. 1995;7:1033–1037. doi: 10.1002/adma.19950071215. [Cross Ref]
23. Popplewell JF, King SJ, Day JP, Ackrill P, Fifield LK, Cresswell RG, Di Tada ML, Liu K. Kinetics of uptake and elimination of silicic acid by a human subject: a novel application of ³²Si and accelerator mass spectrometry. *J Inorganic Biochem*. 1998;69:177–180. doi: 10.1016/S0162-0134(97)10016-2. [PubMed] [Cross Ref]
24. Shabir Q, Pokale A, Loni A, Johnson DR, Canham LT, Fenollosa R, Tymczenko M, Rodríguez I, Meseguer F, Cros A, Cantarero A. Medically biodegradable hydrogenated amorphous silicon microspheres. *Silicon*. 2011;3:173–176. doi: 10.1007/s12633-011-9097-4. [Cross Ref]
25. Chen Y, Wan Y, Wang Y, Zhang H, Jiao Z. Anticancer efficacy enhancement and attenuation of side effects of doxorubicin with titanium dioxide nanoparticles. *Int J Nanomed*. 2011;6:2321–2326. [PMC free article] [PubMed]
26. <https://www.uef.fi/en/web/pharmaceuticalphysics/research-topics/drug-delivery>

