

Nanotecnología: herramienta inteligente para la conservación del patrimonio arquitectónico y urbano

Nanotechnology: smart tool for conservation of architectural and urban heritage

págs. 7-22

Grupo de Investigación: Territorio y Habitabilidad
Línea de Investigación: Arquitectura, Ciudad, Medio Ambiente
Luis Fernando Molina-Prieto

Recibido: 5 de febrero de 2016 Aceptado: 4 de abril de 2016

Resumen

El artículo estudia las metodologías inteligentes y no invasivas que la nanotecnología viene desarrollando para el mantenimiento, la conservación y la restauración de las construcciones patrimoniales. Se incluyen: una síntesis del origen y la evolución de la nanotecnología; los avances más relevantes en cuanto al mantenimiento inteligente del patrimonio arquitectónico y urbano; y los resultados obtenidos al aplicar la nueva generación de compuestos nanoestructurados sobre los materiales de construcción más comunes en las obras patrimoniales. Se concluye que el tratamiento de los edificios patrimoniales con nanocompuestos permite un mantenimiento más eficiente de los mismos, contribuye a su conservación, y está generando novedosos y muy eficaces procesos para la restauración del patrimonio cultural material de la humanidad.

Palabras claves: patrimonio cultural, mantenimiento, conservación.

Abstract

The article examines the smart and noninvasive methodologies that nanotechnology are developing for the maintenance, preservation and restoration of heritage buildings. Are included: a summary of the origin and evolution of nanotechnology; the most important advances in intelligent maintenance of the architectural and urban heritage; and the results achieved in implementing the new generation of nanostructured composite over more common construction materials in heritage works. We conclude that treatment of heritage buildings with nanocomposites allows more efficient maintenance of them, contributing to their conservation, and is creating new and highly effective processes for restoration of tangible cultural heritage of humanity.

Keywords: cultural heritage, maintenance, conservation.

Introducción

Preservar los edificios patrimoniales, desde el punto de vista de la arquitectura, es esencial porque ellos juegan un importante rol en el diseño contemporáneo, puesto que conservan conocimientos —técnicos, tecnológicos y de diseño— creados en el pasado, pero que a través de las edificaciones se transfieren al presente. Por otra parte, el significado social, económico y cultural de las obras patrimoniales forma parte de innumerables proyectos, estrategias, políticas y planes locales de desarrollo, porque a partir de la preservación de la identidad cultural es posible fomentar y fortalecer la industria del turismo. Por tanto, la preservación de los edificios, los espacios y los monumentos históricos y patrimoniales contribuye al fortalecimiento y la consolidación de economías más sostenibles (Bagnall, 2015; Skoll & Korstanje, 2014). Por estas y otras razones la importancia de mantener y conservar el patrimonio cultural material urbano ha sido subrayada por incontables investigadores (Goy, 1973; Gebessler & Eberl, 1980; Munasinghe, 2005; Bernat et al, 2014).

Pero las condiciones climáticas, las variaciones atmosféricas y los continuos cambios de humedad y temperatura, así como la contaminación del aire y otras condiciones ambientales propias de las ciudades, amenazan constantemente a las edificaciones (tanto antiguas como modernas). Por ende, gran parte del patrimonio arquitectónico y urbano de la humanidad está constantemente abocado a la decadencia y la degradación, obligando a museos, gobiernos y organismos nacionales e internacionales a invertir cuantiosos recursos en su conservación y mantenimiento.

El patrimonio material que permanece al aire libre —como los restos arqueológicos, los edificios patrimoniales, las esculturas urbanas y otros monumentos dispuestos en los espacios públicos—, está constantemente expuesto a las inclemencias del tiempo y a la contaminación atmosférica urbana. Para prevenir su degradación se requieren grandes inversiones y una estricta

y continua planificación, puesto que numerosos materiales que hacen parte de las edificaciones como el zinc, el hierro, el acero, el cobre, el bronce, el aluminio, el vidrio, el cemento, la madera, el ladrillo, la cerámica, la piedra o el mármol, entre muchos otros, cuando se encuentran al aire libre se exponen de manera ininterrumpida a los efectos corrosivos producidos por los agentes químicos que están contenidos en el aire de las ciudades contemporáneas, como el ácido nítrico, el dióxido de azufre, el amoníaco, el ozono, el metano y el ácido clorhídrico, por solo mencionar unos cuantos (Tidblad et al, 2012; Saiz-Jiménez, 2004). El dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, por ejemplo, al mezclarse con el agua pluvial dan como resultado la lluvia ácida, la cual afecta en algún grado a la mayoría de los materiales (Karaca, 2013). El costo del deterioro de los materiales de construcción debido a la contaminación del aire es enorme, y cuando no se cuenta con los recursos suficientes, las edificaciones patrimoniales quedan expuestas al deterioro y a la degradación.

En cuanto al patrimonio material que se encuentra al interior de museos y otras construcciones, cabe subrayar que también se expone continuamente a los riesgos de la degradación y la descomposición. Documentos, libros, papiros, así como objetos de arte hechos de cerámica, madera, piedra o lienzo (como las pinturas), requieren de rigurosos planes de mantenimiento para evitar que factores físicos, químicos o biológicos, los afecten. Frente a la inmensa tarea de mantener, conservar y preservar el patrimonio material de la humanidad, se abre una nueva posibilidad: la nanotecnología. De acuerdo a los resultados de las investigaciones adelantadas hasta el momento, esta nueva escala de trabajo e intervención permite una mejor y más sencilla labor en el manejo y la conservación de la herencia cultural (material) de la humanidad.

Orígenes de la nanotecnología

El 29 de diciembre de 1959, durante una reunión de la American Physical Society, celebrada en el Instituto de Tecnología de Ca-

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

lifornia (CALTECH por sus siglas en inglés), Richard Feynman —físico teórico neoyorquino, formulador de la mecánica cuántica y premio Nobel de Física en 1965— dio inicio al minúsculo concepto del Nanomundo, sin mencionar la palabra Nano en esa charla, puesto que tal concepto aún no existía. Feynman dijo: 'There's plenty of room at the bottom' ['hay mucho sitio al fondo'], y propuso la manipulación de átomos y moléculas en una escala apropiada para ello, que ahora se conoce como nanoescala.¹ Feynman señaló, además, que el cambio de magnitud que proponía generaría diversos fenómenos físicos, como por ejemplo: que la gravedad perdería relevancia mientras que la tensión superficial se volvería más importante. Algunos años después, durante una conferencia dictada en 1974 en la *Tokio University of Science*, el científico japonés Norio Taniguchi acuñó el término nanotecnología, aplicándolo a la transformación de materiales cuando se hace molécula por molécula y átomo por átomo. Pero fue el ingeniero estadounidense K. Eric Drexler quien popularizó la nano-ciencia y todas sus potencialidades, pues publicó dos libros muy difundidos sobre el tema: *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* (1986) y *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* (1992). En ellos hizo la primera descripción científica detallada de los avances de la miniaturización, y predijo que la evolución en cuanto a la reducción de escala en el campo de las manufacturas, o 'nano-evolución', revolucionaría por completo todos los procesos y productos industriales (Toumey, 2010). Desde entonces se han desarrollado muchos conceptos vinculados al prefijo nano, como nanociencia, nanomateriales, nanoescala, nanopartículas, nanodispositivos, y el que sirve de marco teórico al presente artículo: la nanoarquitectura.

El marcado interés que la nanotecnología ha despertado entre los científicos del mundo

a partir de su descubrimiento, se evidencia en el creciente número de publicaciones científicas que incursionan en ese campo. Los datos bibliométricos publicados por Karaulova et al (2014) revelan que, tan solo en Rusia, las publicaciones anuales dedicadas a la nanotecnología pasaron de menos de doscientos cincuenta en 1992, a más de cuatro mil quinientas en 2012, es decir, que el número de publicaciones se incrementó en mil ochocientos por ciento durante un período de dos décadas. Esta inusitada proliferación de investigaciones en nanotecnología abarca principalmente las siguientes disciplinas: física, química, desarrollo de materiales, ingeniería y arquitectura, óptica, energía, biología, ciencias de la tierra, medicina y ciencias de la computación.

Aplicaciones de la nanotecnología en la arquitectura

Actualmente —a partir de la nanotecnología— es posible construir edificios con propiedades que hace una década eran imposibles de lograr, e incluso, de imaginar, como la autolimpieza de las superficies expuestas a la intemperie, por ejemplo. Pero además se pueden aplicar, a las construcciones existentes, históricas o patrimoniales, nanoproducidos que tienen la capacidad de transformar las superficies normales en superficies inteligentes. Como resultado se disminuyen los costos de mantenimiento y se reduce muy significativamente el impacto ambiental generado por el mantenimiento tradicional de las edificaciones. Investigaciones muy recientes llevadas a cabo en Bélgica, Grecia, Italia, Holanda, Irán, Jordania, México, Reino Unido, República Checa, Rumania, Qatar, Turquía y otros países, han demostrado la inmensa utilidad de la nanotecnología en el mantenimiento, la conservación y la restauración del patrimonio arquitectónico (La Russa et al, 2016; Moradi & Taher Tolou, 2013; Kroftová & Zigler, 2013).

Una de las propiedades que la nanotecnología puede aportar a las superficies es la de ser autolimpiables, lo que se logra de dos maneras: mediante superficies hidrófobas y a través de

1 **Nanoescala:** abarca objetos que miden entre 1 y 999 nanómetros. Un nanómetro mide la milmillonésima parte de un metro. Un cabello humano mide cerca de 10.000 nanómetros de diámetro, y una hoja de papel corriente, 100.000 nanómetros.

superficies hidrófilas. La hidrofobia, en el lenguaje de los nanomateriales y las manosuperficies, se conoce como efecto loto [*Lotus-Effect*], porque las superficies tratadas con ese objetivo se comportan de igual manera que las hojas de loto, es decir: repeliendo el agua y manteniéndose permanentemente limpias. Esta es una protección muy apropiada para obras arquitectónicas expuestas a la lluvia o la humedad, y en climas secos pierde todo sentido su aplicación. En el otro extremo se encuentran los nanomateriales amigos del agua o hidrofílicos, que gracias a la aplicación superficial de partículas químicas nanométricas, logran lo que se llama una fotocatalisis autolimpiante, mediante la cual la suciedad de origen orgánico se descompone y puede ser fácilmente arrastrada por la lluvia (Benedix et al, 2000). Con este objetivo se han aplicado con bastante éxito partículas nanométricas de dióxido de titanio a un buen número de edificios alrededor del mundo. Gracias a ese nanomaterial, que ya se encuentra como producto comercial en muchos países, los ciclos de limpieza y mantenimiento de los edificios se pueden ampliar significativamente, mientras se reducen los costos de personal, detergentes, limpiadores y agua, lo que favorece directa e indirectamente al medio ambiente. Otras capacidades ‘inteligentes’ que la nanotecnología puede aportar al mantenimiento de las edificaciones son: anti-empañamiento, protección solar y protección UV en superficies de cristal; facilidad de limpieza para todo tipo de materiales de acabado; purificación del aire; aislamiento térmico; regulación de la temperatura; incombustibilidad; anti-grafiti; antirreflejos; antibacterial; anti-huellas dactilares; a prueba de arañazos y resistencia a la abrasión (Omar Hemeida, 2010; Fouad, 2010).

Métodos

Con base en una primera revisión de la literatura se evidenciaron dos tipos de documentos vinculados al objeto de estudio: investigaciones y documentos oficiales. Los documentos más relevantes fueron organizados tomando como base los procesos de experimentación

dirigidos a la restauración de edificaciones patrimoniales, al aplicar la nueva generación de compuestos nanoestructurados. Se identificaron y analizaron cuatro materiales que integran numerosos inmuebles patrimoniales alrededor del mundo: piedra, cerámica, morteros de cal y madera, y además, se incluyeron documentos que presentan resultados al intervenir pinturas murales y frescos con nanocompuestos. Por último, se definió el método de análisis e interpretación de los resultados.

Resultados

Avances en la ciencia de la nano-restauración

La nanotecnología ha demostrado en los últimos diez años gran potencial para la conservación de objetos históricos y artísticos elaborados en papel, papiro, madera, cerámica y piedra, así como pinturas murales, edificaciones, esculturas y otros monumentos, creando novedosas metodologías en la ciencia de la conservación (Ibala et al, 2014; Hamed, 2013; Rodríguez-Navarro et al, 2013; Dei & Salvadori, 2006). De otro lado, proporciona métodos no invasivos y no destructivos para la observación, evaluación, medición y diagnóstico de las afectaciones presentes en un bien patrimonial, permitiendo que los restauradores de hoy intervengan las obras patrimoniales sin dañarlas, de manera opuesta a lo que sucedía en un pasado muy reciente (Moradi & Taher Tolou Del, 2013). Este nuevo paradigma en la ciencia de la restauración — el estudio de los fenómenos fisicoquímicos a la nanoescala— ha dado paso a “... metodologías que pueden revertir los procesos de degradación de las obras de arte, y en muchos casos, restaurar su apariencia original” (Giorgi et al, 2010: 695).

Cabe subrayar que el deterioro del patrimonio cultural urbano se incrementó notoriamente en la última década debido a dos factores: la polución urbana y el cambio climático. En este contexto NANOMATCH EU-Research Project

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

está trabajando con miras a desarrollar una nueva generación de materiales nanoestructurados, innovadores, que fomenten la conservación de los materiales de construcción del patrimonio material urbano, teniendo como prioridades la piedra, la madera y el vidrio. Los resultados preliminares del proyecto franco-italiano Galileo, que forma parte de NANOMATH, han demostrado que gracias a los nanomateriales es posible restablecer la fortaleza de las piedras calizas que sustentan antiguas pinturas murales, de manera que se restaura el material de base, desde su nanoestructura (Nanomatch, 2015).

- **Piedra.** La piedra es el material que con mayor frecuencia se encuentra en edificios patrimoniales, murallas, bajo relieves y esculturas urbanas antiguas. Los materiales pétreos expuestos a los rigores de la intemperie y las variaciones del clima están continuamente sometidos al ataque de fenómenos físicos, químicos y biológicos muy severos, que pueden alterar sus propiedades estáticas y mecánicas, y en consecuencia, ponen en riesgo las obras patrimoniales de las que hacen parte (Licchelli et al, 2014). Los microorganismos eucariotas, especialmente las algas verdes y los hongos, pueden tener un impacto negativo sobre la estructura y la apariencia del patrimonio cultural construido en piedra (Cutler & Viles, 2010). Debido a su estructura porosa, algunos tipos de piedra —como las areniscas y las calizas— resultan altamente susceptibles al ataque de los agentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el ambiente. Los procesos de degradación de las piedras porosas están muy vinculados a la humedad, la salinidad y la contaminación del ambiente.

En cuanto a la humedad, Stefanidou et al (2013) consideran que la presencia de agua, ya sea en forma de lluvia o de humedad del aire, en conjunción con la polución de las ciudades contemporáneas, es causa importante de la degradación de rocas sedimentarias como las areniscas, y esa degradación proporciona un campo para la colonización de organismos

biológicos que incrementa el deterioro y la erosión del material rocoso. Si bien estos investigadores griegos no centran su trabajo en bienes patrimoniales, sus resultados son aplicables al campo de la restauración y la conservación del patrimonio material urbano, puesto que son incontables los edificios y monumentos construidos con piedra arenisca alrededor del mundo. A partir de una serie de pruebas con piedras areniscas de la región de Demati (Grecia), que involucraron el uso de un repelente de agua tradicional enriquecido con nanosílice [partículas nanométricas de sílice] en diversas concentraciones, Stefanidou et al (2013) concluyeron que la adición de nanosílice aumenta los atributos de repelencia al agua en soluciones convencionales sin alterar las propiedades originales de las areniscas. Según sus datos, la adición del nanosílice a los repelentes tradicionales logró triplicar su efectividad. Por su parte Zornoza-Indart et al (2015) realizaron pruebas aplicando Nano Estel®, producto comercial que contiene partículas nanométricas de óxido de silicio, a muestras de calcarenita, roca arenisca formada por sedimentación de arenas calcáreas que se caracteriza por su abundante porosidad. Las muestras que presentaban un alto grado de deterioro por efecto de la humedad y la salinidad del ambiente, fueron tomadas de la fortaleza española de Bizeta, en Túnez, construida en el siglo XVI. El trabajo se orientó a valorar la efectividad alcanzada por las nanopartículas de óxido de silicio bajo diferentes regímenes de humedad relativa, concluyendo que los resultados son mejores en los ambientes menos húmedos.

En relación a la salinidad Ruiz-Agudo et al (2007) estudiaron los efectos que los ambientes costeros generan en las piedras porosas a macro, micro escala, utilizando para ello tomografía de rayos X y microscopio de barrido ambiental. Tan riguroso análisis les permitió concluir que la cristalización del sodio y del magnesio afecta a las piedras porosas (calizas en este caso) de manera diferente. El decahidrato de sulfato de sodio —más cono-

cido como mirabilita² o sal de Glauber— tiende a cristalizarse en grandes poros y cerca de la superficie de la piedra, generando incrustaciones externas. En contraste, el sulfato de magnesio heptahidratado o epsomita³ se distribuye de manera homogénea por todo el sistema de poros, sean grandes o pequeños, generando la fragmentación, el agrietamiento e incluso la fractura de las piedras. De igual manera Cárdenes et al (2013) señalan que el crecimiento cíclico de cristales salinos en el sistema poroso de las rocas, afecta la estructura misma del material, deteriora su capacidad de resistencia a la compresión y puede comprometer su integridad. Frente a esta problemática Ruffolo et al (2015) realizaron experimentos en muestras de piedra caliza procedente de una cantera próxima a la histórica ciudad de Modica, de la cual se extrajeron grandes cantidades de material pétreo para la construcción de edificaciones durante el Barroco italiano, especialmente al este de Sicilia. Sus resultados evidencian que la aplicación de nanolime [partículas nanométricas de cal apagada] aporta resistencia mecánica a la piedra degradada y excelente resistencia frente a la salinidad del ambiente costero; mientras que la aplicación de nanopartículas de silicato de etilo, también incrementa la resistencia mecánica de la piedra, pero no es tan eficiente en relación a las afectaciones por causa de la salinidad ambiental.

Otro factor que influye directamente en el deterioro de la piedra es su procedencia, porque de ella dependen su estructura, compactación y porosidad. En este sentido Cultrone et al (2008) analizaron dos tipos de calizas muy utilizadas en edificaciones patrimoniales de Sicilia: la llamada *Pietra bianca di Melilli* [piedra caliza de Melilli] y la *Calcare di Siracusa* [piedra caliza de Siracusa]. Estos dos tipos de piedras calizas, que se formaron durante el Oligo-Mioceno, es decir, entre 24

y 37 millones de años atrás, presentan muy diferentes rangos de vulnerabilidad frente a los efectos erosivos de la salinidad, y esto se debe esencialmente al tamaño y la distribución de su sistema de poros. La irregularidad y mayor cantidad de poros en la caliza de Siracusa la hace más vulnerable a los procesos de cristalización de sales.

Es importante subrayar que la piedra caliza, por características naturales como su aspecto atractivo, su facilidad de explotación en las canteras y su manejabilidad, ha sido muy apreciada por los constructores de todas las épocas y lugares. En consecuencia, hace parte de muchas obras del patrimonio cultural universal. Aunque la durabilidad de la piedra caliza depende de su lugar de origen, como ya se dijo, como ya se dijo, las patrimoniales en piedra, es la procedencia del material, su porosidad natural le permite una alta absorción de agua, y la hace vulnerable a daños por la cristalización de sales (Guiffrida, 2013; Cultrone, 2008). Otros factores como el clima, la contaminación y una prolongada falta de mantenimiento, pueden afectar las piedras calizas generando daños extremadamente agresivos como la erosión, la pérdida de material, la exfoliación y descamación, y en algunos casos, la degradación total de la piedra, es decir, su desintegración (Ruffolo et al, 2014). De igual manera Kramar et al (2011), a partir del estudio de dos monumentos construidos con piedra caliza negra, procedente de las canteras de Eslovenia central, que es uno de los materiales naturales más bellos y apreciados de ese país, encontraron una serie de daños profundos: desintegración granular, descamación, desmoronamiento, eflorescencias, costras, y la presencia de microorganismos. Todo lo anterior evidencia por qué la degradación de la piedra caliza en los monumentos y edificios patrimoniales es un tema crítico en el campo de la restauración.

Frente a esta problemática Ruffolo et al (2014) valoraron los cambios alcanzados sobre piedra caliza afectada por cristalización

2 Del latín *mirabilis*, es decir admirable, que se puede ver.

3 Nombre que proviene de la localidad de Epsom, en Gran Bretaña, donde existen depósitos abundantes.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

de sales, cuando se aplica Nanorestore®, una suspensión de partículas nanométricas de cal disueltas en alcohol isopropílico. Como resultado encontraron que los tratamientos a la nanoescala conducen a una mayor cohesión superficial, sin que se produzcan grandes variaciones de color, por lo que pueden considerarse procedimientos estéticamente aceptables. De otro lado Dei y Salvadori (2006) han centrado sus investigaciones en dos elementos a base de cal que hacen parte integral de incontables edificios patrimoniales: las piedras calizas y las pinturas murales a base de cal. Ellos realizaron pruebas con nanopartículas de hidróxido de calcio (cal apagada) sobre dos tipos de piedras: la *Gallina* y la *Alberese*, que hacen parte de numerosas obras patrimoniales de Mantua y Florencia, en Italia. Sus resultados señalan que las partículas nanométricas de cal apagada se pueden considerar un material innovador, totalmente compatible y eficiente para consolidar pinturas murales a base de cal y superficies arquitectónicas de piedra caliza. Por su parte Lichelli et al (2014) aplicaron una serie de nanopartículas de diferentes compuestos (cloruro de calcio, hidróxido de sodio, nitrato de estroncio y sulfato de sodio) a piedras calizas procedentes de las canteras de Nardó, en Italia, las cuales se caracterizan por su gran porosidad (son bio-calcareniticas). Luego de aplicar los nanocompuestos a la superficie pétreo los investigadores testearon la absorción de agua en estado líquido, la permeabilidad al vapor de agua, los cambios de color de la piedra, la profundidad de penetración y la resistencia a la meteorización inducida por la salinidad del aire; y concluyeron que todas las nanopartículas que aplicaron a estas piedras de alta porosidad, colaboran con la consolidación del material y reducen significativamente la degradación por causa de los agentes ambientales.

Pesce et al (2013) realizaron pruebas sobre piedras calizas que durante siglos formaron parte de la Catedral de Salisbury y la Abadía de Bath, las cuales fueron extraídas, original-

mente, de las canteras de Chilmark y Bath respectivamente, localizadas al suroeste del Reino Unido. Aplicaron nanolime disponible como producto comercial, a las piedras afectadas por el tiempo y la intemperie, y estudiaron su respuesta usando varias técnicas como la microscopía óptica y electrónica, y la medición de la resistencia a la perforación. También aplicaron nanolime a piedras en buen estado extraídas de las mismas canteras. Concluyeron que la piedra de Chilmark degradada absorbe agua a un rango siete veces superior que la muestra sin degradar; en tanto que las muestras de Bath no mostraron diferencia significativa en ese aspecto. En relación a los cambios de las propiedades de las muestras degradadas tras aplicar las nanopartículas, señalan que el diámetro de la porosidad se redujo significativamente: en las muestras de Chilmark en un 38%, y en las de Bath, hasta en un 75%. Veinte días después de aplicar las nanopartículas, ninguna de las muestras mostró cambios en cuanto a resistencia a la perforación, pero la muestra de Bath presentó un pequeño incremento luego de seis meses.

Borsoi et al (2015), teniendo en cuenta que durante la última década el llamado nanolime se ha empleado para consolidar piedras calizas y pinturas murales en edificaciones patrimoniales, señalan que cuando se emplea para la consolidación de masa, como en piedras deterioradas, el nanolime presenta algunas limitaciones, siendo la más destacada su irregular dispersión al interior del material. Con el fin de resolver ese problema, es decir, el mecanismo de transporte del nanolime al interior de los materiales porosos, lo aplicaron a diversas muestras de piedra Maastricht, provenientes de las provincias de Limburgo de Holanda y Bélgica, donde ese tipo de piedra se emplea como material de construcción tradicional. Esta caliza, suave al tacto y de color amarillento, tiene alta porosidad (50%) y la distribución de sus poros es uniforme. Los resultados de Borsoi et al (2015) demuestran que la distribución del nanolime está estre-

chamente relacionada con las propiedades del disolvente; y que los disolventes alcohólicos garantizan una dispersión estable que penetra en profundidad en el material, aunque durante el período de secado se presenta una migración parcial de las nanopartículas de cal hacia la superficie.

Por su parte Goffredo et al (2014) evaluaron el potencial del dióxido de titanio cuando se aplica a la piedra travertina, una caliza de alta porosidad ampliamente utilizada en edificios históricos y monumentos en la cuenca del Mediterráneo, que continua siendo una de las piedras que con mayor frecuencia se usan en la industria de la construcción, especialmente en fachadas y pisos. Sus resultados confirman que el tratamiento con dióxido de titanio es compatible con la piedra travertina, y cumple con tres requisitos: mantiene el aspecto original de la piedra, es eficiente generando la autolimpieza de la superficie, y su aplicación no presenta efectos adversos.

Otros tipos de piedra muy utilizados en obras patrimoniales también han sido valorados luego de recibir partículas nanométricas. La Russa et al (2016) realizaron pruebas con mármol de Carrara proveniente de las canteras de los Alpes Apuanos, en la Toscana italiana, material de coloración blanca, muy homogéneo en su estructura interna, cuya porosidad es menor al 2%; y además, con muestras de calcarenita provenientes de la cantera de Cassibile, en Siracusa, cuya porosidad es irregular y supera el 30%. A estos dos tipos de piedra les adicionaron partículas nanométricas de dióxido de titanio con el fin de evaluar sus propiedades autolimpiantes e hidrofóbicas. Las pruebas se realizaron mezclando el dióxido de titanio con tres tipos de aglutinante. El mejor comportamiento en términos de hidrofobicidad, durabilidad y facultad de autolimpieza, lo presentó la mezcla de dióxido de titanio con suspensión de agua de acrílico (Fosbluid®). Por su parte López-Arce et al (2013) realizaron experimentos con muestras de dolomita, una roca

sedimentaria que forma parte de numerosos edificios patrimoniales de la ciudad de Madrid, España. Aplicaron a las muestras de dolomita Nanorestore®, un producto comercial desarrollado por la Universidad de Florencia que contiene partículas nanométricas de hidróxido de calcio. Entre sus conclusiones se destaca que la aplicación de las nanopartículas mejora la resistencia a la perforación, aporta cohesión y reduce significativamente la penetración del agua en la roca.

- **Cerámica.** Los ladrillos y las tejas de arcilla cocida son parte relevante de los materiales de construcción utilizados en edificios patrimoniales de todo el mundo, pero factores como la humedad, la contaminación y el desarrollo de organismos biológicos, pueden afectar y deteriorar los materiales cerámicos. Son numerosas las investigaciones que trabajan en este campo de la conservación del patrimonio. Manivasakan et al (2010) valoraron los efectos de la adición de partículas nanométricas de dióxido de titanio en ladrillos refractarios de sílice, detectando cambios en varias propiedades del material cerámico: aumento en la fuerza de trituración en frío, aumento de la densidad aparente, disminución de la porosidad aparente, y mayor resistencia a la deformación. Los resultados de estos investigadores muestran que un 0,5% de aditivos a nanoescala son suficientes para generar estos beneficios. En cuanto a las afectaciones por causas orgánicas, Graziani y D’Orazio (2015) orientaron su investigación a la prevención de la bio-deterioración de ladrillos expuestos a la intemperie por largos períodos de tiempo, especialmente en edificios patrimoniales. Para su trabajo tuvieron en cuenta dos aspectos: que se mantuvieran las propiedades estéticas de los ladrillos, y que se conservara la integridad de todos los elementos. Aplicaron dióxido de titanio fotocatalítico a diversas muestras, y concluyeron que este nano-recubrimiento es capaz de inhibir la contaminación e incrustación biológica en la superficie de los ladrillos. Con respecto a la afectación causada por la hu-

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

medad, Lubelli y van Hees (2011) señalan que los productos repelentes al agua tradicionales generan una película superficial en los ladrillos que los "sella" y les impide perder humedad. Esto genera daños en el material cerámico cuando la humedad proviene del interior de la edificación, o del subsuelo. Frente a esta problemática realizaron pruebas con dos nano-repelentes, aplicándolos a ladrillos de arcilla cocida de tamaño de 10 X 10 X 5 cm, con una porosidad del 29%. Concluyeron que los nanoproductos reducen significativamente el ingreso del agua a los ladrillos, sin bloquear la superficie de los mismos, por lo que no alteran el comportamiento natural de secado de la cerámica.

De otro lado, Graziani et al (2014) subrayan que el comportamiento de un material depende fuertemente de la morfología del sustrato al que se aplique, de manera que no se deben extrapolar los resultados de las investigaciones que se adelantan en diferentes tipos de sustratos (como de la piedra al ladrillo, por ejemplo). El objetivo de su investigación fue el de valorar las propiedades fotocatalíticas de las partículas nanométricas de dióxido de titanio, cuando se aplican sobre superficies de ladrillo cocido, y qué efectos autolimpiantes y de repelencia al agua aportan al material cerámico. Concluyeron que la eficiencia fotocatalítica del ladrillo especialmente tratado con nanopartículas de dióxido de titanio, es siete veces mayor al de las muestras no tratadas; que la reducción de la absorción de agua es bien evidente en las muestras tratadas mientras que es insignificante en las no tratadas; y que lo mismo sucede con la capacidad de autolimpieza, especialmente cuando las manchas son generadas por organismos biológicos. Así mismo, Graziani et al (2013) señalan que el crecimiento de microalgas afecta en gran medida las propiedades estéticas de las fachadas en todo el mundo, causa biodeterioro en los materiales de construcción y puede comprometer totalmente la integridad de los elementos. Su investigación valora la capa-

dad biocida de las partículas nanométricas de dióxido de titanio, cuando son aplicadas sobre ladrillos cocidos, con el objetivo de inhibir la incrustación de las microalgas en el material cerámico. Concluyeron que bajo las condiciones de exposición a luz ultravioleta óptimas para el desarrollo de las microalgas, el dióxido de titanio impide eficazmente su adhesión a la superficie del ladrillo, lo que se debe a su capacidad fotocatalítica. Por ende, la capacidad autolimpiante que generan las partículas nanométricas de dióxido de titanio sobre el ladrillo es muy eficiente.

- **Morteros de cal.** Los nanocompuestos también se utilizan para reforzar las estructuras de los edificios patrimoniales. Una técnica es la aplicación de nanofibras de alta resistencia para la estabilización, el fortalecimiento y el refuerzo de estructuras históricas, especialmente en edificios construidos con mampostería cuyo aglutinante es el mortero de cal. En este sentido Kroftova et al (2013) clasificaron los polímeros nanocompuestos en tres categorías: iso-dimensional (dióxido de silicio), fibras (fibras de celulosa mono-cristalina, y nano-tubos de carbono) y partículas de placa como grafito o silicatos multicapa. Estos autores también experimentaron con aglutinantes cuya composición corresponde aproximadamente al mortero histórico de los períodos gótico, renacentista y barroco, pero elaboradas con fibras de carbono con un alto módulo de elasticidad y alta resistencia a la tracción. De otro lado, Arizzi et al (2015) evaluaron la eficacia de la dispersión de partículas nanométricas de hidróxido de calcio cuando se emplean con el objetivo de consolidar morteros de cal en edificaciones patrimoniales. Ellos emplearon tres productos: CaLoSil®, Nanorestore® y Merck®. Los resultados se evaluaron en términos de la mejora en la carbonatación del mortero [que disminuye significativamente la porosidad del mismo], y los cambios en su textura y consolidación. De las diversas muestras se encontró que CaLoSil® a 5 gramos por litro, produjo la mejora más significativa en

el grado de carbonatación y en el grado de compactación del mortero; siendo el producto que causó menores cambios de coloración al material. Es importante destacar que esta investigación tiene aplicación específica en los trabajos de restauración de morteros de cal, especialmente en climas tropicales y ambientes con alta humedad relativa.

- **Madera.** La madera es un material presente en numerosos edificios patrimoniales alrededor del mundo. En algunos casos su función es estructural, en otros, se emplea como material de acabado. Por ser un material vivo, compuesto mayoritariamente de celulosa, lignina y hemicelulosa, es muy sensible a los ataques biológicos, la humedad y la descomposición orgánica. En el campo de la nanotecnología se han alcanzado grandes avances para evitar la degradación de la madera en las construcciones patrimoniales.

Gholamiyan et al (2012) realizaron experimentos con partículas nanométricas solubles en agua (nano-zycosil y nano-zicofil), aplicándolas por el método de difusión de vapor de agua a muestras de madera de álamo (*Populus nigra*) provenientes de los bosques de Irán. Realizaron análisis comparativo con revestimientos de laca y barniz de poliéster aplicados por imprimación de la superficie. Concluyeron que los mejores resultados en cuanto a la difusión del producto a través de la madera y la eficacia del tratamiento los presentó el nano-zycosil. Por su parte Tuduce et al (2012) realizaron pruebas con muestras de abeto (*Picea abies*) provenientes de la puerta de acceso principal al Centro Histórico de Brasov, Rumania, tomadas durante su restauración. A las muestras, débiles y degradadas, se les aplicó Paraboloid B 72® [resina acrílica termoplástica muy utilizada para la consolidación de obras patrimoniales construidas en madera], pero en este caso, enriquecida con partículas nanométricas de óxido de zinc. Las muestras se clasificaron en tres categorías de acuerdo con su grado de deterioro. Nivel I: muy degradada y con

pérdida total de resistencia y cohesión. Nivel II: alta degradación pero con cohesión estructural. Nivel III: escasa degradación. Las muestras, tratadas por inmersión durante una hora, reaccionaron al tratamiento adquiriendo un grado de consolidación acorde con su nivel de degradación. Nivel I: alto valor de consolidación. Nivel II: nivel medio de consolidación. Nivel III: escaso nivel de consolidación. Un año después el equipo de Tuduce et al (2013) realizó nuevas pruebas con Paraboloid B 72® enriquecido con partículas nanométricas de óxido de zinc, al 1%, en esta ocasión, aplicándolas a muestras de álamo temblón (*Populus tremula*). Si bien sus resultados no fueron concluyentes, sí establecieron que el tratamiento se incrementa la capacidad hidrofóbica de la madera tratada.

Por su parte Afrouzi et al (2015) teniendo en cuenta que al tratar químicamente la madera para mejorar sus propiedades es más importante la distribución del producto químico que la absorción del mismo —lo que depende especialmente de la humedad y la permeabilidad de la pulpa—, ponderaron la incidencia de los contenidos de humedad de la albura del álamo (*Populus deltoides*), cuando es tratada con partículas nanométricas de dióxido de titanio. Estudiaron tres niveles de concentración de humedad: 0,5; 1,0 y 1,5%, y concluyeron que la mejor y más uniforme distribución de las nanopartículas de dióxido de titanio se logra con los menores niveles de humedad. Por tanto, recomiendan que los tratamientos con estas nanopartículas sobre madera de álamo se realicen cuando el contenido de humedad de la madera sea de 0%. De manera similar, Chehreh y Mastari (2015) evaluaron la capacidad de las nanopartículas de óxido de cobre para minimizar el cambio de color que sufre la madera de álamo (*Populus deltoides*) cuando está expuesta a la intemperie. Concluyeron que el tratamiento con este material disminuye significativamente esos cambios.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

Bertolini et al (2010) revisaron las ventajas que la nanotecnología puede aportar a la conservación de obras arquitectónicas y civiles construidas en madera (o con elementos en madera) de estatus patrimonial. Dentro de sus resultados destacan que el tratamiento con nanopartículas genera en la madera las siguientes ventajas: protección UV, impermeabilización, protección ante la degradación por agentes orgánicos, y capacidad retardante ante el fuego. Además, señalan que las partículas nanométricas de plata y cobre generan una superficie que bloquea el contacto con hongos y bacterias, tiene capacidades bactericidas e inhibe el desarrollo de agentes xilófagos. En una investigación experimental, Bertolini et al (2013) realizaron ensayos con cuatro tipos de madera: Abeto (*Abies alba*), abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), roble (*Quercus robur*) y Alerce (*Larix decidua*) tomadas de un trabajo de restauración. Inicialmente realizaron pruebas de laboratorio en muestras pequeñas de madera, y luego, las realizaron a piezas de tamaño real. El objetivo de la investigación fue el de mejorar la resistencia mecánica de las estructuras de madera pertenecientes al patrimonio cultural. Para ello aplicaron nanotubos de carbono (Nanocyl® serie 7000) disueltos en dos medios: diferentes solventes, lo que les permitió valorar la eficiencia de la aplicación por capilaridad; y resina epóxica, que por su densidad genera una película superficial como la de una pintura. Concluyeron que los tratamientos realizados sobre elementos estructurales confirman la hipótesis de un aumento del rendimiento mecánico.

Yin (2015) realizó experimentos con madera de ciprés (*Taxodium distichum*) y cedro rojo occidental (*Thuja plicata*) procedentes de los bosques norteamericanos, con el objetivo de aportar datos para la elaboración de un protocolo que sistematice la conservación de las edificaciones patrimoniales construidas en madera, o elementos de madera del patrimonio material que se encuentren a la intempe-

rie. Realizó pruebas con dos nanopartículas metálicas (óxido de hierro y óxido de cinc), y concluyó que las nanopartículas metálicas generan un filtro que bloquea la luz ultra violeta, reduciendo las afectaciones a la madera por este factor.

- **Pinturas murales.** La cal se ha utilizado como material aglutinante en edificios de todo el mundo y durante siglos. Las culturas del Antiguo Egipto, la Antigua Grecia, el Imperio Romano, los mayas y aztecas en Mesoamérica y los incas en Suramérica, así como otras civilizaciones del cercano y lejano oriente han recurrido a la cal como material de construcción. Una gran parte de las pinturas murales o frescos que hacen parte de los edificios patrimoniales se hicieron sobre muros que contienen cal como material aglutinante. Pero la cal se deteriora por los esfuerzos mecánicos que surgen de la cristalización de sales provenientes del ambiente, los cuales por lo general se producen en la superficie, afectando gravemente las pinturas murales. En este sentido en la ciencia de la restauración se han utilizado durante mucho tiempo los polímeros, principalmente acrílicos y de vinilo, con el objetivo de crear una capa repelente al agua sobre la pared pintada. Pero estos tratamientos, en muchos casos afectan aún más la pintura mural.

Frente a esta problemática, en 2010 Giorgi et al realizaron experimentos sobre pinturas murales en edificios de la antigua ciudad maya de Calakmul, en Mesoamérica, que tiene más de 1.500 años de antigüedad. Aplicaron a las pinturas una mixtura de nanopartículas de hidróxido de calcio e hidróxido de bario, logrando un efecto muy significativo de consolidación, incluso en pinturas murales afectadas por grandes cantidades de sal. De otro lado, Dei y Salvadori (2006) trabajaron sobre algunos de los frescos de la iglesia de San Zenón, en Verona, Italia. Aplicaron a los frescos nanopartículas de hidróxido de calcio (cal apagada) dispersas en medio alcohólico, y de hidróxido de magnesio, como

marcadores. Concluyeron que las nanopartículas de hidróxido de calcio tienen alcances significativos para el tratamiento de soportes poco porosos, y contribuyen con la consolidación superficial del material, reforzando la estructura del fresco, mientras que a un nivel más profundo reducen la capacidad del muro para absorber agua, lo que colabora con su preservación. Afirman, además, que el uso de estos compuestos inorgánicos a la nanoescala, no genera alteraciones a las características físico-químicas de los frescos, no altera su coloración y al aplicarse por aspersión, suaviza la superficie y re-cohesiona las escamas de pigmento.

Comentarios

Durante la última década se han realizado cuantiosos experimentos con nanopartículas en edificaciones patrimoniales de diversas regiones del mundo. Los materiales más comunes de estas edificaciones como la piedra caliza, la piedra arenisca, el mármol, la cerámica, la madera y los morteros de cal, han sido intervenidos con nanopartículas de diversos compuestos químicos. Los resultados de estas investigaciones, presentados a lo largo del artículo, evidencian que el tratamiento de los edificios patrimoniales con nanocompuestos permite un mantenimiento más eficiente de los mismos, contribuye a su conservación y está generando novedosos y muy eficaces procesos para la restauración del patrimonio cultural material de la humanidad.

Referencias

- Afrouzi, Y. M.; Marzbani, P. & Omidvar, A. (2015). The effect of moisture content on the retention and distribution of nano-titanium dioxide in the wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 17, N° 2: 385-390.
- Arizzi, A.; Gomez-Villalba, L. S.; Lopez-Arce, G.; Cultrone, G. & Fort, R. (2015). Lime mortar consolidation with nanostructured calcium hydroxide dispersions: the efficacy of different consolidating products for heritage conservation. *European Journal of Mineralogy*, vol. 2015, N° 3: 311-324.
- Bagnall, G. (2015). Performance and performativity at heritage sites. *Museum and society*, vol. 1, Issue 2: 87-103.
- Benedix, R.; Dehn, F.; Quaas, J. & Orgass, M. (2000). Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Building Materials. *Leipzig Annual Civil Engineering Report*, N° 5: 157-168.
- Bernat, M.; Janowski, A.; Rzepa, S.; Sobieraj, A. & Szulwic, J. (2014). Studies on the use of terrestrial laser scanning in the maintenance of buildings belonging to the cultural heritage. *14th Geoconference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, SGEM. ORG, Albena, Bulgaria*, 3: 307-318.
- Bertolini, C.; Invernizzi, S.; Marzi, T. & Tulliani, J.M. (2013). The reinforcement of ancient timber-joints with carbon nano-composites. *Meccanica*, vol. 48, N° 4: 1925-1935.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

- Bertolini, C.; Crivellaro, A.; Marciniak, M.; Marzi, T. & Socha, M. (2010). *Nanostructured materials for durability and restoration of wooden surfaces in architecture and civil engineering*. World Conference on Timber Engineering-WCTE, 31 Aug. 2010.
- Borsoi, G.; Lubelli, B.; van Hees, R.; Veira, R. & Santos Silva, A. (2015). Understanding the transport of nanolime consolidants within Maastricht limestone. *Journal of Cultural Heritage*, artículo en Prensa.
- Cárdenes, V.; Mateos, F. J. & Fernández-Lorenzo, S. (2013). Analysis of the correlations between freeze-thaw and salt crystallization tests. *Environmental Earth Sciences*, Vol 71, N° 3: 1123-1134.
- Cultrone, G.; Russo L. G.; Calabrò C.; Urošević M. & Pezzino A. (2008). Influence of pore system characteristics on limestone vulnerability: a laboratory study. *Environmental Geology*, Vol. 54, N° 6: 1271-1281.
- Chehreh, F. & Mastari Farahani, M. (2015). Surface droplet contact angle and colour characteristics of Eastern Cottonwood treated with nano-copper oxide and exposed to natural weathering. *International Wood Products Journal*, Vol. 6, N° 2: 69-71.
- Cutler, N. & Viles, H. (2010). Eukaryotic Microorganisms and Stone Biodeterioration. *Geomicrobiology Journal*, N° 27: 630-646.
- Dei, L. & Salvadori, B. (2006). Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 7, N° 2:110-115.
- Drexler, K. E. (1996). *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. London: Fourth Estate.
- Drexler, K. E. (1992). *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*: New York: Wiley & Sons.
- Fouad, F. F. (2012). *NanoArchitecture and Sustainability*. Thesis of Master of Science in Architecture. University of Alexandria.
- Gebessler, A. & Eberl, W. (1980). *Conservation and maintenance of historic buildings in the German Federal Republic. A handbook*. Berlin: Gebessler & Eberl.
- Giorgi, R.; Baglioni, M.; Berti, D. & Baglioni, P. (2010). New Methodologies for the Conservation of Cultural Heritage: Micellar Solutions, Microemulsions, and Hydroxide Nanoparticles. *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, N° 6: 695-704.
- Giorgi, R.; Ambrosi, M.; Toccafondi, N. & Baglioni, P. (2010). Nanoparticles for Cultural Heritage Conservation: Calcium and Barium Hydroxide Nanoparticles for Wall Painting Consolidation. *Chemistry – A European Journal*, N° 16: 9374-9382.

- Gholamiyan, H.; Tarmian, A.; Hosseini, K. & Azadfallah, M. (2012). The potential use of organosilane water soluble nanomaterials as water vapor diffusion retarders for wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 14, N° 1: 43-52.
- Goffredo, G.; Quagliarini, E.; Bondioli, F. & Mufano, P. (2014). TiO₂ nanocoatings for architectural heritage: Self-cleaning treatments on historical stone surfaces. *Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, vol. 228, N° 1: 2-10.
- Goy, R. H. (1973). The international protection of the cultural and natural heritage. *Netherlands Yearbook of International Law*, vol. 4: 117-141.
- Graziani, L. & D'Orazio, M. (2015). Biofouling Prevention of Ancient Brick Surfaces by TiO₂-Based Nano-Coatings. *Coatings*, N° 5: 357-365.
- Graziani, L.; Quagliarini, E.; Bondioni, F. & D'Orazio, M. (2014). Durability of self-cleaning TiO₂ coatings on fired clay brick façades: Effects of UV exposure and wet & dry cycles. *Building and Environment*, N° 71: 193-203.
- Graziani, L.; Quagliarini, E.; Osimani, A.; Aquilanti, L.; Clementi, F.; Yéprémian, C.; Lariccia, V.; Amoruso, S. & D'Orazio, M. (2013). Evaluation of inhibitory effect of TiO₂ nanocoatings against microalgal growth on clay brick façades under weak UV exposure conditions. *Building and Environment*, N° 64: 38-45.
- Guiffrida, A. & Ciliberto, E. (2013). Syracuse Limestone: From the Past a Prospect for Contemporary Buildings. *Geosciences*, 2013, 3: 159-175.
- Hamed, S. A. M. (2013). Possibilities application of nanoscience and nanotechnology in conservation of archaeological wood: A review. *Jokull Journal*, vol. 63: 9-19.
- Ibala, I.; El Ladki, D.; Ezzeldeen, O.; Saeed, S. & Saoud, K. (2014). "Microwave Assisted Preparation of Calcium Hydroxide and Barium Hydroxide Nanoparticles and Their Application for Conservation of Cultural Heritage". In *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* (pp. 342-352). Switzerland: Springer International Publishing.
- Karaca, F. (2013). Mapping the corrosion impact of air pollution on the historical peninsula of Istanbul. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 14, N° 2: 129-137.
- Karaulova, M.; Shackleton, O.; Gök, A. Kotsemir, M. & Shapira, P. (2014). *Nanotechnology Research and Innovation in Russia: A Bibliometric Analysis*. Manchester: Manchester Institute of Innovation Research / University of Manchester.
- Kramar, S.; Miladenovic, A.; Pristacz, H. & Mirtic, B. (2011). Deterioration of the black drenov grič limestone on historical monuments (Ljubljana, Slovenia). *Acta Carsologica*, vol. 40, N° 3: 483-495.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA, CIUDAD, MEDIO AMBIENTE

- Kroftová, K.; Cejka, T. & Zigler, R (2013). *Restoration, stabilization and strengthening of heritage buildings with nano-fibre and high-strength fibre base materials*. 1st Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering, ACE 2013, pp. 392-398.
- La Russa, M.F.; Rovella, N.; Alvarez, M.; Belfiore, C.; Pezzino, A.; Crisi, G & Ruffolo, S. (2016). Nano-TiO₂ coatings for cultural heritage protection: The role of the binder on hydrophobic and self-cleaning efficacy. *Progress in Organic Coatings*, N° 91: 1-8.
- Lichelli, M.; Malagodi, M.; Weththimuni, M. & Zanchi, C. (2014). Nanoparticles for conservation of bio-calcarene Stone. *Applied Physics A*, vol. 114, Issue 3: 673-683.
- López-Arce, P.; Zomoza-Indart, A.; Gomez-Villalva, L. S. & Fort, R. (2013). Short- and Longer-Term Consolidation Effects of Portlandite (CaOH)₂ Nanoparticles in Carbonate Stones. *Journal of Materials in Civil Engineering*, N° 25: 1655-1665.
- Lubelli, B. & van Hees, R. P. J. (2011). *Evaluation of the Effect of Nano-Coatings with Water Repellent Properties on the Absorption and Drying Behaviour of Brick*. Hydrophobe VI. 6th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials Aedificatio Publishers, 125 – 136.
- Manivasakan, P.; Rajendran, V.; Ranjan, P.; Sahu, B.; Panda, B.; Valiyaveetill, S. & Jegadesan, S. (2010). Effect of TiO₂ Nanoparticles on Properties of Silica Refractory. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 93, N° 8: 2236-2243.
- Moradi, M. A. & Taher Tolou Del, M. S. (2013). Modern technology necessity in academic training to protect of Iran architectural heritage authenticity. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, vol. 23, Nos. 1 - 2: 23-33.
- Munasinghe, H. (2005). The politics of the past: constructing a national identity through heritage conservation. *International Journal of Heritage Studies*, 11(3), 251-260.
- Nanomatch (2015). *Nanomatch. Newsletter 2015*. Unión Europea: Nanomatch.
- Omar Hemeida, F. A. (2010). *Green Nanoarchitecture*. Thesis of Master of Science in Architecture. University of Alexandria.
- Pesce, G.L.; Morgan, D.; Odgers, D.; Henry, A.; Allen, M. & Ball, R. (2013). Consolidation of weathered limestone using nanolime. *Construction Materials*, vol. 166, Issue CM4: 213-228.
- Rodriguez-Navarro, C.; Suzuki, A. & Ruiz-Agudo, E. (2013). Alcohol Dispersions of Calcium Hydroxide Nanoparticles for Stone Conservation. *Langmuir*, N° 29: 11457-11470.
- Ruffolo, S.; La Russa, M.; Ricca, M.; Belfiore, C.; Macchia, A.; Comite, V. Pezzino, A. & Crisci, G. (2015). New insights on the consolidation of salt weathered limestone: the case study of Modica stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp 1-13.

- Ruffolo, S.; La Russa, M.; Aloise, P.; Belfiore, C.; Macchia, A.; Pezzino, A. & Crisci, G. (2014). Efficacy of nanolime in restoration procedures of salt weathered limestone rock. *Applied Physics A*, N° 114: 753-758.
- Ruíz-Agudo, E.; Mees, F.; Jacobs, P. & Rodríguez-Navarro, C. (2007). The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*, Vol. 52, N° 2: 269-281.
- Saiz-Jimenez, C. (2004). *Air Pollution and Cultural Heritage*. London: Taylor and Francis.
- Skoll, G. R. & Korstanje, M. (2014). Urban heritage, gentrification, and tourism in Riverwest and El Abasto. *Journal of Heritage Tourism*, 9 (4): 349-359.
- Stefanidou, M.; Matziaris, K. & Karagiannis, G. (2013). Hydrophobization by means of nanotechnology on Greek sandstones used as building facades. *Geosciences*, N° 3: 30-45.
- Tidblad, J.; Kucera, V.; Ferm, M.; Kreislova, K.; Brüggerhoff, S.; Doytchinov, S. & Karmanova, N. (2012). Effects of air pollution on materials and cultural heritage: ICP materials celebrates 25 years of research. *International Journal of Corrosion*, vol. 2012: 1-16.
- Toumey, C. (2010). "Tracing and disputing the story of nanotechnology". In: Hodge, G. A., Bowman, D. M., & Maynard, A. D. (Eds.). (2010). *International handbook on regulating nanotechnologies*. Cheltenham, UK: Edward Elgar, 46-59.
- Tuduce, A. A.; Timar, M. C.; Campean, M.; Croitoru, C. & Sandu, I. (2012). Paraloid B72 Versus Paraloid B72 with Nano-ZnO Additive as Consolidants for Wooden Artefacts. *Materiale Plastice*, vol. 49, N° 4: 293-300.
- Tuduce, A. A.; Anca, I. C.; Timar, M. C.; Domitrescu, G. L. & Sandu, I. (2013). SEM-EDX, Water Absorption, and Wetting Capability Studies on Evaluation of the Influence of Nano-Zinc Oxide as Additive to Paraloid B72 Solutions Used for Wooden Artifacts Consolidation. *Microscopy Research and Technique*, N° 76: 209-218.
- Yin, S. (2015). *The Efficacy of a Borate and Penetrating Oil Preservative Combination for the Conservation of Exterior Wood*. (Master Thesis). University of Pennsylvania.
- Zornoza-Indart, A. & López-Arce, P. (2015). Silica nanoparticles (SiO₂): Influence of relative humidity in stone consolidation. *Journal of Cultural Heritage*, Article In Press.