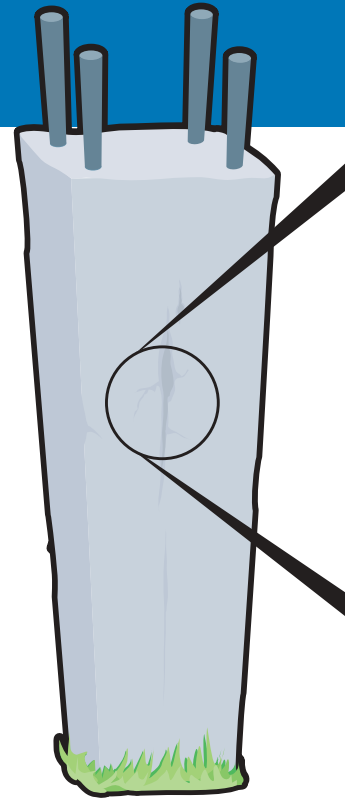


# Instalaciones para nanotecnología

HAL AMICK Y PAULO J. M. MONTEIRO\*

En este artículo se explora la nanotecnología desde la perspectiva del especialista en la dinámica estructural, quien realizó el diseño de un edificio para tecnología avanzada, enfocándonos en el concreto, material

estructural que con frecuencia es seleccionado para la construcción de estas instalaciones. En principio se mostrará cómo la nanotecnología aplicada ha conducido a la investigación de algunas de las propiedades dinámicas del concreto, y con posterioridad se expondrán algunas de las necesidades de una mayor investigación en la tecnología del concreto.

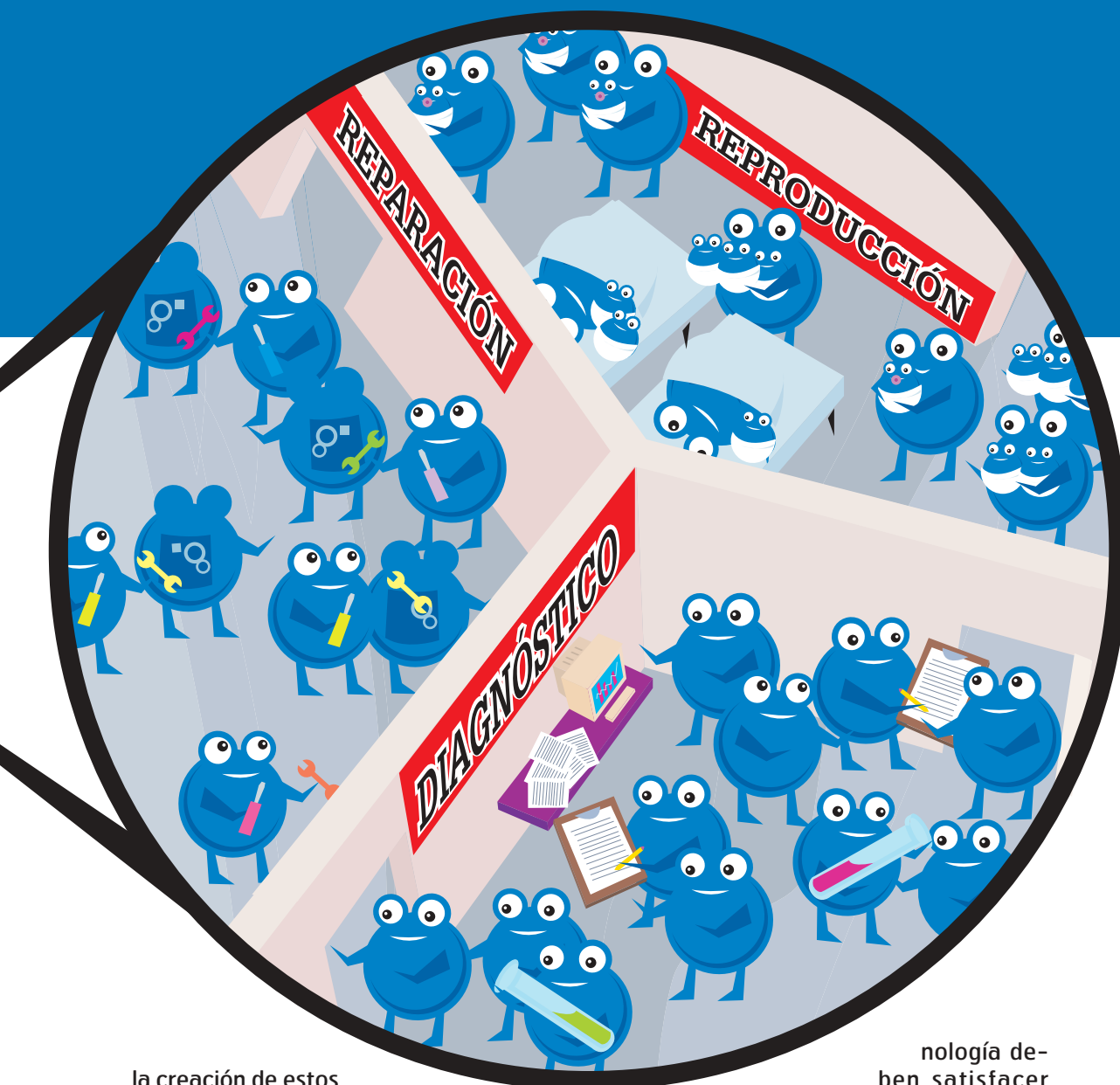


**L**os sofisticados ambientes de trabajo, que se necesitan en las instalaciones para investigación de la nanotecnología imponen grandes retos a los diseñadores y constructores. Los requisitos ambientales de este tipo de construcciones incluyen el control de la temperatura, la humedad, la limpieza del aire, la contención de los riesgos biológicos, los límites en los campos electromagnéticos, el acondicionamiento especial para la energía eléctrica, así como el control de la vibración y el ruido.

Debido a que la mayoría de estos aspectos de diseño han evolucionado a partir de los requerimientos especiales creados al trabajar en pequeña escala muy pocos de los edificios existentes pueden satisfacer estas demandas y generalmente se necesita de una nueva construcción.

## AMBIENTES CON BAJA VIBRACIÓN

La necesidad de ambientes de muy baja vibración para las instalaciones de nanotecnología va en aumento. Sin embargo,



la creación de estos espacios está bajo la esfera de acción de un subgrupo muy especializado en la dinámica estructural.

Durante dos décadas, la industria de los semiconductores ha sido la fuerza impulsora de la evolución de las metodologías de diseño asociadas con los ambientes de baja vibración. Las construcciones dedicadas a esta novedosa industria son colocadas en sitios con bajas vibraciones ambientales y diseñadas de manera muy conservadora.

Estos estrictos requisitos hacen que los diseñadores consideren, nuevamente, algunas normas básicas de diseño pues ubicar la construcción en un sitio tranquilo ya no es suficiente. La Fig. 2 muestra el rango de vibraciones permitidas para estas instalaciones, en las que un espacio de oficinas o sala de juntas puede tener algún nivel perceptible de vibración; sin embargo, las áreas de trabajo en las instalaciones de nanotec-

nología deben satisfacer criterios de vibración

mucho más estrictos que la percepción humana, cuyo umbral de la percepción es de aproximadamente 500 m/s.

Los microscopios de baja potencia (40x a 100x) y los quirófanos para cirugía requieren de un nivel de vibración de un orden de magnitud más sensible de lo que la gente puede sentir. En tanto, los microscopios electrónicos y las fotolitografías de semiconductores necesitan un orden de magnitud todavía más sensible que el anterior. Gran parte del equipo asociado a la nanotecnología es todavía más sensible, y el ambiente requerido para el desarrollo de nuevas sondas moleculares (tales como aquéllas usadas para microscopios de fuerza atómica y otras formas de microscopía con sondas) son todavía más estrictos.





Por lo general, son considerados lugares óptimos los que cuentan con amplitudes de vibración en el rango de 3 a 6 m/s. Sin embargo, algunos procesos de nanotecnología necesitan amplitudes de vibración de 1 m/s o menos, requiriendo mediciones extra, inclusive para los sitios más tranquilos.

### BONDADES DEL CONCRETO

El concreto es el material elegido para la construcción de muchos de los componentes estructurales críticos en las instalaciones de tecnología avanzada. Múltiples áreas muy sensibles a la vibración se ubicaban sobre losas en contacto directo con el suelo y con peraltes mucho más gruesos de lo normal (200 a 600 mm).

Los espacios de los salones limpios que requieren de cimentación con frecuencia son colocados en sistemas peraltados de losas aligeradas de 700 a 1200 mm de peralte, dependiendo del espaciamiento de las columnas. Los laboratorios generales se ubican en los niveles superiores de estos edificios -con la intención de satisfacer las necesidades de los microscopios-, que están diseñados ya sea con losas en una sola dirección o marcos compuestos de acero y concreto, aunque los peraltes son más altos

y los claros son mucho más cortos que los de las estructuras convencionales.

El concreto ha encontrado una aplicación relativamente nueva en las instalaciones con estrictos requisitos de vibración. Estas necesidades de vibración pueden ser satisfechas por una combinación de un sitio tranquilo y aislamiento neumático usando resortes de aire. En el pasado este aislamiento se logró con los bancos ópticos comercialmente disponibles montados en patas, que contenían resortes de aire. Sin embargo, ésta no es una solución para todos los propósitos, pues algunas aplicaciones requieren una trayectoria óptima muy larga y múltiples mesas ópticas podrían llevar al desalineamiento de los rayos.

Otras aplicaciones pueden exigir que la superficie de trabajo en el laboratorio esté a nivel del piso, exigiendo de un pozo para la unidad de aislamiento. Algunas estructuras especifican una masa aislada extraordinariamente grande para mejorar el desempeño de etapas adicionales de aislamiento o para bajar el centro de gravedad de la estructura.

Varios de los diseños para laboratorios de R&D han empleado grandes masas inerciales soportadas sobre enormes resortes de aire, como el sistema que se muestra conceptualmente en la Fig. 3. Esta configuración empieza a conocerse en los círculos de la nanotecnología como una losa NIST-A1, denotando el criterio de vibración que se pretendió satisfacer para el Laboratorio de Mediciones Avanzadas del NIST. (Un término más genérico es el de "losa sin vibraciones" [*keel-slab*]). Se diseñó y se construyó un prototipo de 4 x 10 m en uno de los laboratorios existentes en el NIST y ahora se usa para apoyar el desarrollo de un sistema de medición de fuerzas capaz de medir nN, uno de los requisitos de metrología de la nanotecnología.

Cuando se golpea con un martillo la losa sin vibraciones prototipo se produce un espectro de velocidad similar al mostrado

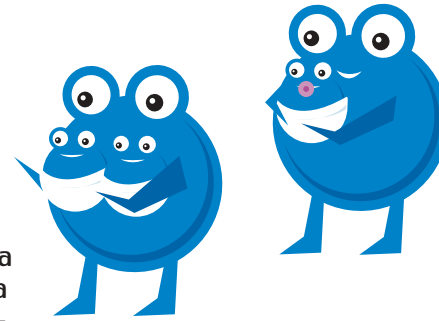
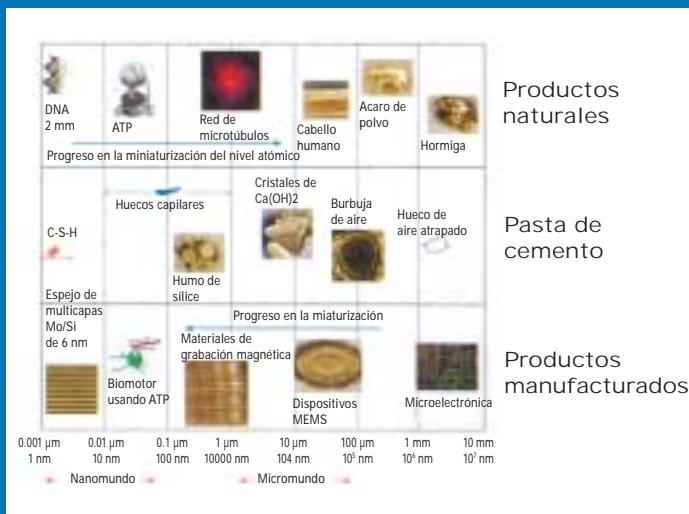
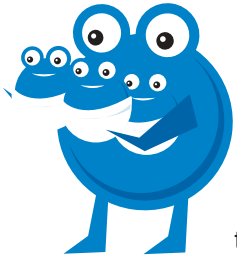


Figura 1



Comparación de las escalas de productos naturales y artificiales con la pasta de cemento



en la Fig. 4, cuya forma exacta depende de los lugares, los estímulos y las mediciones. La amplia curva a bajas frecuencias representa una respuesta altamente amortiguada del sistema de suspensión de los resortes de aire. Los picos más agudos a las frecuencias entre 34 y 120 Hz representan las primero cinco frecuencias de resonancia de flexión y de torsión internas de la enorme masa de concreto. Estos picos son mucho más agudos que los correspondientes a los resortes de aire, indicando un amortiguamiento modal superior del concreto.

La Fig. 5 es una representación de la capacidad de aislamiento contra la vibración de esta losa a un ancho de banda particular asociado con los requisitos de vibración del NIST. El aislamiento llega a ser bastante bueno, por encima de 8 Hz, pero se degrada a frecuencias por encima de 30 Hz debido a la presencia de la amplificación vinculada con las resonancias internas de la masa de concreto. A algunas frecuencias, el efecto del aislamiento es completamente cancelado.

En el diseño del nuevo laboratorio del NIST, los diseñadores evitaron este problema limitando la geometría de la masa de aislamiento. Ninguna de la docena de losas instaladas tenía dimensiones que excedían los cuatro m, lo que forzó a que la resonancia fundamental de flexión quedara muy por encima de los 100 Hz, el rango de frecuencia que más preocupa a los investigadores. No obstante, pueden surgir circunstancias en las que podría requerirse un sistema más grande, similar al prototipo.

Puede demostrarse que si el amortiguamiento material del concreto pudiera ser incrementado desde un 0.2% nominal hasta, digamos, 2% el desempeño de aislamiento en las frecuencias de resonancia internas podrían mejorar en 10 veces. Esto significaría que los sistemas de aislamiento del tamaño de un salón podrían proporcionar el aislamiento adecuado sobre un rango de frecuencia significativo.

Además de los sistemas de aislamiento de losas sin vibraciones, la capacidad para incrementar el amortiguamiento del con-

creto como parte del proceso de diseño podría conducir a una mejor atenuación de vibraciones que acompañan a la estructura en los edificios para tecnología avanzada. Tan sólo estos dos beneficios han justificado un examen más cuidadoso de las variables que controlan el amortiguamiento del concreto.

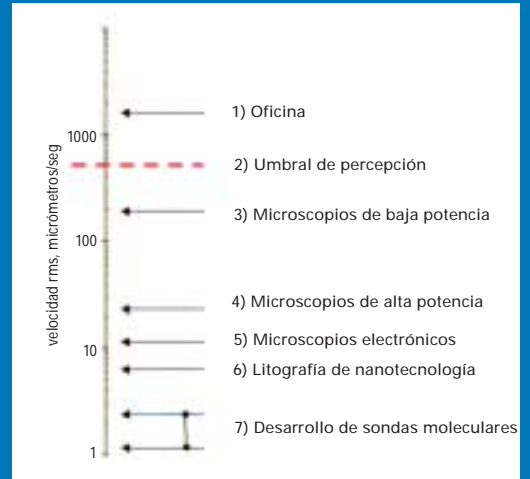
## EL AMORTIGUAMIENTO Y EL CONCRETO

Un ingeniero estructural generalmente tiene una buena comprensión de los papeles que la rigidez y la masa estructural juegan en la respuesta dinámica. Las frecuencias de resonancia son funciones de rigidez divididas por la masa (al incrementar la masa disminuye la frecuencia de resonancia). A frecuencias menores que la fundamental de resonancia, la respuesta dinámica de la estructura es controlada por su rigidez. A frecuencias más altas que la frecuencia fundamental de resonancia, la respuesta dinámica de la estructura es controlada más por su masa que por su rigidez.

Para la respuesta a frecuencias iguales o cercanas a la de resonancia, el amortiguamiento se convierte en la propiedad más importante. Cuando es estimulado a la frecuencia de resonancia, la respuesta de una estructura se mantiene dentro de los límites requeridos por la nanotecnología por medio del amortiguamiento. De hecho, la amplitud de la vibración es inversamente proporcional al amortiguamiento de la estructura, y la amplitud de un espectro de respuesta para cualquier sismo dado se reduce a medida que se incrementa la capacidad de amortiguamiento de una estructura.

El amortiguamiento, comparado con el módulo de elasticidad o densidad, es la menos comprendida de las propiedades estructurales de la materia. En general, el ingeniero estructural

Figura 2



Criterios de vibración del equipo típico de tecnología avanzada



## ¿Qué es la nanotecnología?

Por lo general, se le define como la investigación y el desarrollo (R & D=research & development) que trata de las partículas y los sistemas con dimensiones de entre uno y 100 nm (un nm es  $10^{-9}$  [una mil millonésima] m). Aunque los conductores y otros aspectos de los *chips* para computadoras históricamente han estado en la microescala, ( $10^{-6}$ , tal situación está cambiando).

La Fig. 1 proporciona una base para comparar las escalas para los objetos naturales y artificiales, con algunos de los tamaños de los aspectos en la pasta de cemento que podrían ser más familiares al lector.

El prefijo *nano* puede usarse para modificar tres términos

existentes. La nanoescala implica un rango de tamaño –dimensiones que son del orden de uno a 100 nm. La nanociencia implica la investigación a nanoescala. Así, la nanotecnología implica la implementación y la producción a nanoescala, lo que a su vez representa una nanociencia madura. Aún no hemos desarrollado completamente la nanociencia, de modo que el uso del último término –el más popular– es prematuro.

La nanotecnología requiere que los instrumentos coloquen una sonda con una precisión de unos cuantos nm, que midan las cantidades (tales como nN), y que fabriquen objetos que quizás tengan únicamente el grosor correspondiente a unas cuantas moléculas y un área de unos  $\text{nm}^2$ . Por tanto, las variaciones

térmicas en una sala deben ser lo suficientemente pequeñas, de modo que un objeto no cambie su tamaño en más de unos cuantos nm, porque de otro modo el sistema de control de la sonda podría colocar a dicha sonda en un lugar equivocado. Los campos electromagnéticos dentro de la estructura deben ser tan estables que las señales eléctricas puedan ser medidas en términos de nA y nV.

Algunos espacios requieren una acústica comparable a la que hay en un estudio de audiograbación. Las diminutas partículas transportadas por el aire pueden tener dimensiones de hasta algunos miles de nm, de modo que el control de la contaminación –de las partículas y de químicos– debe satisfacer tolerancias muy estrictas. Las vibraciones deben

presupone el amortiguamiento de una estructura de concreto basado en el comportamiento de una estructura con una configuración estructural similar. A diferencia del módulo elástico del concreto, que el diseñador puede especificar eligiendo básicamente una resistencia a compresión o su densidad, la cual puede

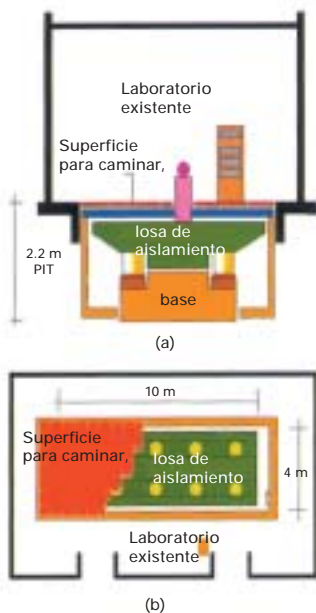
ser controlada con una selección adecuada del agregado “no es posible determinar analíticamente el amortiguamiento total para una estructura”.

Con mayor frecuencia, el objetivo al diseñar los elementos estructurales para resistir las fuerzas dinámicas en edificios para tecnología avanzada consiste en minimizar la amplificación de la vibración estructural entre dos puntos en una estructura. Esto generalmente exige que el diseñador pueda crear miembros con frecuencias de resonancia que sean tan altas como práctico, requiriendo considerar conceptualmente una estructura ligera y rígida. En general, el amortiguamiento de esa estructura es aceptado tal cual, y uno supone que los miembros con alta frecuencia de resonancia cambiarán la amplificación a una frecuencia en donde las vibraciones constituyan una preocupación menor.

En el caso del sistema de aislamiento discutido previamente, la amplificación ocurre entre las partes superiores de los resortes de aire y la superficie superior del sistema de aislamiento. Hasta que pueda incrementarse el amortiguamiento deliberadamente, la única opción disponible al diseñador consiste en lograr una frecuencia de resonancia más alta, lo que limita el área superficial útil.

El mejor material para muchas situaciones dinámicas estructurales en edificios de alta tecnología es aquél con un alto módulo de elasticidad y amortiguamiento, y

Figura 3



Planta y corte conceptual de un sistema de aislamiento.

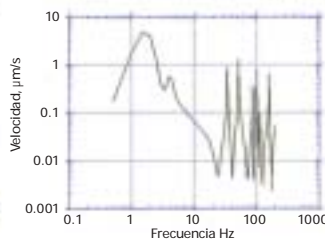


Figura 4

Resultante del espectro de la velocidad del impacto medido al centro del prototipo de la losa 4 NIST-A

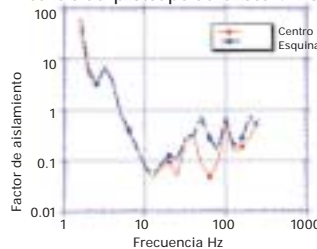


Figura 5

Representación del comportamiento del aislante en el centro y la esquina de la losa 4



ser de dos a tres órdenes de magnitud menores que el umbral de la percepción. Todos estos requisitos deben satisfacerse en una instalación con hasta 100 veces el consumo de energía por los sistemas mecánicos –y más de 50 veces el movimiento del aire– que un edificio convencional. Estas características se traducen en especificaciones muy estrictas del edificio y del material que deben ser preparadas por el equipo de diseño.

A principios del año 2003 estaban en proceso de construcción varias instalaciones dedicadas a la nanotecnología en todo el mundo, o que recientemente habían sido terminadas. Éstas incluyen edificios en las universidades de Cornell y Northwestern, en Estados Unidos, y la

University Collage, en Londres, Inglaterra; una gran sala limpia en el Laboratorio Nacional de Desarrollo de Nanotecnología en Taiwán y una instalación un poco más pequeña en el Laboratorio Naval de Investigación, en Washington, DC. Los costos de construcción para estas instalaciones varían entre 12 y 60 millones de dólares (mdd).

Minimizar los errores en la medición y en la colocación puede llegar a ser de importancia crítica en la nanotecnología, justificando el gasto de grandes sumas de dinero para el control ambiental. Por ejemplo, se realizó un significativo esfuerzo de R&D como parte del diseño del Laboratorio de Mediciones Avanzadas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST). Una

de estas investigaciones exploró de qué manera podían usarse los sistemas de control de temperatura que pueden obtenerse fácilmente para lograr el control térmico del salón de  $\pm 0.01$  °C, lo que antes se consideraba como algo imposible sin un sistema de control muy costoso y especialmente diseñado. Los costos del edificio antes citado parecen grandes cuando se consideran en el contexto de los edificios académicos o gubernamentales, pero valore que una sola instalación para la producción de semiconductores podría tener un costo de construcción del orden de los 700 mdd y tener de 10 mil a 15 mil m<sup>2</sup> de un salón limpio.

baja densidad. La resistencia a compresión por sí sola no es de gran importancia. Debe realizarse más investigación para cuantificar mejor muchas de las suposiciones que actualmente son inherentes en el diseño de estructuras para tecnología avanzada.

La propiedad de amortiguamiento del concreto ha sido estudiada desde la década de los treinta en el siglo XX, pero virtualmente toda la investigación se ha enfocado en identificar los mecanismos microestructurales en el concreto que causan el amortiguamiento. Se ha prestado muy poca atención al desarrollo de medios por los cuales el amortiguamiento pudiera ser modificado de manera deliberada, colocándolo bajo el control de un dinamicista estructural, al igual que la resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Está en curso una investigación en la Universidad de California, Berkeley, para desarrollar tales herramientas para el diseñador. Los parámetros investigados incluyen aditivos, variaciones en la relación agua-cemento ( $w/c$ ), alteración del agregado y modificaciones del refuerzo. El objetivo consiste en proporcionar al diseñador un conjunto de métodos para los cuales el amortiguamiento pueda ser incrementado a, digamos, 2%, o quizás hasta 10%, y que documente los efectos de esos métodos en otros parámetros importantes, como la resistencia, el módulo de elasticidad y la durabilidad.

Hay varios métodos viables para modificar el amortiguamiento para este conjunto de herramientas del diseñador.

Por ejemplo, un diseñador ya tiene a su disposición un aditivo de polímeros consistente en latex estirenobutadieno y una goma vegetal, pero sus efectos en las otras propiedades del concreto todavía no han sido completamente documentados. Este aditivo de polímero puede aumentar el amortiguamiento desde el valor nominal del concreto entre 0.5 y 1% hasta aproximadamente 2.5%. Otros aditivos de polímeros pueden también mejorar el amortiguamiento. Una segunda línea de pensamiento involucra prácticas que nos han enseñado a considerar como indeseables.

Por ejemplo, la investigación anterior ha establecido que el amortiguamiento del concreto se debe parcialmente a la presencia de microfracturas en la matriz del concreto. Si se eleva deliberadamente el nivel de la estructura (aumentando la  $w/c$ ) se incrementará el amortiguamiento. Una tercera opción involucra tecnología muy popular en las estructuras aeroespaciales: amortiguamiento restringido a capas. Esta práctica sólo podría modificar el amortiguamiento de formas en modos particulares, en lugar de hacerlo a través de un amplio rango de frecuencias de formas alteradas, pero en algunos casos, esto puede ser deseable.

La evolución de instalaciones de tecnología avanzada, particularmente aquellas para nanotecnología, requerirán de un amplio esfuerzo de diferentes tecnólogos de la construcción para satisfacer



## La nanotecnología en la ingeniería civil

Los rápidos avances que está experimentando la nanotecnología en todas sus dimensiones también son de aplicación en procesos constructivos de la ingeniería civil. Los más destacados serían «los materiales inteligentes», que puedan comportarse como sistemas vivos, de forma que sean capaces de llevar a cabo una función de actuación. Un ejemplo de estos nuevos materiales son los nanotubos de carbón, mucho más ligeros que el aluminio y 100 veces más resistentes que el acero.

Se tendrían así materiales de construcción de alto rendimiento, como una muy alta resistencia, durabilidad, comportamiento térmico y acústico; se podrían desarrollar polímeros, adhesivos, elastómeros, fibras y materiales compuestos para su aplicación en ingeniería civil, materiales inteligentes con funciones de reparación y de autodiagnóstico (de la microestructura, fatiga, etcétera.)

En el tema de carreteras se está investigando las nuevas propiedades que los

nanomateriales pueden conferir a los nuevos materiales. Estas nanopartículas podrían aportar soluciones a problemas como es conseguir una gran estabilidad del material para que no se degrade al sol, la dispersión homogénea para pintura de asfalto, etc.

Hay actualmente problemas con los pigmentos utilizados para obtener tinturas rojas, ya que muchas veces éstas reaccionan con el concreto cambiando su tonalidad hacia el rosa. En este sentido, hay líneas de investigación sobre pigmentos o colorantes orgánicos depositados sobre arcillas y otros tipos de soportes para poder conseguir que no se degraden. Otra de las posibles soluciones es la de encapsular nanopigmentos en polímeros con el fin de que no tiendan a degradarse.

Un ejemplo más próximo al intento de aplicar la nanotecnología en la ingeniería civil es la iniciativa del consorcio europeo NANOCEM ([www.nanocem.net](http://www.nanocem.net)), dedicado a la investigación y transferencia de tecnología relativa a la nanotecnología del cemento y sus aplicaciones en la construcción.

Los principales campos de investigación que se están desarrollando en NANOCEM son:

- Cementos nanoestructurados, más fáciles de aplicar y con la capacidad de reaccionar y autorrepararse ante las agresiones químicas de agentes externos, así como cementos que absorban la radiación solar, con aplicación, por ejemplo, en entornos espaciales. Esto se logra mediante el control de la porosidad del material
- Nanopartículas funcionales para el control ambiental y de la corrosión. Se trabaja en la obtención de nanopartículas para introducir en el cemento, que absorban el CO<sub>2</sub>, contribuyendo así a reducir emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Nanobioingeniería aplicada a los materiales de construcción, para obtener concretos inteligentes a base de compuestos activos de origen biológico, de forma que se le añadan funciones (que puedan servir de filtros, de descontaminadores).

Sin duda, a medida que evolucione la nanotecnología se podrá ir usando paulativamente en otras áreas de la ingeniería civil.

Fuente: [www.madrimasd.org/cimn/asesorcan/3747.aspx](http://www.madrimasd.org/cimn/asesorcan/3747.aspx)

los sofisticados requisitos de comportamiento de R&D y la producción del mañana. Aunque con frecuencia es percibido como “de baja tecnología” el concreto puede jugar un papel clave. Todavía queda mucho trabajo por hacer, pero el concreto podría convertirse en el material de elección del diseñador estructural, especialista en dinámica. 🧐

\*Este artículo fue publicado en Concrete International, marzo 2004

### REFERENCIAS

1. U.S. Department of Energy website, <http://www.doe.gov/production/bes/scale-of-things.html>.
2. Mehta, P. K. and Monteiro, P.J. M., *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 2nd. Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1993, 548 pp.
3. Zsirai, T.; Williams, S.; and Sennewald, B., “Researchers Seek Strategies for Metrology Lab Temperature Control,” *Laboratory Design*, 1997.
4. Amick, H.; Sennewald, B.; Pardue, N.C.; Teague, C; and Scace, B. “Analytical/Experimental Study of Vibration of Room-Sized Air Spring-Supported Slab,” *Noise Control Engineering Journal*, V. 46, No. 2, 1998, pp. 39-47.
5. Chopra, A. K.; *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd. Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001, 844 pp.
6. ACI Committee 341, “Seismic Analysis and Design of Concrete Bridge Systems (ACI 341.2R-97),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997, 25 pp.

7. Soon, S.; Koh, S.; Paramasivam, P.; Koh, C. G.; and Loo, Y. H.; “Comparative Studies on Concrete Test Specimens Containing Concrete Damp Admixtures,” SHAMA Technologies (S) Pte. Ltd. Singapore, 1997.

### LOS AUTORES

**Hal Amick** es miembro del ACI y vicepresidente del Colin Gordon & Associates, una firma de consultoría sobre vibración, y es graduado en materiales estructurales en la Universidad de California, Berkeley. Ha prestado sus servicios como consultor sobre vibración en trece instalaciones dedicadas a la nanotecnología, así como en el Laboratorio de Mediciones Avanzadas del NIST, junto con numerosas instalaciones y laboratorios de semiconductores. Recibió su licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Wyoming, es MC y tiene una Maestría en ingeniería de la Universidad de California, Berkeley.

**Paulo J. M. Monteiro** es miembro del ACI, además de profesor y presidente del Grupo de Ingeniería Estructural, Mecánica y Materiales en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de California, Berkeley. En 2003, recibió la Medalla Wason de la ACI por sus investigaciones sobre materiales.

Sus intereses en la investigación incluyen modelos matemáticos y microestructura del concreto, que ha probado ser el mejor material para el control de la vibración.

