



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE Y SU RELACIÓN CON EL CONCRETO

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN **CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:

ING. EDWIN ALDAIR MÁRQUEZ RIBÓN

ASESOR DE TESINA: **ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES**

CD. MX.

FEBRERO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

Capítulo 1.- OBJETIVO GENERAL	2
Capítulo 2.- JUSTIFICACIÓN	3
Capítulo 3.- INTRODUCCIÓN	4
3.1 Primicias del concreto	4
3.2 Primicias de los nanomateriales	12
Capítulo 4.- MARCO TEÓRICO	16
4.1 Nanopartículas de sílice.....	16
4.1.1 Características.....	16
4.1.2 Obtención	20
4.2 Nanopartículas de sílice en la industria de la construcción	23
4.2.1 Pruebas de nanopartículas de sílice relacionadas al concreto	23
4.2.2 Caso real del uso de nanopartículas de sílice en la construcción	33
4.2.3 Impacto al medio ambiente.....	36
4.2.4 Costos	38
4.2.5 Seguridad y riesgo del uso de las nanopartículas	43
4.2.6 Normatividad de nanopartículas	45
Capítulo 5.- CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS.....	54

Capítulo 1.- OBJETIVO GENERAL

En la investigación propuesta se busca documentar los aspectos relacionados a las nanopartículas de sílice involucradas para el mejoramiento de el concreto, y conocer el beneficio, ventajas y desventajas que esta nanomodificación provoca; conociendo métodos de obtención de nanopartículas, describiendo las características de los cementos, aspectos históricos, el comportamiento químico y las propiedades correspondientes que ayuden a generar un criterio y conocer en que etapa nos encontramos de desarrollo de poder utilizar las nanoparticulas de sílice para disminuir costos, mejorar desempeño y disminuir el impacto al ambiente.

Capítulo 2.- JUSTIFICACIÓN

El cemento y por ende el concreto, es un material grandioso que es utilizado en gran medida dentro de el país, pero se ha rezagado la investigación al respecto de cómo poder mejorarlo para tener un material cementante que genere concretos más durables, a un menor costo y con menor consumo de energía.

Se pretende que las nanopartículas al ser incorporadas en los materiales convencionales de construcción, puedan tener propiedades inteligentes o avanzadas, demandadas para la construcción de infraestructuras importantes, largas losas o sistemas inteligentes. Sin embargo, a pesar del progreso reciente en la nanotecnología y en los nanomateriales, la aplicación de estos avances en los materiales a base de cemento es limitada.

Existen pocas referencias en la literatura científica mexicana que describen la aplicación, los mecanismos de reacción y los beneficios del uso de las nanopartículas en los compuestos del cemento. En las referencias analizadas, se expresan aspectos interesantes de la nanosílice en materiales a base de cemento portland. Sin embargo, los efectos de las nanopartículas no son de entera comprensión. Las investigaciones que se logran encontrar, al menos en el país, carecen de información sobre las propiedades físicas de las nanopartículas, y de las medidas que delimitan su aplicación eficiente en los distintos productos a base de cemento y su consecuente uso para los diseños de materiales mas avanzados.

Al recordar que una escasa información, en este caso enfocado a el uso de nanopartículas, afecta el comportamiento final de un producto, la presente investigación pretende documentar información relevante que pueda ser de utilidad al alumnado, profesores o investigadores interesados en el tema y esta información nos pueda llevar a la utilización eficiente de este tipo de nanopartículas en el área de construcción en nuestro país.

Capítulo 3.- INTRODUCCIÓN

3.1 Primicias del concreto

Concreto

El concreto es un material extraordinario, se puede verter en un molde para conseguir casi cualquier forma deseada, hacer que fragüe para que quede delgado, firme y resistente; tiene un comportamiento flexible durante su elaboración, pero en el momento en el que la construcción termina, la flexibilidad también, convirtiendo a el concreto curado en un material tenaz e imperturbable.

Se le puede teñir en un color distinto o dejar su tonalidad grisácea original, que ya es generosa por si misma; puede ser áspero o liso como el mármol.

Todas ellas son características que con el tiempo se han ido perfeccionando y que con las nuevas tecnologías que se presentan se pueden revolucionar los elementos que contempla un concreto.

Los materiales utilizados en la antigüedad eran cementos crudos hechos por trituración y quema de yeso o piedra caliza, pero también se hace refiere a la cal como la piedra caliza quemada y triturada. Cuando se añadieron arena y agua a estos cementos, se convirtieron en mortero, que era un material similar al yeso que se usaba para adherirse piedras entre sí. Durante miles de años, estos materiales se mejoraron, se combinaron con otros materiales y, al final, se transformaron en concreto moderno.

El concreto de hoy está hecho con cemento Portland, agua, agregados gruesos y finos de piedra y arena, apoyados por los aditivos, que son sustancias químicas que se agregan a la mezcla de concreto para controlar sus propiedades, ya sea de fraguado durante condiciones ambientales extremas, como temperaturas altas o bajas, condiciones de viento, etc.

El antecesor del concreto se inventó alrededor del 1300 aC cuando los constructores de Oriente Medio descubrieron que cuando recubrían la parte exterior de sus fortalezas de arcilla machacada y las paredes de la casa con una capa delgada y húmeda de piedra

caliza quemada, reaccionaba con gases en el aire para formar una superficie dura y protectora, aunque esto no era concreto, fue el inicio del desarrollo del cemento.

Los primeros materiales compuestos cementicios en general incluían piedra caliza calcinada con mortero, arena y agua, y estos eran utilizados para construir mampostería con piedra en lugar de colocar el material en un molde para darle forma, como se usa el concreto en la actualidad.

Como uno de los componentes clave del concreto moderno, el cemento existe desde hace mucho tiempo. Hace unos 12 millones de años en lo que hoy es Israel, los depósitos naturales se formaron por reacciones entre la piedra caliza y la pizarra bituminosa producidas por la combustión espontánea. Sin embargo, el cemento no es concreto. El concreto es un material de construcción compuesto y los ingredientes, de los cuales el cemento es solo uno, han cambiado con el tiempo y están cambiando incluso ahora. Las características de rendimiento pueden cambiar de acuerdo con las diferentes fuerzas que el concreto deberá resistir. Estas fuerzas pueden ser graduales o intensas, pueden manifestarse por el levantamiento del suelo, la gravedad, sismo y viento o pueden tomar la forma de erosión, abrasión o ataque químico.

Las primeras estructuras de concreto fueron construidas por los comerciantes de Nabataea o beduinos en las regiones del sur de Siria y el norte de Jordania alrededor del 6500 aC. Más tarde descubrieron las ventajas de la cal hidráulica, es decir, el cemento que se endurece bajo el agua; y hacia el año 700 a. C. estaban construyendo hornos para suministrar mortero para la construcción de casas con muros de escombros, pisos de concreto y cisternas subterráneas impermeables.

Al hacer concreto, Nabataea entendió la necesidad de mantener la mezcla lo más seca posible o de menor asentamiento, ya que el exceso de agua introduce vacíos y debilidades en el concreto. Sus prácticas de construcción incluían apisonar el concreto recién colocado con herramientas especiales, el proceso de compactación produjo más gel, que es el material de unión producido por las reacciones químicas que tienen lugar durante la hidratación que unen las partículas y las juntan.

Los nabateos tenía un material disponible en localidades cercanas que podía usarse para hacer que el cemento fuera impermeable. Dentro de su territorio había grandes depósitos superficiales de arena fina de sílice y con el agua subterránea que se filtraba a

través de la sílice podía transformarla en un material puzolánico, que es una ceniza volcánica arenosa. Para hacer cemento, los nabateos al ya tener localizados los depósitos, recogían este material y lo combinaban con cal para luego calentarlo en los hornos que usaban para hacer su cerámica, ya que las temperaturas objetivo se encontraban dentro del mismo rango.

Casi a los 3000 aC, los chinos del norte usaron una forma de cemento en la construcción de barcos y en la construcción de la Gran Muralla. Las pruebas del espectrómetro han confirmado que un ingrediente clave en el mortero utilizado en la Gran Muralla y otras estructuras chinas antiguas era el arroz glutinoso y pegajoso. Algunas de estas estructuras han resistido la prueba del tiempo y se han resistido incluso a los esfuerzos modernos de demolición.

En el año 600 aC, los griegos habían descubierto un material de puzolana natural que desarrollaba propiedades hidráulicas cuando entraba en contacto con cal, pero los griegos no eran tan prolíficos en la construcción con concreto como los romanos. En el año 200 aC, los romanos construían con mucho éxito utilizando concreto, pero no era como el concreto que usamos hoy en día, no era un material plástico y con fluidez vertido en formas, sino más bien como escombros cementados. Los romanos construyeron la mayoría de sus estructuras apilando piedras de diferentes tamaños y llenando de manera manual los espacios entre las piedras con mortero. Sobre el suelo, las paredes estaban revestidas tanto por dentro como por fuera con ladrillos de arcilla que también servían como formas para el concreto. Antes de este tiempo, y en la mayoría de los lugares en ese momento (incluyendo el 95% de Roma), los morteros mas comunes a utilizar eran un cemento de piedra caliza simple que se endurecía de manera lenta al reaccionar con el dióxido de carbono en el aire, sin una verdadera hidratación química, obteniéndose morteros débiles.

Para las estructuras más grandes y artísticas de los romanos, así como su infraestructura terrestre que requería más durabilidad, existía el uso de cemento fabricado a partir de una arena volcánica naturalmente reactiva llamada "harena fossicia".

Para las estructuras marinas y las expuestas al agua dulce, como puentes, muelles, desagües pluviales y acueductos, utilizaron una arena volcánica llamada "pozzuolana". Es probable que estos dos materiales representen el primer uso a gran escala de un agente aglutinante verdadero. "Pozzuolana" y "harena fossicia" reaccionan

químicamente con la cal y el agua para hidratarse y solidificarse en una masa similar a una roca que se puede utilizar bajo el agua.

Los romanos también utilizaron estos materiales para construir grandes estructuras, como las termas romanas, el Panteón y el Coliseo, y estas estructuras siguen en pie hoy en día. Como aditivos, usaron grasa animal, leche y sangre, materiales que reflejan métodos muy rudimentarios. Por otro lado, además de usar puzolanas naturales, los romanos aprendieron a fabricar dos tipos de puzolanas artificiales: arcilla calolinita calcinada y piedras volcánicas calcinadas, que junto con los espectaculares logros de construcción de los romanos, son evidencia de un alto nivel de sofisticación técnica para ese momento.

Después de la caída del Imperio Romano en 476 dC, las técnicas para fabricar cemento de puzolana se perdieron hasta el descubrimiento en 1414 de manuscritos que describían esas técnicas y reavivaron el interés en construir con concreto.

Para 1793, la tecnología dió un gran salto cuando John Smeaton descubrió un método más moderno para producir cal hidráulica para cemento. Usó piedra caliza que contenía arcilla que se sometió a altas temperaturas hasta que se convirtió en clínker, que luego se molió en polvo.

Finalmente, en 1824, un inglés llamado Joseph Aspdin patentó el cemento Portland quemando tiza finamente molida y arcilla en un horno hasta que se eliminó el dióxido de carbono. Fue llamado cemento "Portland" porque se parecía a las piedras de construcción de alta calidad encontradas en Portland, Inglaterra. Se cree ampliamente que Aspdin fue el primero en calentar la alúmina y los materiales de sílice hasta el punto de la vitrificación donde los materiales se vuelven una especie de vidrio, lo que resultó en una fusión. Aspdin refinó su método al distribuir cuidadosamente piedra caliza y arcilla, pulverizar y luego quemar la mezcla en clínker, para luego moler y tener un cemento terminado.

Antes de que se descubriera el cemento Portland, y durante algunos años después, se usaron grandes cantidades de cemento "natural", que se producía quemando una mezcla de cal y arcilla que se obtenía de forma natural. Debido a que los ingredientes del cemento natural se mezclan por el propio entorno, sus propiedades varían ampliamente; al contrario de el cemento Portland moderno que se fabrica con

estándares detallados. Algunos de los muchos compuestos encontrados en él son importantes para el proceso de hidratación y las características químicas del cemento. Este se fabrica calentando una mezcla de piedra caliza y arcilla en un horno a temperaturas entre 1,300 ° F y 1,500 ° F donde alrededor del 30% de la mezcla se funde pero el resto permanece en estado sólido, experimentando reacciones químicas que suelen ser lentas. Finalmente, la mezcla forma un clinker, que luego se muele en polvo, también se agrega una pequeña proporción de yeso para disminuir la velocidad de hidratación y mantener el cemento viable por más tiempo.

Entre 1835 y 1850, se realizaron por primera vez pruebas sistemáticas para determinar la resistencia a compresión y tensión del cemento, junto con los primeros análisis químicos precisos. No fue hasta alrededor de 1860 que se produjeron por primera vez los cementos Portland de composición moderna.

Aunque hubo excepciones, durante el siglo XIX, el concreto se usó principalmente para edificios industriales y se consideró socialmente inaceptable como material de construcción por razones estéticas. El primer uso generalizado del cemento Portland en la construcción de viviendas se produjo en Inglaterra y Francia entre 1850 y 1880 por el francés Francois Coignet, quien añadió varillas de acero para evitar que las paredes exteriores se extendieran, y luego las utilizó como elementos de flexión. La primera casa construida con concreto reforzado fue una casa de servicio construida en Inglaterra por William B. Wilkinson en 1854. En 1875, el ingeniero mecánico estadounidense William Ward completó la primera casa de concreto reforzado en los Estados Unidos.

Para 1897, Sears Roebuck ya vendía tambores de 50 galones de cemento Portland importado por \$3.40 USD cada uno. Aunque en 1898 los fabricantes de cemento usaban más de 90 fórmulas diferentes, para 1900, las pruebas básicas, si no los métodos de fabricación, se habían estandarizado.

En 1902, August Perret diseñó y construyó un edificio de apartamentos en París utilizando concreto reforzado con acero para columnas, vigas y losas de piso. El edificio no tenía muros de carga, pero tenía una fachada elegante, lo que ayudó a que el concreto fuera más aceptable socialmente. El edificio fue ampliamente admirado y el concreto se hizo más utilizado como material arquitectónico y como material de construcción. Su diseño fue influyente en el diseño de edificios de concreto armado en los años siguientes.

En 1904, se construyó el primer edificio de concreto en Cincinnati, Ohio, de 16 pisos (210 pies de alto).

En 1913, se entregó la primera carga de concreto en Baltimore, Maryland. Cuatro años después, la Oficina Nacional de Estándares (ahora la Oficina Nacional de Estándares y Tecnología) y la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ahora ASTM International) establecieron una fórmula estándar para el cemento Portland.

Eugène Freyssinet fue un ingeniero francés y pionero en el uso de la construcción de concreto armado. En 1921, construyó dos gigantescos hangares de dirigibles de arco parabólico en el aeropuerto de Orly en París, y en 1928, se le concedió una patente de concreto pretensado.

En 1930, se desarrollaron agentes de incorporación de aire que aumentaron en gran medida la resistencia del concreto a la congelación y mejoraron su trabajabilidad, siendo así un desarrollo importante para mejorar la durabilidad del concreto moderno.

La construcción en 1962 de las Torres Gemelas de 60 pisos de Bertrand Goldberg en Chicago provocó un renovado interés en el uso de concreto reforzado para rascacielos.

Hoy en día una de las estructuras más altas en el mundo, construida utilizando concreto y refuerzo de acero, es el Burj Khalifa en Dubai en los Emiratos Árabes Unidos con una altura de 2.717 pies y un peso vacío de aproximadamente 500,000 toneladas, que es aproximadamente lo que pesó el mortero que entró en la construcción de la Gran Pirámide en Giza, ese peso es generado por el uso de 330 000 metros cúbicos de concreto y 61 000 toneladas de barras de refuerzo.

Estos aspectos históricos son valiosos de retomar, puesto que es necesario saber de donde viene la evolución de el concreto para conocer mejor a donde llevarlo, y con apoyo de las nuevas tecnologías que hoy en día nos permite analizar a escala nanométrica nuestros materiales, facilita el mejoramiento y eficiencia del estudio del concreto.

El concreto debe ser trabajable, capaz de dársele acabado, ser resistente, durable, impermeable, etc. Estas cualidades frecuentemente se pueden conseguir de una manera sencilla y económica seleccionando los materiales adecuados o cambiando las proporciones de la mezcla sin que se tenga que recurrir al apoyo de aditivos pero sí al apoyo de nanomateriales, involucrándonos en un campo donde las características de la mezcla se encuentran en una escala donde es preciso analizar mas profundamente las reacciones para que se obtengan resultados visibles a una escala visual normal.

En la parte química del concreto es preciso recordar el material primordial, el cemento; hoy en día el cemento Portland para su fabricación contiene en relaciones definidas, sílice, alúmina, óxido de calcio y óxido férrico. La fuente de la cal es proporcionada por los ingredientes calcáreos tales como piedra caliza o la cal, y la fuente de sílice y óxido de aluminio son las arcillas o pizarras. Los materiales que contienen hierro son las piritas. El óxido férrico forma compuestos con la cal y la alúmina. Las materias primas también contienen pequeñas cantidades de otros compuestos, como magnesio, álcalis, fosfatos, compuestos de flúor, óxido de zinc y sulfuros.

En la composición química del cemento Portland el contenido de CaO y SiO₂ son mucho mayores que otros óxidos, el contenido promedio de CaO es de aproximadamente el 65% el cual, es casi tres veces el contenido de SiO₂. Cuando son adheridos el CaO y el SiO₂ representan más del 85% de la composición química del cemento Portland. Los óxidos mayores próximos contenidos son el Al₂O₃ y el Fe₂O₃ los cuales son usualmente inferiores al 8%. Teniendo al sílice como un elemento importante dentro de los cuatro óxidos principales del cemento.

En el caso del proceso químico llamado hidratación, a traves del cual el concreto se endurece, el concreto debe tener una relación mínima de agua a cemento de 25 partes de agua a 100 partes de cemento para que se pueda producir de manera decuada. El agua que excede esta proporción es agua excedente y ayuda a que el concreto sea más manejable para las operaciones de colocación y acabado. A medida que el concreto se seca y se endurece, el exceso de agua se evaporará, dejando la superficie del concreto porosa y el agua del ambiente circundante, como la lluvia y el deshielo, puede ingresar a estos poros. El clima helado puede convertir esta agua en hielo y a medida que eso sucede, el agua se expande, creando pequeñas grietas en el concreto que crecerán a medida que se repita el proceso, lo que eventualmente dará como resultado la

formación de escamas en la superficie. Cuando el concreto ha sido arrastrado por el aire, estas pequeñas burbujas pueden comprimirse ligeramente, absorbiendo parte del esfuerzo creado por la expansión a medida que el agua se convierte en hielo.

Aditivos

Tanto por el Comité 116R del ACI como por la Norma ASTM C 125 definen al aditivo como: “Un material distinto del agua, de los agregados y cemento hidráulico que se usa como componente del concreto o mortero. Las dosis en las que se utilizan los aditivos, están en relación a un pequeño porcentaje del peso de cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado”.

Podemos decir que las nanopartículas de sílice no son consideradas un aditivo por la misma razón de que el sílice es parte de la química del concreto, únicamente que se encuentran en una escala de dimensión menor, al igual que no se consideran como aditivos a otros suplementos del cemento como escorias, puzolanas naturales o humo de sílice, ni las fibras empleadas como refuerzo.

Así como los aditivos incorporadores de aire, plastificantes, aceleradores, retardantes, o inhibidores de corrosión, el estudio de las nanopartículas de sílice busca mejorar las características del concreto logrando encontrar el beneficio de economizar la mezcla de tal forma que también se logre disminuir el impacto ambiental.

Los aditivos, a diferencia del cemento, los agregados y el agua, no son componentes esenciales de la mezcla de concreto, aun así son importantes y su uso se extiende cada vez más, ya sea por la aportación que hacen a la economía de la mezcla o por la necesidad de modificar las características del concreto de tal forma que éstas se adapten a las condiciones de la obra y a los requerimientos del constructor.

3.2 Primicias de los nanomateriales

Los nanomateriales son uno de los productos principales de las nanotecnologías, como partículas, tubos o fibras a nano escala. Las nanopartículas generalmente se definen por ser menores de 100 nanómetros en al menos una dimensión.

La descripción de un nanomaterial debe incluir el tamaño medio de sus partículas, teniendo en cuenta la agrupación y el tamaño de las partículas individuales y una descripción de el rango de las partículas presentes en la preparación, desde la más pequeña a la mayor.

Las valoraciones detalladas pueden envolver las siguientes propiedades:

A. Físicas:

- Forma, tamaño, superficie específica.
- Proporción entre anchura y altura.
- Adherencia entre unas a otras.
- Distribución según el tamaño.
- Rugosidad de su superficie.
- Capacidad de disolución.

B. Químicas:

- Estructura molecular.
- Pureza.
- Si es sólido, líquido o gas.
- Atracción de moléculas de agua y de aceites o grasas.

Debido al incremento de la superficie específica por unidad de volumen, los nanomateriales pueden poseer características distintas de las del mismo material sin características correspondientes a la nano escala. Por lo tanto, las propiedades fisicoquímicas de los nanomateriales pueden diferir de las sustancias a granel o de las partículas de mayor tamaño.

La nanotecnología está experimentando un rápido auge que comienza a generar una cierta demanda de producto, por lo que ya se comercializan en el mercado europeo

numerosos productos que contienen nanomateriales (por ejemplo: baterías, prendas de vestir con características antibacterianas, cosméticos, productos alimenticios, etc.). Los nanomateriales ofrecen oportunidades técnicas y comerciales pero pueden plantear riesgos para el medio ambiente y preocupaciones en materia de seguridad y salud para los seres humanos y los animales.

Las nuevas tecnologías en el ámbito mundial, ha iniciado en algunas áreas la incorporación de nanomateriales con características y propiedades específicas en la elaboración de productos de uso común o bien de aplicaciones en áreas muy especializadas que permiten mejorar o ampliar el espectro de aplicaciones, respecto de los materiales convencionales, así como generar sistemas con nuevas funcionalidades.

La nanomodificación es un campo emergente que se desarrolla con gran rapidez, a pesar del potencial que presenta la nanomodificación, hay restricciones que se deben ir esclareciendo, como por ejemplo la adecuada dispersión dentro de la escala nanométrica, el escalado de los resultados de laboratorio y su implementación a nivel industrial, y analizar si se logra conseguir una reducción en el coste mientras se obtiene un mayor beneficio.

La evolución se ha ido manifestado en un nivel nanométrico desde el inicio de la vida, mostrándonos grandes avances, que conforme se van desarrollando nuevas herramientas para observar objetos a ese nivel nanométrico también se va fomentando la investigación de estas estructuras nanométricas y se va entendiendo cómo es que funcionan, beneficiando así las circunstancias de vida actual, sin embargo; aún no se ha promovido tan convenientemente en la industria de la construcción. El uso de nanomateriales con función cementante aunado a la aplicación de tecnologías modernas ha estado en constante evolución, dando como resultado que su estudio en el área de la construcción se haya ido incrementando, estas tecnologías recientemente desarrolladas son requeridas cada vez más para incrementar el uso y el tiempo de vida de las estructuras construidas hoy en día. El tiempo de servicio de las estructuras es una cuestión de durabilidad y es en este contexto donde la nanotecnología se ha ido integrando como una solución actual. La durabilidad de las estructuras es un tópico de interés para la extensión de la vida útil debido a que el uso de nanomateriales, en muchos de los casos, busca la reducción del deterioro (densificando la matriz) y trata de evitar la migración al interior de la matriz de los agentes promotores del deterioro a los cuales se ven expuestas las estructuras durante su vida de servicio.

Relacionado al adelanto de nanomateriales utilizados en el área de la construcción se ha intentado la elaboración de materiales con propiedades renovadoras y la evolución de las ya existentes para que ofrezcan mayores prestaciones en servicio, comparadas con aquellas de microestructura convencional. En base a esto, los avances tecnológicos junto a los nanomateriales han estado buscando nuevas técnicas para reparación, rehabilitación, mitigación y mejoramiento de las estructuras de concreto, con la finalidad de atenuar el impacto económico y ambiental que se genera en la industria de la construcción a causa del deterioro de estructuras.



Imagen 1.- Concreto auto limpiable con nano partículas de TiO_2 . Iglesia Jubilar en Roma.

La mayor parte de la investigación sobre nanotecnologías aplicadas a la construcción se ha centrado en dos temas principales: la elaboración de materiales nano estructurados con mayor resistencia que el acero y la elaboración de concretos de ultra alta resistencia a partir de la modificación de la estructura de la matriz cementante y del mecanismo de fractura que resulta de ello. Además recientes estudios también han investigado la elaboración de cementos con adiciones de nanopartículas de sílice, técnicas distintas de

rehabilitación de estructuras como la migración electroquímica, la realcalinización y la extracción electroquímica de cloruros.

Hoy en día, también se busca que nuevos materiales y técnicas se estén ampliando para el desarrollo de recubrimientos de tamaño nano, ya sea para el uso de recubrimientos que se utilizan para mejorar el acabado, proteger de la abrasión, ataques químicos o contra los cambios de temperatura. De igual manera, se han mejorado técnicas de electromigración aplicadas en el concreto endurecido, mismas que plantean el uso de micropartículas y nanopartículas impulsadas hacia el interior del concreto endurecido.

Capítulo 4.- MARCO TEÓRICO

4.1 Nanopartículas de sílice

4.1.1 Características

La sílice suele ser sinónimo de dióxido de silicio (SiO_2), pero también el silicio recibe el nombre de sílice o silicea. El silicio y el oxígeno son los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre. La sílice se encuentra comúnmente en la naturaleza como arena en forma de mineral de cuarzo. La sílice existe en muchas formas diferentes que pueden ser tanto cristalinas como no cristalinas (amorfos), y al igual que muchos otros minerales no puede tomarse de forma ponderal, es decir, como mineral tal cual, sino en forma de oligoelemento (elementos presentes en pequeñas cantidades).

El sílice también viene en diversas formas, ya sea minerales, pedernal, jaspe y ópalo. Cuando el silicio y el oxígeno se mezclan con metales reactivos, el resultado es una clase de minerales llamados silicatos, que incluye granito, feldespato y mica. El sílice tiene muchas aplicaciones industriales como ingrediente clave en ladrillos, concreto y vidrio. En su forma de silicato, el elemento se utiliza para hacer esmaltes, alfarería y cerámica.

La nanotecnología busca cambios y mejoras en el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, equipos y sistemas que controlan la forma y tamaño a escala nanométrica, siendo en esta escala donde las diferentes leyes de la física toman importancia, como son los efectos cuánticos y el área superficial.

La nanotecnología está siendo utilizada o considerada para su uso en varias aplicaciones mas y ha recibido una atención cada vez mayor en los materiales para la construcción, y es en este campo en el que uno de los nuevos cementos más recomendados y usados con nano-materiales es aquel que incorpora nano-sílice.

Se ha informado que la adición de nanosílice aumenta la resistencia a la compresión y reduce la permeabilidad del concreto endurecido debido a las propiedades puzolánicas, esto mejora específicamente la densidad, área de superficie específica, estructura de poro y reactividad.

Estas partículas tienen un efecto de relleno, ocupando los huecos más minúsculos entre los granos de cemento gracias a las dimensiones nanométricas que poseen, y también contribuye a la mejora de la resistencia debido a la reducción de la porosidad capilar.

La aplicación de nanopartículas de sílice en sistemas cementosos trata de mejorar las características del material endurecido, por lo que se han llevado a cabo diversas investigaciones al respecto, que sirven como registro del avance con los nanomateriales y su relación con el concreto.

La sílice (SiO_2) está presente en el concreto como parte común de las materias primas, uno de los temas más frecuentes en las investigaciones con nanopartículas en el concreto estudia la inclusión en la mezcla de estas partículas ya que observan que esa inclusión conduce a una densificación de la micro y nano-estructura que mejora las prestaciones mecánicas, investigándose además que la nanosílice de los materiales a base de cemento también puede controlar la degradación del CSH.

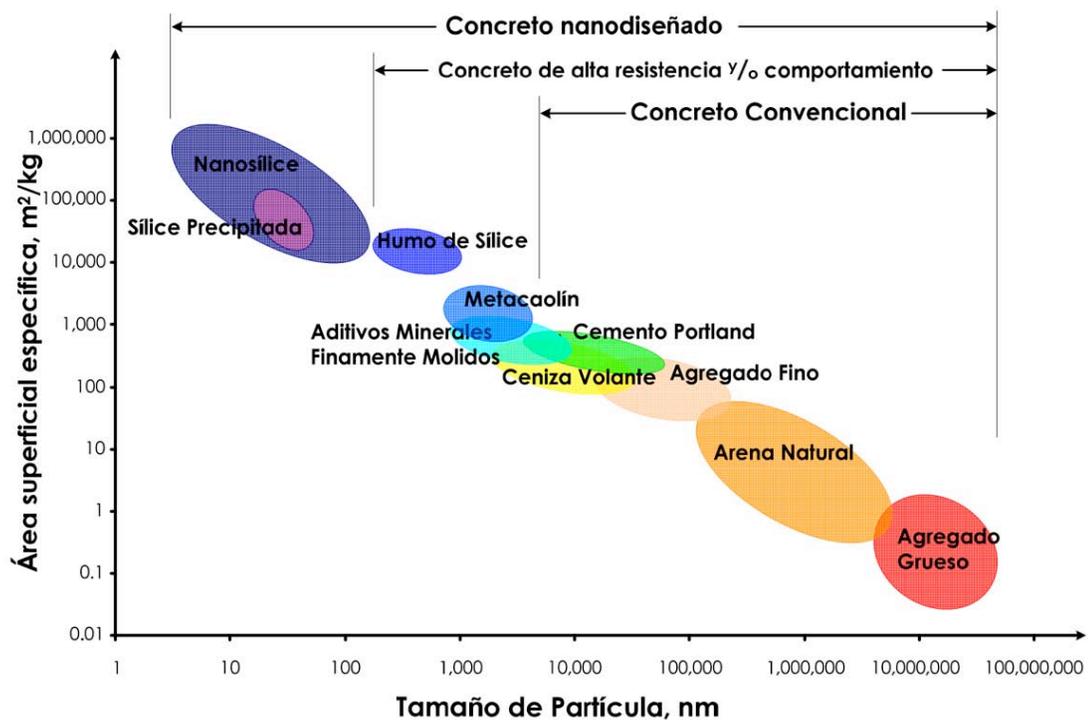
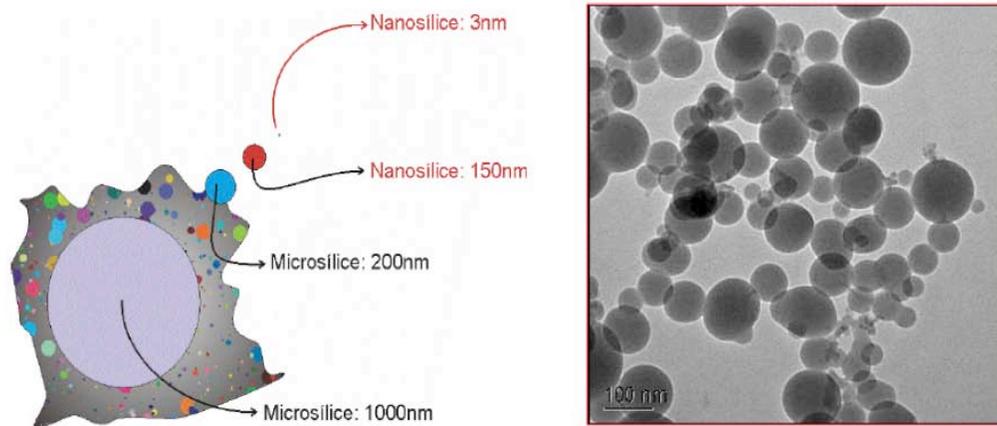


Imagen 2.- Tamaño de partículas y área superficial específica aproximada de los materiales de concreto (K. Sobolev, 2005).

La nanosílice son partículas esféricas a base de sílice de alta pureza de tamaño nanométrico, con una distribución de tamaños idónea. Por su elevado poder de fluidificación y su capacidad de favorecer la evolución de resistencias, lo hace ideal para su empleo en cementos y concretos. La nanosílice tiene gran poder plastificante, permeabilidad nula o casi nula por lo que aumenta la durabilidad del concreto, evita la segregación y la excesiva exudación y no produce retrasos de fraguado.



- TEM micrograph (TEM) of nanosilica (scale bar: 100 nm).

Imagen 3.-Tamaños de partículas de sílice.

Aplicado a la mezcla en la proporción adecuada confiere a la mezcla propiedades reológicas y mecánicas mejoradas. La adición de nanosílice mejora la producción de geles CSH y aumenta la velocidad de hidratación. Además, aumenta el tamaño de las cadenas de silicato, rellenando huecos y aumentando las propiedades mecánicas del mortero. Este efecto es mayor a edades tempranas debido al hecho de que la reacción es mas energética por haber mas portlandita al inicio.

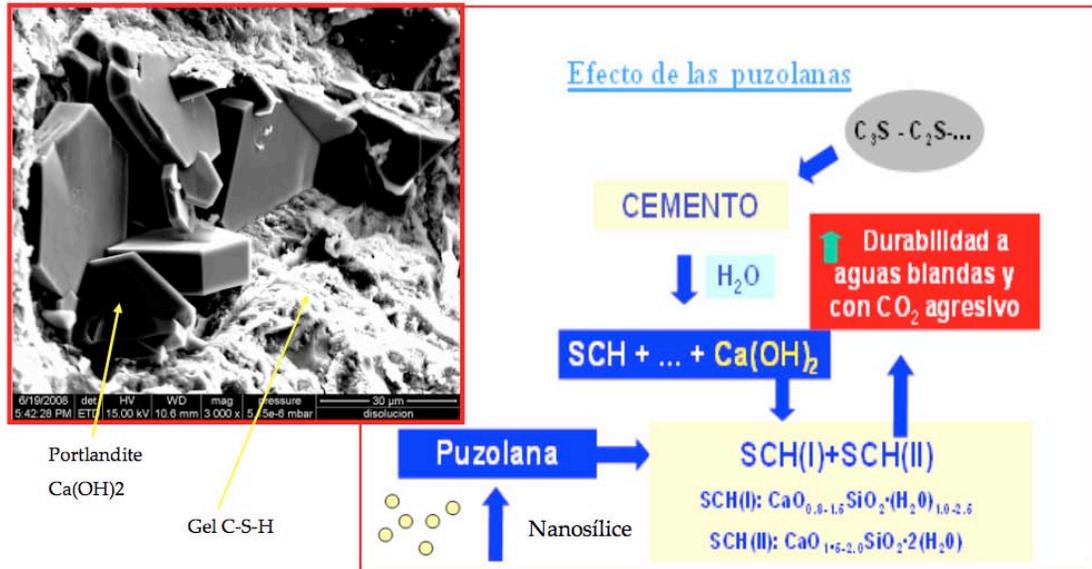
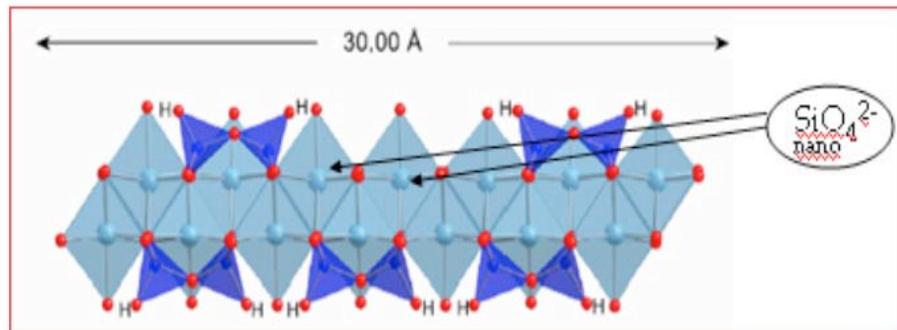


Imagen 4.- Efecto químico: mayor producción de gel CSH. Efecto puzolánico.



Gel CSH Structure

Imagen 5.- Estructura del gel CSH, incremento en tamaño de cadenas de silicatos.

Las nanopartículas que se obtienen se pueden caracterizar mediante análisis por adsorción de nitrógeno, espectroscopía infrarroja, difracción de rayos X en polvo y microscopia electrónica de transmisión.

Estas nanopartículas se dosifican como reemplazo en peso del cemento portland utilizadas en morteros y pastas y para conocer su efecto se analizan pruebas reológicas, pruebas mecánicas (compresión, flexión), se mide el peso volumétrico y fluidez de los morteros, comparándose con una muestra de referencia.

4.1.2 Obtención

Utilizando nanosílice sintetizada por el método sol-gel se mejoran las propiedades mecánicas debido al comportamiento de las nanopartículas que generan una aceleración en las reacciones de hidratación obteniendo una microestructura muy compacta al incrementar los enlaces de sílice con oxígeno.

La sociedad científica más antigua del Reino Unido y una de las más antiguas de Europa, The Royal Society, define unos procesos de manufactura para obtener estructuras nanométricas, como lo son: la reducción de tamaño mediante el método “arriba-abajo” o el incremento del tamaño mediante el procedimiento “abajo- arriba”, como se muestra en el esquema de variación de la síntesis de nano estructuras y ensamblajes, de abajo.

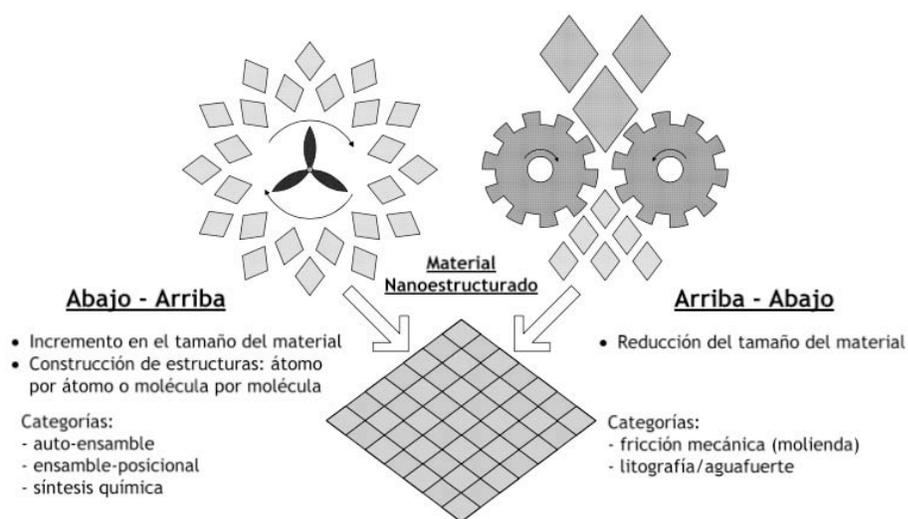


Imagen 6.- Esquema de variación de la síntesis de nano estructuras y ensamblajes.

La producción de grandes volúmenes de nanomateriales se lleva a cabo mediante la síntesis química, donde el método sol-gel es uno de los más utilizados para la manufactura de los materiales a nano escala, como lo es el nanosílice.

De acuerdo a los parámetros del proceso sol-gel, las propiedades de la nanosílice sintetizada tendrán variaciones. El proceso de sol-gel conlleva la formación de

nanomateriales en donde el tamaño, la morfología y la superficie, se pueden vigilar y controlar.

Las aplicaciones del proceso sol-gel se derivan de las diferentes formas obtenidas directamente del estado gel y con la variación de los parámetros del proceso como son:

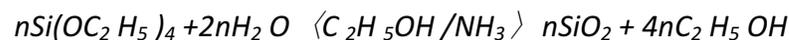
- Monolitos: componentes ópticos, súper-aisladores transparentes y vidrios de baja expansión térmica.
- Fibras: refuerzos de compósitos y textiles refractarios.
- Compósitos: producción de geles con materiales como, partículas orgánicas o metálicas.
- Películas delgadas y recubrimientos: recubrimientos ópticos o porosos.

El proceso sol-gel involucra la formación de una suspensión coloidal (sol) y una gelificación del sólido para formar una red en una fase líquida continua (gel). Como precursor de la síntesis de nanosílice, se utiliza el tetraetóxido de silicio (TEOS).

Los procesos de síntesis por sol-gel pueden ser simplificados en cuatro etapas:

- Hidrólisis, ocurre cuando el TEOS y el agua se mezclan en un solvente mutuo, generalmente etanol. La hidrólisis parcial del sistema TEOS-Etanol-Agua incluyen grupos de SiOH (silanoles), y grupos de Si(OC₂H₅) (etoxis).
- Condensación y polimerización de monómeros para formar partículas.
- Crecimiento de partículas.
- Aglomeración de partículas, seguidas por la formación de redes y subsecuentemente estructura gel.

La reacción química para la síntesis de nanosílice se puede resumir como a continuación se enuncia:



Los parámetros que afectan los productos sol-gel son la concentración de agua, la temperatura y el catalizador que influye significativamente en el tiempo para llegar a un gel.

Como principales ventajas del proceso se tienen:

- Muy alta homogeneidad y pureza de los reactivos.
- Control total del tamaño de partícula.
- Distribución de tamaño de poro controlada y bien definida.
- Facilidad en la adición de elementos en la red de los materiales.
- Permite en el diseño variar los parámetros de síntesis y por ende las propiedades estructurales, texturales, ópticas, etc.

Y algunas desventajas son:

- Costo alto de las materias primas.
- El encogimiento que acompaña a los procesos de secado y sintetización.

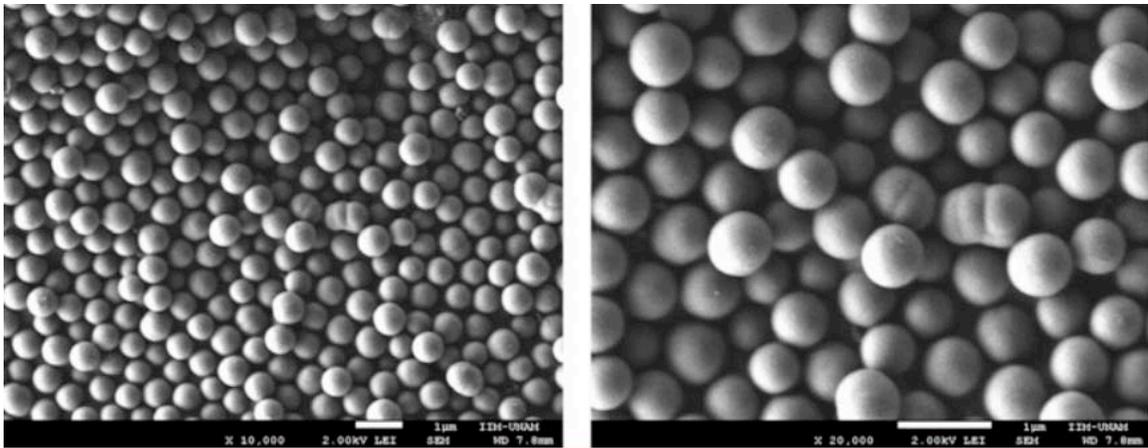


Imagen 7.- Imágenes de microscopía electrónica de barrido de pequeñas esferas de óxido de silicio sintetizadas por método sol-gel.

Fuente: Grupo de Materiales y Nanotecnología del CCADET-UNAM.

4.2 Nanopartículas de sílice en la industria de la construcción

4.2.1 Pruebas con nanopartículas de sílice relacionadas al concreto.

El desarrollo en el área de construcción trae consigo proyectos cada vez más arriesgados, esto ha puesto a relucir la necesidad de conseguir concretos con mejores propiedades. Continuamente, se presentan nuevas formulaciones de concreto, donde se prueban aditivos innovadores y prometedores capaces de mejorar las propiedades del cemento o concreto.

Un elemento que se está empleando últimamente son las nanopartículas, investigadores han probado el cemento portland en mezclas con nanopartículas de sílice, humo de sílice, nano alúmina, óxidos de hierro y de titanio a escala nanométrica, dentro de los cuales el que presenta mayor potencial es la nanosílice. Teniendo a continuación algunas pruebas de investigaciones para encontrar la mejor adición de nanopartículas de sílice en el concreto.

M. Ferrada et al.(2003), compararon humo de sílice (200 a 1000nm), partículas de sílice (20 a 50nm) y sílice coloidal (3 a 150nm) en mezclas de concreto, dosificadas en cantidades de 0.5, 1.0, 2.5 y 5.0% como reemplazo del cemento portland puzolánico. Obteniendo que los mayores incrementos en la resistencia a la compresión de 1 a 3 días de curado fueron logrados dosificando el sílice en un 1%, y donde la mas alta resistencia a compresión fue la mezcla adicionada con la sílice coloidal.

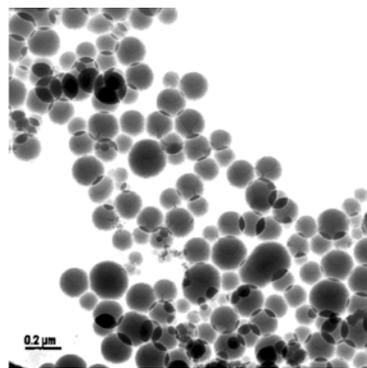


Imagen 8.- Partículas de sílice coloidales amorfas ultra-finas observadas en microscopio electrónico de transmisión (Andri Vital; EMPA Mat'ls Testing and Research, Laboratory for HighPerformance Ceramic, Duebendorf, Switzerland.).

M. Collepari et al.(2004), mostraron que al agregar sílice coloidal se generó un concreto más cohesivo, con menor tendencia a la segregación y sangrado, pero el aumento de sílice coloidal incrementó el uso del superplastificante para mantener constante el revenimiento del concreto.

H. Li et al. (2004), analizaron las propiedades micro estructurales y mecánicas de morteros con cemento comparando el efecto de las adiciones de humo de sílice y nano sílice dosificadas en 3, 5 y 10% del peso del cemento con tamaños de partículas de 15 y 30nm. Las nanopartículas aceleraron la hidratación del cemento y redujeron el contenido de portlandita de los productos de la hidratación y desarrollaron una microestructura densa y compacta. La resistencia a la compresión de los morteros mejoró al incrementar el contenido de sílice precipitada, mayor que la de morteros con humo de sílice; incluso cuando se utilizó la menor dosificación, la resistencia a flexión fue mayor con las adiciones de las nanopartículas en relación a la de referencia.

G. Li (2004), para investigar el efecto de la partículas de sílice en las propiedades de concretos de alta resistencia con altos consumos de ceniza volante, dosificó un 4.0% de nanopartículas de sílice (10 nm) como reemplazo del cemento, obteniendo una aceleración en la reacción puzolánica de la ceniza volante con el cemento, especialmente durante las primeras 24 horas de la hidratación del cemento. Obteniendo un concreto con calor de hidratación mayor, con porosidad reducida e incremento en la resistencia a compresión a edades tempranas.

Utilizando sílice coloidal los investigadores J. Björnström et al. (2004), averiguaron el efecto de la adición de la sílice en el proceso de hidratación de alita (C_3S | Ca_3SiO_5) y belita (β - C_2S | β - Ca_2SiO_4). La sílice coloidal con un área superficial de $500 \text{ m}^2/\text{g}$ y tamaños de partículas de 5 nm, fue dosificada en 1 y 5% el peso de la alita o belita. Mientras incrementaba la dosificación, la sílice coloidal aceleró la formación del gel C-S-H; sin embargo, después de las 24 horas las cantidades de C-S-H ya no eran dependientes de las adiciones en las pastas de alita.

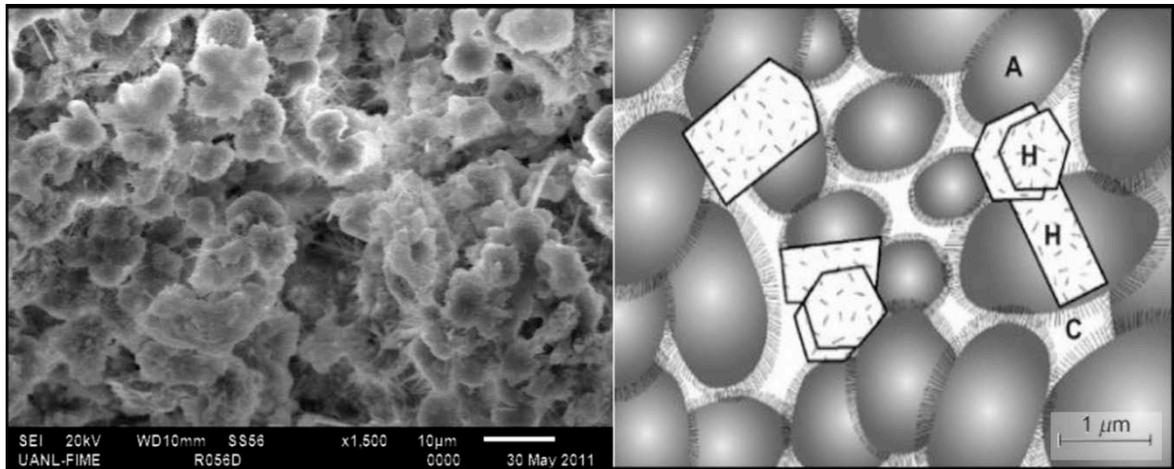


Imagen 9.- Comparación de una imagen de muestra real contra un modelo de una pasta de cemento hidratada. "A" representa a las partículas CSH (dimensiones de 1-100 nm), "H" representa a los productos hexagonales cristalinos como el hidróxido de calcio, "C" representa a los poros capilares que existe en los espacios originalmente ocupados por el agua. (C. Fernández Gutiérrez, 2011).

A. Porro et al. (2005), relacionan al uso de partículas de nanosílice con el aumento de la resistencia a la compresión de las pastas de cemento, afirmando que este fenómeno no se debe a la reacción puzolánica, ya que el consumo de hidróxido de calcio es muy bajo, sino al aumento de los compuestos de sílice que contribuyen a una microestructura más densa.

Y. Qing et al.(2006), comparó la actividad puzolánica de nano-SiO₂ y humo de sílice mediante difracción de rayos X (XRD), calorimetría de barrido diferencial (DSC), microscopía electrónica de barrido (SEM) y las resistencias a compresión, unión y flexión de pasta endurecida y concreto. Los resultados indican que el desarrollo de la resistencia a la compresión, la velocidad de reacción y la velocidad de formación de gel C-S-H de la pasta hecha de Ca(OH)₂ y nano-SiO₂ mostraron aumentos marcados sobre los de Ca(OH)₂ con humo de sílice. Además, la fuerza de unión en la interfaz entre la pasta de cemento endurecida y agregada, y la resistencia a la flexión del concreto incorporado con un 3% de nanosílice aumentaron más que las de humo de sílice, especialmente a edades tempranas. De este modo, la actividad puzolánica de nano-SiO₂ fue mucho mayor que la del humo de sílice. Los resultados sugieren que con una pequeña cantidad de nano-SiO₂, el cristal de Ca(OH)₂ en la interfaz entre la pasta de

cemento endurecida y el agregado a edades tempranas puede ser efectivamente absorbido en concreto de alto rendimiento.

I. Jansson et al. (2007), observó en su trabajo que agregar sílice coloidal a un concreto fluido o lechada da como resultado una reducción considerable de los problemas de sangrado y segregación y, a menudo, se desarrollaba una resistencia temprana a la compresión. También se observaron valores de viscosidad y rendimiento plástico mucho más bajos que los que se pueden lograr con aditivos modificadores de la viscosidad convencionales. Esto generalmente da como resultado dosis mucho mayores de superplastificante para una trabajabilidad requerida, y usualmente con el problema de que esta trabajabilidad solo estará disponible durante un período de tiempo limitado a medida que la mezcla se continúa espesando. Este efecto no se ve con la sílice coloidal, ya que las diferencias en química y características de hidratación producen cambios bastante notables en el rendimiento. Una adición de sílice coloidal puede dar cierto control respecto al control de estabilidad en altas capacidades de trabajo, manteniendo una manejabilidad dada con el tiempo y la mejora de la resistencia a la compresión temprana.

J.S. Park et al.(2007), utilizaron sílice coloidal con partículas de 20 nm de tamaño como agregado fino con ceniza del fondo de incineradores (previamente calcinada por un día a 105 grados Celsius, para que esta fuera absorbida por la superficie del agregado) para la elaboración de mortero para ladrillos, dosificando la sílice en 1, 2, 3, 4 y 8%. La sílice coloidal reaccionó con el cemento al inicio de la hidratación y obtuvieron mejores resistencia a compresión en la dosificación a 4%, superando a ladrillos elaborados con cemento de alta resistencia temprana.

J.S. Dolado et al. (2007), investigaron los efectos de las adiciones de sílice coloidal (partículas de 15nm, dosificada en 7.5% del peso del cemento) en pastas de cementos belíticos a base de ceniza volante. Una disolución eficiente de sílice (por alto Ph) benefició la formación de largas estructuras del gel de C-S-H, obteniendo un grado de polimerización mas veloz a edades tempranas en el gel C-S-H de sílice coloidal comparado con la muestra referencia, pero a los 180 días se igualaron las muestras; mostrando desde los 90 días y posteriores una buena resistencia a compresión.

J.J. Gaitero et al. (2008), investigaron la diferencia con la adición de la sílice coloidal (20nm, 30nm, 120nm, dosificadas en un 6% de peso de cemento) y de sílice aglomerada en polvo (5nm, dosificada en un 6% de peso de cemento) en el fenómeno de la lixiviación del calcio en el gel de C-S-H en pastas de cemento. En ambas pruebas se logró

una disminución en la porosidad y un aumento en la resistencia a compresión de las pastas en relación a la de referencia, donde la sílice aglomerada en polvo generó una reacción puzolánica en las pastas y la sílice coloidal modificó la estructura del gel de C-S-H beneficiando el crecimiento de las cadenas de los silicatos e incrementando la longitud promedio en la estructura del gel.

B.H. Green (2008), diseñó una mezcla de mortero para igualar las propiedades de las rocas "in situ" con respecto a la resistencia a la compresión, densidad y la velocidad de pulso ultrasónico utilizando la sílice (5 a 150 nm, dosificada en 0.33 % del material cementante) para controlar la viscosidad del mortero, minimizar la segregación de los agregados y el sangrado del agua en un mortero sin contracción de alta resistencia y alta densidad.

De acuerdo con Lin et al. (2008), el uso de nano-sílice en los morteros de lodos /cenizas volantes, compensa los efectos negativos asociados con la incorporación de lodos en términos del tiempo de fraguado y la resistencia inicial.

K. Sobolev et al. (2009), informaron que la adición de nano-sílice de tamaños de 5 - 70 nm produjo un aumento a resistencias a la compresión como a la flexión de los morteros fabricados con una adición de 0.25%, incrementando la resistencia en 16% a las 24 horas y de 18% a 28 horas respectivamente.

Gaitero et al. (2009), creen que la nanosílice causa un aumento en la dimensión y rigidez de la cadena C-S-H; mientras que otros como Nasibulin et al. (2009), informaron un aumento al doble de la fuerza.

Givi et al. (2010), estudiaron los efectos de diferentes tamaños de partículas de nano-SiO₂ (15 y 80 nm) e informaron que el nivel de reemplazo óptimo de partículas de nano-SiO₂ debería ser 1% y 1.5%, respectivamente. Mencionando así efectos que surgen de la adición de nanopartículas que a continuación se enuncian:

- Como el diámetro promedio del gel C-S-H es de aproximadamente 10 nm, las nanopartículas llenan los huecos en la estructura CH₈, produciendo así un concreto más denso.
- Las nanopartículas actúan como núcleos, contribuyendo al desarrollo de la hidratación en el cemento Portland.
- Las nanopartículas reaccionan con los cristales de Ca(OH)₂ y producen el gel C-S-H. También actúan como granos en la pasta de cemento, lo que reduce el tamaño de los cristales de Ca(OH)₂.

Otros estudios, como el de P. Mondal et al (2010), se han enfocado en la comparación de las propiedades obtenidas en el concreto utilizando micro sílice y compararlas con nanopartículas de sílice, encontrando que al añadir nanopartículas de sílice en concreto en porcentajes de entre 0% y 15%, mejora sustancialmente la durabilidad del concreto mediante el incremento en la rigidez del gel C-S-H.

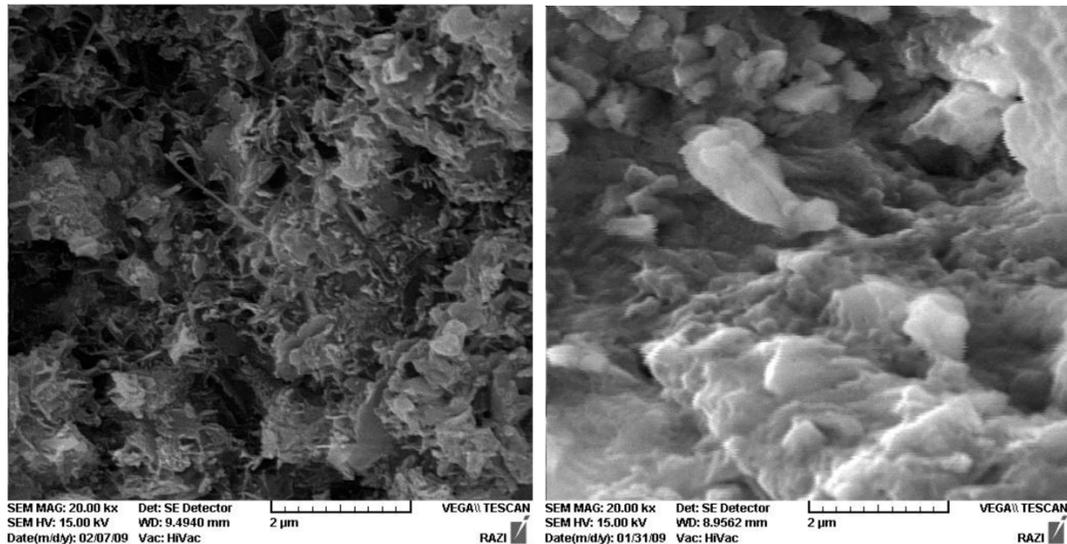


Imagen 10.- Comparativa de la microestructura entre un Concreto Ordinario (izquierda) y otro adicionado con nanosílice (derecha), (Tadayon et al., 2010).

P. Hosseni et al. (2010), trabajando con morteros de ferrocementos a los que adicionaron nanopartículas de sílice en porcentajes de 1% a 3% obtuvieron una mejora en la resistencia a la compresión y una mayor densidad en la zona interfacial de transición, todo esto a relaciones de agua de 0.35 y 0.40. Además P. Hosseini continuó su interés con los nanomateriales, buscando la aplicación de nano sílice para mejorar el comportamiento de los agregados reciclados. Informando que si bien el uso de nanopartículas ayudaba a la reacción de hidratación, el uso de los agregados reciclados generaba resistencias y trabajabilidad menores a las obtenidas con un agregado nuevo cuando se dosificaban las nanopartículas de sílice en porcentajes de 1.5% y 3.0%.

Por otro lado, Jessica San Filippo et al (2010), trabajando con agregados en la zona de transición interfacial y colocando en forma de película delgada las nanopartículas directamente sobre la superficie de los agregados, obtuvo una mejora en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento, resultando un mejoramiento general en las propiedades mecánicas, con resistencias a la compresión de hasta 35% mayor con una adición de tan solo 0.032% de SiO₂ depositado sobre la superficie de los agregados.

Observando que un punto en común de la mayoría de los estudios lo constituye el proceso de adición de las nanopartículas y su correcta dispersión en la matriz, se tiene que el problema importante en el uso de nanopartículas es la dispersión efectiva; así Vera-Agullo et al. (2009), indicaron que el uso de nanopartículas causará un mayor grado de hidratación en compuestos cementosos si hay una mayor dispersión de nanopartículas.

Givi et al. (2010) registraron que se logró una dispersión adecuada de partículas de nano-SiO₂ agitando con una parte del agua de mezclado a alta velocidad (120 rpm) durante un minuto y luego añadiéndola a la mezcla.

Zhang y Li (2011) usaron un agente reductor de agua (UNF-S, un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de formaldehído) para ayudar a dispersar las nanopartículas en la pasta de cemento y lograr un buen grado de trabajabilidad en el concreto. También se utilizó un espumador (fosfato de tributilo) para disminuir el número de burbujas de aire. En ese trabajo, el arreglo para preparar el concreto utilizando nanopartículas inició con un agente reductor de agua mezclado con agua en un mezclador de mortero. Luego las nanopartículas se añadieron y se agitaron a alta velocidad durante cinco minutos. Se añadió un espumador durante la agitación. Después de esto, el cemento, la arena y el agregado grueso se mezclaron a baja velocidad durante dos minutos en un mezclador de concreto centrífugo. La mezcla de agua, reductor de agua, nanopartículas y espumador se añadió lentamente y se agitó a baja velocidad durante dos minutos más para lograr una buena trabajabilidad.

En estudios de Sanju M. Sobichen et al.(2016) se utilizó arena de río como agregado fino (TMA 4.75mm), rocas de cantera como agregado grueso (TMA 20 mm), Cemento Portland Ordinario, superplastificante (Sikament) y se agregaron nanopartículas de sílice en proporciones al 0.5%, 1%, 1.5% y 2% a la mezcla por el peso del cemento, con relación agua cemento de 0.5, obteniendo datos donde se muestra que gracias a las

interacciones entre nanosílice y la fase líquida de las pastas de cemento la trabajabilidad de la pasta es significativamente mas baja a lo esperado, pero que con una correcta incorporación de algún superplastificante se logra alcanzar la trabajabilidad esperada. Por lo tanto, la adición de nanosílice aumenta en gran medida la demanda de agua de mezclas cementosas, en comparación con las de referencia. Con respecto a la influencia de la nanosílice en el desarrollo de la resistencia mecánica de los materiales cementosos, se encontró que la adición de nanosílice a la pasta de cemento Portland ordinario aumenta la resistencia a la compresión en una medida que depende del contenido de nanosílice, relación en peso del agua y aglutinante (w/b) y tiempo de curado. Los resultados obtenidos mostraron que un uso eficiente de la nano-sílice y un activador en el concreto puede mejorar sus propiedades mecánicas y promover las reacciones puzolánicas, y en ese trabajo la mejor proporción para adicionar la nanosílice fue en 1,5%.

De acuerdo a las observaciones de la averiguaciones anteriormente mencionadas, el resultado de la adición de nanopartículas de sílice en la microestructura y en las propiedades de los materiales para concreto se pueden expresar de manera general en los siguientes enunciados:

Para el estado fresco:

- Aumento en el calor de hidratación.
- Se reduce la segregación de los agregados y el sangrado por el aumento en la viscosidad de la mezcla.
- La alta reactividad de la nanosílice apresura la formación de la fase C-S-H.
- Reducción en tiempos de fraguado.
- El porcentaje óptimo de adición no se encuentra bien definido, algunos proponen alrededor del 10% y otros inferior al 1%.

Para el estado endurecido:

- Aumento en resistencias a compresión en edades tempranas.
- La reacción puzolánica es más acelerada.
- Hay una apresurada formación del gel de C-S-H que hace mas compacta la estructura del gel de C-S-H.

- Genera estructura mas compacta en la interfase de la matriz cementante y agregado.
- Reducción en la porosidad de la matriz cementante

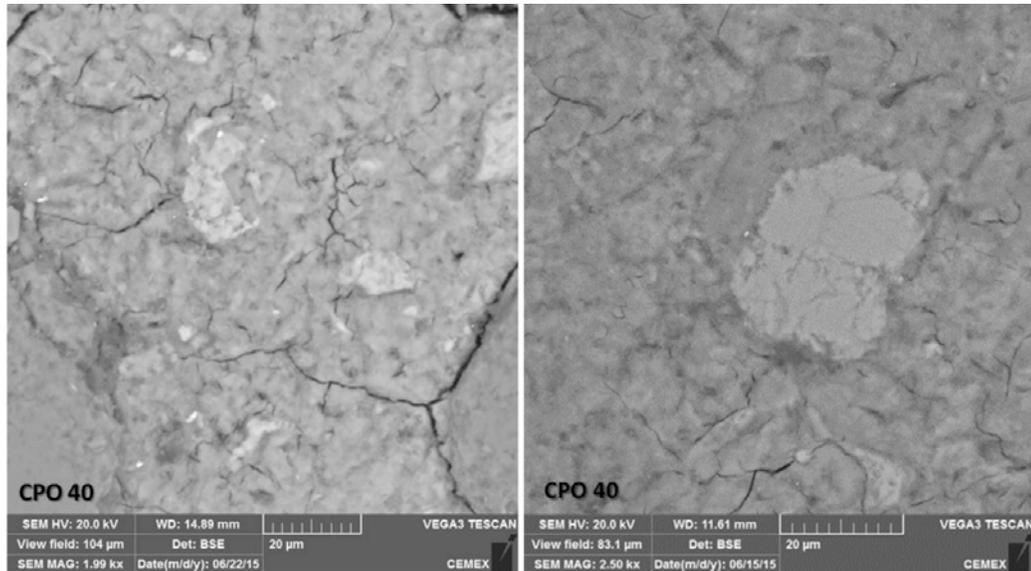


Imagen 11.- Micrografías del cemento CPO a 1500 y 2500 x a 1300 días de exposición al ataque por sulfatos (C. Enrique Castillo, 2015).

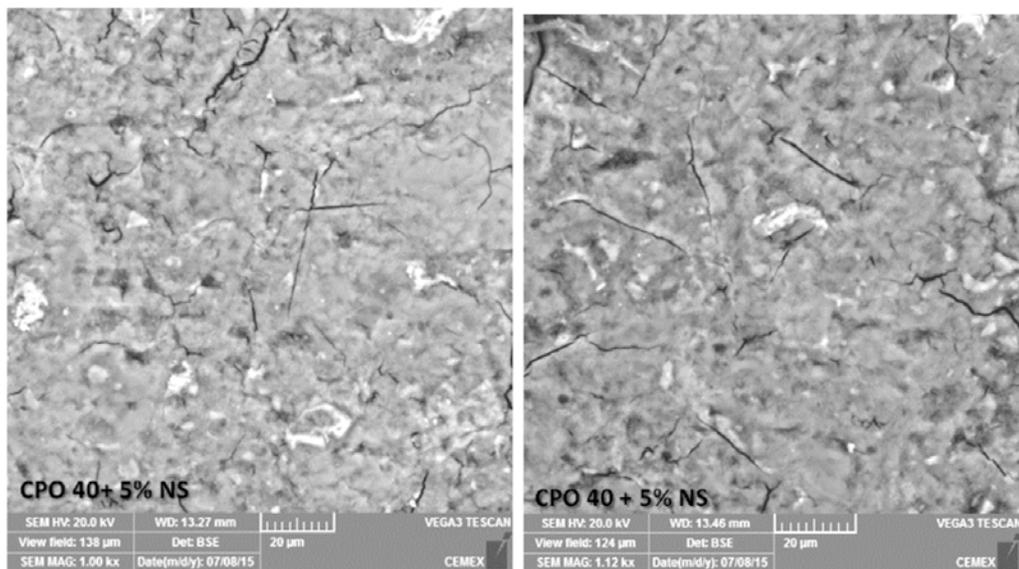


Imagen 12.- Micrografías del cemento CPO con 5% de nanosílice a 1500 y 2500 x a 1300 días de exposición al ataque por sulfatos (C. Enrique Castillo, 2015).

RESISTENCIAS A COMPRESIÓN

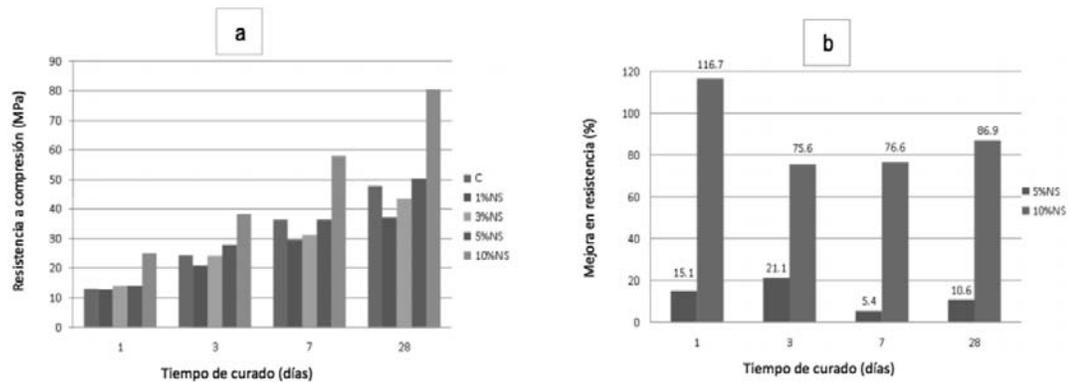


Imagen 13.- Resistencia a compresión de morteros adicionados con nanosílice (a) y porcentaje de mejora en resistencia (b). (Tobon Ji et al., 2011).

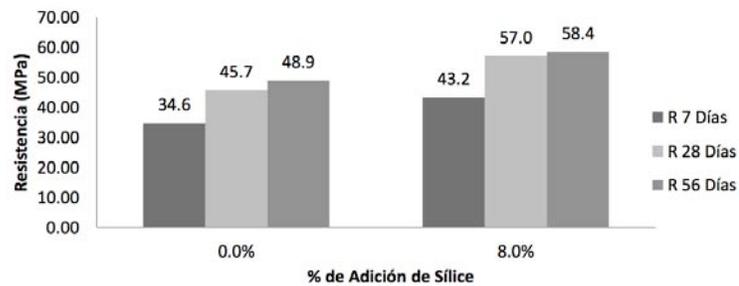


Imagen 14.- Comparativa de resistencia a la compresión en concretos con 0% y 8% de sílice. (O. Barón González, Y. Mercado Quiroz, 2012).

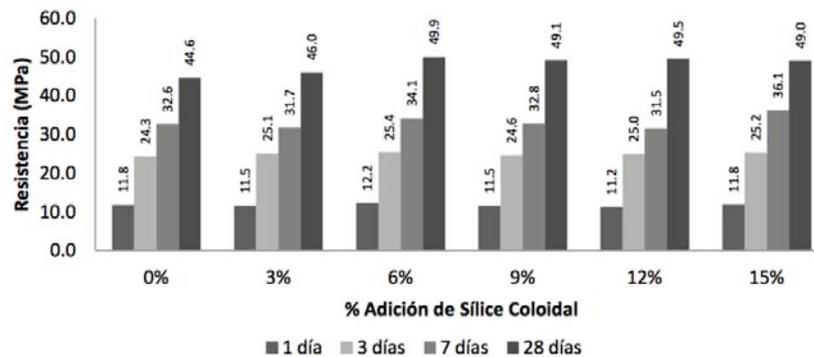


Imagen 15.- Resistencia a compresión en morteros adicionados con sílice (O. Barón González, Y. Mercado Quiroz, 2012).

4.2.2 Caso real del uso de nanopartículas de sílice en la construcción

CONSTRUCCIÓN DE LA CÚPULA DE UN DEPÓSITO DE GAS LICUADO EN CARTAGENA (ESPAÑA)

El concreto para este depósito requería de:

- Ausencia de contracción y grietas, pero altas propiedades de resistencia mecánica (¿Mayor resistencia = alto contenido de cemento?)
- Estructura en rampa de 30 grados. Consistencia baja para evitar segregación y pérdidas de concreto en el perímetro de la cúpula, pero una buena trabajabilidad para llenar la barra de refuerzo de acero.
- Buen acabado superficial



Imagen 16.- Acabado superficial.

En base a esos requerimientos se propuso:

- Reducir la cantidad de cemento para atenuar la posible aparición de grietas debido a la contracción plástica.
- El uso de nanosílice para compensar la menor cantidad de cemento y para mejorar la reología y la docilidad del concreto con baja consistencia.

Se realizaron pruebas iniciales creando un prototipo para encontrar la trabajabilidad ideal para la estructura, analizando visualmente que no surgieran grietas y tuviera un

buen acabado superficial sin fisuras, también revisando que se alcanzan las especificaciones generales del proyecto en cuestión de propiedades mecánicas, como por ejemplo, realizando pruebas a compresión y porosidad.



Imagen 17.- Prototipo de cúpula.



Imagen 18 .- Pruebas mecánicas del concreto.

Para que finalmente se lograra obtener:

-Baja consistencia, de 6cm con buena reología y trabajabilidad.

- Ausencia de grietas en la superficie.

- Muy baja permeabilidad.

- Alta resistencias:

25MPa en 12 horas, 40 MPa en 2 días, 50MPa en 7 días y 60MPa a los 28 días.

- Reducción de costos en materiales en un 12%.

- Beneficio económico debido a la reducción de tiempo en el sitio de construcción.

Teniendo así que el uso de nanosílice compensa la menor cantidad de cemento que debe emplearse y mejora la reología y trabajabilidad del cemento con baja consistencia. Además, se obtiene un excelente acabado superficial sin presencia de fisuras y se consigue reducir en un 12 % el empleo de materiales con lo que se obtiene un beneficio económico aceptable.



Imagen 19 .- Cúpula vista desde el interior del tanque.



Imagen 20 .- Tanque de gas licuado.

4.2.3 Impacto al medio ambiente

En la industria del concreto los temas respecto al medio ambiente van aumentando su relevancia. Principalmente por la generación de CO₂ en la industria del cemento, donde sus procesos de calcinación y descarbonatación representan gran emisión de CO₂.

Para reducir esta huella de carbono la industria a implementado varias alternativas que ya han ayudado a reducir estas emisiones en un cierto porcentaje, y por lo mismo se opta por las siguientes opciones para reducir este gas de efecto invernadero:

- Uso de materiales ya calcinados en la fabricación de cemento: siendo cenizas volantes, escorias, fillers en el cemento como calizas, que no generan emisiones de CO₂ y reducen el porcentaje de clinker utilizado para la producción de una tonelada de cemento y por lo tanto, reducen el porcentaje de CO₂ producido.
- El uso de nanotecnología, pudiendo adicionar nanopartículas a las matrices cementantes para modificar sustancialmente su creación, desempeño y degradación.

A raíz de las aplicaciones emergentes de la nanotecnología en las industrias biomédicas y electrónicas, la industria de la construcción recientemente comenzó a buscar una manera de avanzar en los materiales de construcción convencionales utilizando una variedad de nanomateriales. El uso de materiales y aplicaciones de nanotecnología en la industria de la construcción debe considerarse no solo para mejorar las propiedades y funciones de los materiales, sino también en el contexto de la conservación de la energía. Este es un manifiesto particularmente importante ya que un alto porcentaje de toda la energía utilizada es consumida por edificios comerciales y casas residenciales por el uso de calefacción, iluminación y aire acondicionado.

Algunos estudios, como los realizados por Klaine et al. 2008, que revisa el comportamiento de los nanomateriales y el destino medioambiental, o aquellos plasmados por científicos de la Universidad Rice, han analizado los beneficios del uso de nanomateriales en materiales de construcción, pero también destaca los aspectos potencialmente dañinos de la liberación de nanomateriales en el medio ambiente, comentándose que al final del ciclo de vida, existe un riesgo de liberación al medio ambiente de los desechos de nanomateriales sólidos a medida que se eliminan en vertederos e incineradores, al igual que la aerosolización de los nanomateriales

obtenidos, efluentes de las aguas residuales de los procesos de fabricación, y trabajos relacionados con la construcción, así como el desgaste adhesivo, la abrasión y la corrosión de edificios e infraestructuras civiles también podrían dar como resultado la liberación de nanomateriales al medio ambiente.

Inevitablemente, la producción, el uso y la eliminación darán lugar a emisiones al medio ambiente. Las corrientes de tratamiento de aguas residuales, el vertido y la combustión de productos que contienen nanomateriales son medios a través de los cuales pueden terminar en el medio ambiente, aunque lo más probable es que lo hagan como formas modificadas de su contraparte principal. Además, algunos nanomateriales se usan en aplicaciones de remediación ambiental y, como tales, se utilizan como nanomateriales primarios para el medio ambiente.

El conocimiento de la ciencia de los coloides puede proporcionar información sobre el probable destino y el comportamiento de los nanomateriales (Lead y Wilkinson 2006), se cree que el comportamiento de las nanopartículas en el entorno dependa del carácter físico y químico del nanomaterial como de las características del entorno receptor (Chen et al. 2008). En general, se sabe que las partículas pequeñas tienden a agregarse o aglomerarse para eventualmente asociarse con otras partículas disueltas, coloidales y en partículas presentes en el medio ambiente.

Hasta el momento, no hay publicaciones revisadas que proporcionen información sobre concentraciones o cantidades de nanomateriales en compartimentos ambientales, tales como aguas superficiales y suelos. Las estimaciones de las cantidades de nanomateriales presentes en aguas superficiales y otros medios derivan de escenarios de exposición calculados basados en el uso previsto de nanomateriales y no a partir de mediciones reales (Boxall et al. 2007, Mueller y Nowack 2008).

Se están desarrollando métodos para medir nanomateriales en matrices ambientales específicas para diversos materiales (Christian et al. 2008, Hassellöv et al. 2008, Tiede et al. 2008) y las métricas apropiadas de la medición de nanomateriales manufacturados en relación con la evaluación del riesgo ambiental siguen en discusión.

En el mundo se consumen vastas cantidades de concreto por sus grandes beneficios para la construcción y para mal el concreto se ha catequizado en un sinónimo de

descuido ecológico, por el uso de recursos como agua, arena y cemento, donde para generar este último se gasta mucha energía y durante el proceso además libera dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que aqueja a el calentamiento global; pero teniendo un comparativo con otro material cada vez mas utilizado en la construcción como lo es el acero, se conoce que el acero necesita mucho más desgaste de energía para su producción, teniendo que resulta menos afectado el ambiente si se usa concreto en vez de acero.

Pero hay oportunidades para el ahorro de energía, además de usar nanomateriales para recolectar energía solar u otras formas de energía renovable, se puede incluir un mejor manejo térmico mediante el uso de nanopartículas de sílice en cerámicas aislantes y pintura o revestimiento que permiten la conservación de energía.

Además, los nanomateriales elaborados que extienden la durabilidad de las estructuras (por ejemplo, a través de una resistencia mejorada a la corrosión, la fatiga, el desgaste y la abrasión) también contribuyen indirectamente a ahorrar energía que de lo contrario se usaría para reparar o reemplazar la infraestructura deteriorada.

Si la construcción es una de las actividades mas contaminantes del mundo, por consumo de recursos naturales y energía, debería de hacerse con responsabilidad.

En este contexto, es crucial determinar el destino de los nanomateriales en el medio ambiente y así su disponibilidad a la exposición ambiental pueda ser evaluada.

4.2.4 Costos

Hemos centrado nuestra atención en un cemento en el que emplean nanosílice para mejorar sus propiedades, ya que en este caso además se obtiene una reducción en el coste final del producto lo que es muy interesante para otras empresas del sector. Los productores de nanosílice concuerdan que entre los beneficios de la nanosílice se encuentra una alta impermeabilidad, y con esto se podría suponer un ahorro de costos en agentes impermeabilizantes.

Otros autores concluyen que las mezclas de nanopartículas con adiciones micrométricas parecen ser efectivas a la hora de mejorar el desempeño y disminuir costos, y que siempre se deberá comparar el costo de cambiar la mezcla básica del concreto, contra el costo al utilizar aditivos.

Algunos nanomateriales como el de dióxido de titanio, óxido de zinc, dióxido de sílice, óxido de aluminio, óxido de hierro y la zirconia están disponibles en el mercado en forma de suspensión o en polvos.

El precio para la adquisición de nanopartículas de sílice va a variar de acuerdo a la compañía, a el país de compra o por la gran variedad de tamaños para la obtención de nanopartículas de sílice, también el costo depende si se encuentran en polvo o suspensión y su concentración, y por lo mismo si las soluciones requeridas están disponibles en agua o etanol, por lo que hay que conocer bien que nanomateriales se van a solicitar específicamente ya que son varias características que se toman en cuenta al pedir el nano material.

Algunas empresas que venden nanomateriales de sílice son:

- NanoComposix

Es una compañía con 13 años en el mercado que ha proporcionado nano materiales en diferentes variantes de material, tamaño, forma y superficie, produciendo más de 2000 nano compuestos personalizados, biofuncionalizados, fluorescentes y magnéticos para cumplir con las especificaciones de los clientes.

- SigmaAldrich

Dedicados a hacer investigación y producción biotecnológica más sencilla y rápida.

Proporcionan a los científicos y los ingenieros materiales, tecnologías y servicios de laboratorio de su clase. Con la combinación de Merck Millipore y Sigma-Aldrich en 2015, ahora tienen a disponibilidad alrededor de 300 000 productos, una mayor presencia mundial y una plataforma de comercio electrónico en el sector por medio de SigmaAldrich.com.

- Alfa Aesar by Thermo Fisher Scientific

Fabricante y proveedor de sustancias químicas, metales y productos relacionados con las ciencias biológicas, con gran experiencia de 50 años en el sector de la investigación y

el desarrollo. Suministra materias primas de la máxima pureza para todo tipo de aplicaciones relacionadas con la investigación y el desarrollo, con un inventario de más de 46 000 productos disponibles en diversas cantidades, desde artículos suministrados por gramos hasta una producción al por mayor o casi al por mayor. La línea de productos consta de una completa gama de compuestos donde uno de ellos son los nanomateriales.

- NanoCym

Compañía de tecnología con sede en Scottsdale, Arizona, que se dedica a apoyar la investigación y el desarrollo al proporcionar alta calidad a precios asequibles en pro de la cultura de investigación y desarrollo significativos, tanto internamente como dentro de la comunidad científica mundial.

- Galen Lab Supplies

Es proveedor encargado de suministrar equipos y suministros no disponibles a través de grandes proveedores al usuario final con sede en Estados Unidos, pero si el usuario final tiene dificultades para adquirir materiales fuera de los EE. UU., ellos se encargan de la importación.

En este caso hace función como distribuidor de la compañía Superior Silica, para la venta de nanopartículas de sílice.

- MKnano (división de M K Impex Corp.)

Empresa ubicada en Toronto, Canadá, creada en 2007, exportando productos de nanotecnología a más de 35 países en los siguientes formatos de materiales:

Clústeres Atómicos y Moleculares, Buckyballs, Grafeno, Fullerenos y Nanotubos de Carbono, Nanocristales, Nanopartículas y Nanopolvos, NanoFillers, Nanoaditivos, Nanoalambres, Nanopartículas Magnéticas, Nanoestructuras Magnéticas, Polvos Nanolubricantes, Nano Tubos.

La siguiente tabla muestra los precios de algunos productos de sílice que venden las compañías antes mencionadas.

Compañía	Descripción	Volumen/Masa	Precio
NANOCOMPOSIX	Nanoxact Silica -20 nm (concentración en masa de 5 mg/ml, en agua, nanosferas)	100 ml	650 USD
	Nanoxact Silica -80 nm (concentración en masa de 10 mg/ml, en agua, nanosferas)	100ml	465 USD
	Nanoxact Silica -80 nm (seco, en polvo, nanosferas)	1g	465 USD
SIGMA-ALDRICH	Silica- 5 a15nm (en polvo, nanosferas)	250g	10 320 MXP
	Silica -80 nm (concentración en masa 10 mg/ml, en etanol)	1ml	2 243 MXP
	Silica- 200 nm (en polvo, nanopartículas)	1g	5 292 MXP
ALFA AESAR BY THERMO FISHER SCIENTIFIC	Silica- 80 nm (en polvo, amorfo)	25g	70 USD
NANOCYM	Silica- 100 nm (seca, en polvo)	5g	75 USD
	Polydisperse Silica- 50nm (polidispersa, seca , en polvo)	100g	46 USD
	Silica- 100 nm (concentración en masa 10 mg/ml, en agua o etanol)	15ml	150 USD

Compañía	Descripción	Volumen/Masa	Precio
GALEN LAB SUPPLIES	Supsil Premium – 50 a 500 nm (concentración en masa 10 mg/ml, en agua o etanol)	15ml	262.5 USD
	Supsil Premium – 50 a 500 nm (seco, en polvo)	5g	225 USD
	Supsil Premium – 50 a 500 nm (seco, en polvo)	100g	1350 USD
	Supsil Repel – 50 a 500 nm (concentración en masa 10 mg/ml, en agua o etanol)	15ml	350 USD
	Supsil Repel – 50 a 500 nm (seco, en polvo)	5g	300 USD
	Supsil Repel – 50 a 500 nm (seco, en polvo)	100g	1800 USD
MKNANO	MKN hydrophilic SiO ₂ – 15 nm (seco, en polvo)	100g	31 USD
	MKN Lipophilic SiO ₂ – 15 nm (seco, en polvo)	10kg	1710 USD

Algunos de los precios no toman en cuenta costos de envío e impuestos y la mayoría se encuentran en Estados Unidos.

Durante 2017 los materiales de construcción en general ya sean polvos de nanomateriales (por ejemplo de sílice), arena, grava, cemento, etc , se encarecieron 8% anual, según INEGI, este año se dicen incrementar nuevamente y eso provocará un panorama aun mas complejo para el sector, teniendo que estar alertas, pues además una nueva reglamentación se va a hacer presente, pudiendo afectar costos en construcción de vivienda con incrementos de hasta un 2%.

4.2.5 Seguridad y riesgo del uso de nanopartículas

Las propiedades de los nanomateriales no están siempre bien identificadas y requieren una valoración de los riesgos de posibles exposiciones que surjan durante su fabricación y uso.

Algunos nanomateriales podrían considerarse como posibles contaminantes emergentes por la falta de regulación respecto a su liberación al medio ambiente, a pesar de las crecientes preocupaciones sobre los riesgos asociados a la salud pública y ambiental. Una vez en el medio ambiente, los nanomateriales pueden experimentar diversas transformaciones físicas, químicas y biológicas que cambian sus propiedades, impacto y destino. Por lo tanto, un perfil de la exposición del ciclo de vida de los nanomateriales fabricados es esencial para evaluar los impactos potenciales en la salud humana y del ecosistema, así como para mitigar los riesgos innecesarios.

Los factores de riesgo varían desde la exposición ocupacional de los trabajadores durante el recubrimiento, moldeo, composición e incorporación de nanomateriales en los materiales o componentes de construcción terminados, hasta la exposición de la comunidad durante la construcción, reparación, renovación y actividades de demolición.

También hay indicios de que las nanopartículas se pueden transportar desde la capa superior de la nariz hasta el cerebro. Esto es una preocupación debido a la relación que se tiene con algunas enfermedades cerebrales por lo que se necesita más investigación al respecto.

Las nanopartículas que no son absorbidas por el intestino o los pulmones dejan el cuerpo en las heces, ya sea directamente o después de que se eliminan de los pulmones mediante la eliminación normal del moco. Incluso las nanopartículas insolubles que alcanzan los alvéolos finamente ramificados en los pulmones pueden eliminarse mediante macrófagos que los envuelven y los llevan al moco, pero solo del 20 al 30 por ciento de ellos se eliminan de esta manera. Las nanopartículas en la sangre también pueden ser filtradas por los riñones y excretadas en la orina. Los resultados a largo plazo son escasos, pero es sabio suponer que las nanopartículas no secretadas se acumularán en los órganos que pueden alcanzar si la exposición continúa durante largos períodos.

Un riesgo en el humano por la exposición de nanopartículas es dirigido hacia el área del ADN ya que las nanopartículas pueden actuar de distintas maneras; existe alguna evidencia de que las nanopartículas pueden pasar a compartimentos dentro de la célula, incluido el núcleo que alberga la gran mayoría de los genes. Eso significa que pueden interactuar directamente con el ADN o afectar produciendo especies de oxígeno reactivas (a menudo conocidas como radicales libres) en las proximidades del material genético. Adquirir una capa de proteína puede ayudar a las nanopartículas a penetrar en los tejidos. El recubrimiento puede ayudar a las partículas a cruzar la membrana límite alrededor de una célula, o la membrana nuclear alrededor del ADN de la célula. El último efecto se ha demostrado con nanopartículas de oro unidas a una proteína nuclear específica.

Se han informado efectos genéticos perjudiciales para algunos nanomateriales, el daño puede incluir daño en el ADN, alteraciones cromosómicas o mutaciones genéticas, detectadas por diferentes ensayos. Algunos nanomateriales se han registrado positivos en tales pruebas para los tres tipos de daño.

Varios nanomateriales se han estudiado intensamente para determinar los efectos genéticos, y los resultados son frecuentemente inconsistentes, según el tipo de prueba utilizada, las líneas celulares y las condiciones precisas para la administración de los nanomateriales al cultivo. Esto hace que sea más difícil interpretar su relevancia para los nanomateriales en uso.

En teoría, hay efectos potencialmente nocivos adicionales de los nanomateriales, incluida la interferencia mecánica con los movimientos de los cromosomas durante la división celular y otras fuentes de daño al ADN, como la liberación de metales desde las nanopartículas.

Estudios previos sobre la contaminación atmosférica, incluyendo micropartículas que se aproximan a la escala nanométrica, sugieren que las nanopartículas fabricadas podrían afectar el sistema cardiovascular, el corazón y los vasos sanguíneos, aunque los mecanismos exactos no se conocen bien. Sin embargo, aún no hay pruebas claras de que este riesgo surja con las nanopartículas fabricadas, siendo necesaria la recopilación de más información para comprender mejor esta posibilidad.

En caso de el polvo de sílice cristalino respirable, puede penetrar profundamente en los pulmones. Los mecanismos naturales de defensa del cuerpo pueden eliminar gran parte del polvo inhalado. Sin embargo, en caso de exposición prolongada a niveles excesivos de este polvo, se vuelve difícil eliminar el polvo de los pulmones y una acumulación puede, a largo plazo, producir efectos irreversibles para la salud.

Durante muchos años, se ha sabido que la inhalación prolongada de sílice cristalina respirable puede causar un tipo específico de daño pulmonar llamado silicosis. De hecho, la silicosis es la enfermedad ocupacional conocida más antigua del mundo y recientemente se ha encargado a un equipo de científicos una reciente evaluación de peligros de los efectos de salud de la sílice cristalina respirable.

4.2.6 Normatividad de nanopartículas

Muchas empresas son renuentes a utilizar nanopartículas en sus productos a pesar de que el ejercicio experimental ha demostrado que el uso de nanotecnología mejora sus competencias, siendo así la falta de claridad científica acerca de los efectos potenciales sobre la salud de la exposición ocupacional a las nanopartículas una de las restricciones que frena la usanza y comercialización de aquellos productos basados en nanotecnología.

Actualmente se realizan varios esfuerzos para hacer posible la implementación de las nanopartículas en mayor medida, desarrollando organismos reguladores y una

normativa íntegra que regule el uso y exposición a los materiales pudiendo así incrementar la confianza de fabricantes, trabajadores y consumidores hacia los mismos.

La aplicación potencial de los nanomateriales parece ser ilimitada y se espera que impacte prácticamente todas las facetas de la industria y la sociedad global, las propiedades únicas exhibidas a nano escala se están aplicando en una variedad de áreas de productos que incluyen construcción, computadoras, cuidado de la salud, empaques, textiles y energía. Sin embargo, el uso de nanomateriales artificiales como componentes primarios e intermedios en productos manufacturados puede plantear inquietudes sobre la seguridad de los trabajadores y el lugar de trabajo.

Canadá, a través de Grupo CSA, desarrolló la primera norma ISO sobre Nanotecnologías para garantizar la seguridad en los lugares de trabajo, bajo la denominación (CSA Z12885)-Programa de Control de la exposición a las nanotecnologías de los nanomateriales artificiales en los lugares de trabajo, donde proporciona una guía para el uso seguro de los nanomateriales en el lugar de trabajo.

CSA-Z12885 proporciona orientación de seguridad en el lugar de trabajo a los fabricantes, procesadores de material, investigadores, laboratorios y otros en el uso de nanomateriales, al complementar los enfoques reconocidos de la gestión de riesgos con un enfoque en la información y los problemas específicos de las nanotecnologías. Esta guía ayuda a los usuarios a:

- Comprender los riesgos potenciales asociados con nanomateriales.
- Participar en procedimientos de evaluación de riesgos e implementar medidas preventivas y protectoras.
- Mejorar la salud y seguridad dentro de sus lugares de trabajo.
- Aumentar la participación de los trabajadores mediante la cooperación en estrategias de prevención de lesiones y enfermedades.
- Evaluar y determinar requisitos de capacitación apropiados para integrarlos en los procesos existentes.

Para que posteriormente en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO-International Organization for Standardization) se siguiera dando pie a las siguientes normas.

ISO/TR 12885:2008

Nanotecnologías - Prácticas de salud y seguridad en entornos ocupacionales relevantes para las nanotecnologías.

- Describe las prácticas de salud y seguridad en entornos ocupacionales relevantes para las nanotecnologías.
- Enfocado en la fabricación y el uso ocupacional de nano materiales artificiales.
- No aborda las cuestiones o prácticas de salud y seguridad asociadas con nano materiales generados por procesos naturales, procesos calientes y otras operaciones estándar que generan involuntariamente nano materiales, o posibles exposiciones o usos del consumidor, aunque parte de la información puede ser relevante para esas áreas y podría ayudar a las empresas, investigadores, trabajadores y otras personas a prevenir las consecuencias adversas para la salud y la seguridad durante la producción, manejo, uso y eliminación de los nano materiales fabricados.

Algunas otras normas que se están desarrollando son:

ISO/DTS 16195

Nanotecnologías: orientación para el desarrollo de materiales de prueba representativos compuestos por nano objetos en forma de polvo seco.

ISO / DTR 12885

Nanotecnologías - Prácticas de salud y seguridad en entornos ocupacionales relevantes para las nanotecnologías.

Por otro lado, en España se encuentra el Centro de Competencias sobre nanotecnología, que intenta proporcionar apoyo a las empresas y centros que estén interesados en sintetizar o emplear nanomateriales, percatarse sobre la toxicidad o inactividad de los mismos, sobre la legislación vigente y sobre qué tipo de medidas de protección ambiental, de salud y seguridad deben implantar en sus empresas para asegurar que no existe ningún riesgo. El centro es una respuesta del Gobierno al creciente interés suscitado por los nanomateriales en la sociedad.

Mientras que para México, con el propósito de favorecer el intercambio comercial con otras economías, el gobierno decidió que las normas mexicanas estén armonizadas con las normas que se produzcan en el ámbito internacional. Por esta razón, y con la finalidad de atender las tareas designadas por el Comité Técnico ISO/TC 229, la Secretaría de Economía formó un comité denominado Comité Técnico de Normalización Nacional en Nanotecnologías (CTNNN) que tiene la función de elaborar las normas mexicanas, de carácter voluntario, para las nanotecnologías.

Considerando que las nanotecnologías tienen el potencial de generar cambios en innovaciones en varios sectores, la Secretaría de Economía decidió tomar la coordinación de este Comité y designar como co-coordinador al Centro Nacional de Metrología (CENAM).

El CTNNN se conforma por un grupo de expertos facultado para elaborar, revisar, modificar, cancelar y aprobar Normas Mexicanas (NMX) para los productos, equipos, métodos de prueba, aspectos de salud y prácticas ambientales en materia de nanotecnologías.

Así, en septiembre del 2013, el Consejo Directivo del CENAM aprobó el establecimiento del Programa de Metrología para las Nanotecnologías (ProMetNano) con el objetivo de atender de manera sistemática, las necesidades metrológicas del país, actuales y previsibles, en soporte a las nano ciencias y para el aprovechamiento de las nanotecnologías.

El ProMetNano se enfoca en cuatro áreas principales:

- Mejora y desarrollo de nuevos patrones de medida/materiales de referencia.

- Mejora y desarrollo de nuevos instrumentos/dispositivos de medida.
- Desarrollo de procedimientos de medición, y transferencia de tecnología.
- Área de Proyectos.

Dentro del área de proyectos, existen tres que surgen como base para normas:

El primer proyecto está enfocado al desarrollo de patrones o materiales de referencia para la nano escala, particularmente de nanopartículas de plata (Ag), que son utilizadas ampliamente en productos de limpieza, en textiles, cosméticos, entre otros. Este material de referencia se utilizaría para evaluar el desempeño de equipos para la medición del tamaño y la concentración de nanopartículas, de equipos de investigación utilizados para la evaluación del riesgo potencial a la salud y al ambiente que pueda asociarse con la producción del nano material.

El segundo proyecto está dirigido a la metrología para espectroscopía Raman, que es una técnica que se utiliza para obtener información química y estructural de diversos materiales y sustancias de manera relativamente rápida y sencilla. Esta técnica se utiliza para caracterizar polímeros, pinturas, películas, polvos e incluso material biológico o nanomateriales, entro otros.

Y el tercer proyecto se enfoca en polímeros nano compuestos de matriz polimérica, con la intención de desarrollar materiales de referencia y protocolos de medida para caracterizar nanomateriales, antes y después de adicionarse a los polímeros, así como las propiedades de los polímeros conteniendo materiales en la nano escala.

Para actualmente contar con las siguientes normas:

NMX-R-27687-SCFI-2014

Nanotecnologías-Terminología y definiciones para nano-objetos-Nanopartícula, nanofibra y nanoplaca, publicada el 20 de octubre del 2014 en el Diario Oficial de la Federación.

NMX-R-80004-1-SCFI-2014

Nanotecnologías-Vocabulario-Parte 1: Conceptos básicos, publicada el 20 de octubre del 2014 en el Diario Oficial de la Federación.

Algunas Normas Mexicanas no son equivalentes con ninguna norma internacional por no existir norma internacional sobre el tema tratado pero hay otras que coinciden totalmente con alguna especificación técnica ISO; de igual manera poco a poco surgen Proyectos de Norma Mexicana relacionada en términos y definiciones relevantes a la caracterización de nano-objetos y aspectos de nanopartículas, pero por la misma cuestión de la falta de investigación con el sílice en nano escala falta tiempo para que surjan normas específicas en su área constructiva, pero al materializarse deberán obedecer pautas de las normas anteriormente mencionadas.

Capítulo 5.- CONCLUSIONES

Las aportaciones respecto a las nanopartículas de sílice permite expresar que no se debe de perder el entusiasmo de continuar investigaciones involucradas con la mejoría del concreto a escala nanométrica, porque es seguro que en unos años será aún mas sencillo poder analizar las características del concreto a tal escala que la creación será sumamente eficaz y con larga vida útil, posibilitando el mayor uso de un nano material, aplicándose desde tratamientos especiales para prevenir que el agua llegue al acero hasta el concreto que se sana a sí mismo sellando sus grietas, obteniendo resultados favorables y menos nocivos en todos los ámbitos posibles.

Hoy en día se están haciendo esfuerzos para evitar que la producción de cemento sea tan dañina, ya sea sustituyendo ciertas cantidades de cemento por algún nano material o como el uso de concretos reciclados para poder reutilizar la mayor cantidad posible de los materiales denominados ya como “desperdicios”.

El sector de la construcción es muy tradicional y un sector de baja tecnología, pero si logramos incorporar en mayor medida las nuevas tecnologías para nuevos nanomateriales e incluso el reciclaje, lo que para algunos representaría sobra de concreto y por lo tanto un desperdicio para otros, significaría una oportunidad de beneficiar zonas marginadas, tal fue un caso en nuestro país en Coahuila, donde se vió un beneficio social tras la entrega de un concreto sobrante en esas zonas. En 2000, el gobernador de Coahuila Enrique Martínez lanzó el programa Piso Firme, que consistía en recorrer las zonas mas humildes para encontrar los hogares de las familias mas necesitadas y brindarles concreto para cubrir el piso de tierra que tenían en la vivienda. Para 2005 más de 34000 casas tenían piso de concreto en lugar de piso de tierra; posteriormente se adoptó para mas zonas de México donde para 2012 el número total de pisos de concreto instalados había alcanzado 2,7 millones; en 2006 una evaluación independiente reveló que los niños de menos de 6 años tenían menos parásitos, 13% menor prevalencia de diarrea y 20% menos anemia que los de hogares que no participaron en Piso Firme. Como estudio extra se observó que los niveles de depresión se redujeron en un 12.5% y el estrés percibido de las madres también se disminuyó en un 10,5% .

Estas solo son cifras de un apoyo general con concreto común, ahora imaginemos que estas estadísticas podrían mejorar si se pudiese llegar a mas lugares y mas personas, si se lograra tener un mejor conocimiento en el campo de las nanopartículas (como las de sílice) para que su producción y costo fuera mayormente asequible, y se pudiera llegar a cierto punto en el cual con un poco de cemento y algunos agregados modificados a nano escala se pueda crear concreto tan económico y sencillo que cumpla con las características mínimas indispensables, y así se pueda mejorar la calidad de zonas ciertamente olvidadas, a las cuales aun no se les ha brindado una oportunidad para demostrar la capacidad de crecimiento que pueden llegar a tener para beneficio de una comunidad e incluso del país.

No obstante, hay muchas actividades que podríamos estar haciendo entretanto con la sencilla y confiable tecnología que ya tenemos. Lo que parece ser mas seguro es que dentro de varios años, cuando las estructuras de acero se hayan oxidado y algunas otras de madera podrido, hay al menos la posibilidad de que las creaciones en concreto estén firmes de pie, como las estructuras antiguas que hoy en día aún se mantienen .

La inversión en investigación y desarrollo es baja para adaptar los procesos a la adición de nanomateriales, por lo que suele haber trabajadores poco calificados manipulando los nanomateriales, afectando su uso y aplicación correctos, aumentando los riesgos de salud y seguridad.

Existe incertidumbre con respecto al riesgo de salud y seguridad de los nano productos, faltando aun métodos estandarizados para determinar los riesgos de salud ocupacional, por lo que es deseable resolver los problemas de salud y seguridad nanotecnológicos antes de llegar al sector de la construcción con el uso de nanomateriales peletizados o dispersos en agua en lugar de nanomateriales a granel, entre otros.

La investigación y el desarrollo requieren equipos costosos y personas capacitadas, y las pequeñas y medianas empresas no pueden invertir, especialmente teniendo en cuenta que las investigación y el desarrollo no son muy utilizados en el sector de la construcción, así que por el momento parece que solo las grandes empresas de

construcción llegarían al mercado de la nanotecnología, adaptando sus procesos para gestionarlo adecuadamente.

El uso de nanomateriales aumenta año con año y la previsión es que siga creciendo. Por tanto, es razonable pensar que como subproductos de la nanotecnología se generen nano residuos, que de no estar bien detectados y controlados pueden afectar negativamente la salud humana y a los ecosistemas, pero la elaboración de nano materiales también pueden contribuir a una industria de la construcción más ecológica cuando se utilizan como sustitutos de otros materiales que se convierten en contaminantes ambientales altamente nocivos.

REFERENCIAS

- + K. Shepard, N. Gromicko, *The History of Concrete*, International Association of Certified Home Inspectors.
- + Norma ASTM C 125.
- + N. Gromicko, E. Ward, *Concrete Admixtures*, International Association of Certified Home Inspectors.
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://echa.europa.eu/es/regulations/nanomaterials> consultado en Febrero/2018.
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://www.crystallinesilica.eu/content/what-respirable-crystalline-silica-rcs> consultado en Enero/2018.
- + M. Da Costa Dávila, D. Duarte David (2013). *Efecto de la adición de nanosílice en cementos y concretos*. Departamento de ciencias de los materiales, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
- + C. Fernández Gutiérrez (2011). *Transporte por electromigración de nanopartículas de sílice en probetas de mortero endurecido a edades tempranas*, Requisito parcial para optar al título de maestro en ciencias con orientación en materiales de construcción, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- + I. Flores Vivián (2009). *Obtención de nanopartículas de SiO₂ y su efecto en las propiedades microestructurales, mecánicas y reológicas en materiales cementantes*, Requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, Facultad de ingeniería civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- + Y. Qing, Z. Zenan, S. Li, C. Rongshen; *A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume*; Journal of Wuhan University of Technology – Materials Sciences Ed.; 2006; 21; 3.
- + I. Jansson, U. Skarp, C. Bigley (2007). *The value of colloidal silica for enhanced durability in high fluidity cement based mixes*; 5 International RILEM simposium on self-compacting concrete.

- + F.Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. Nazari, C-G. Granqvist. *Nanotechnology in eco-efficient construction*; Woodhead Publishing Limited, 2013.
- + C. Enrique Castillo (2015). *Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice*, Requisito parcial para optar al título de Doctor en ingeniería de materiales, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- + Ms. Sanju Mary Sobichen , Mr. R.Vandhiyan , Dr. E.B. Perumal Pillai (2016) Effects of Nanosilica Additions on Mechanical Performance of Concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 4.
- + J. Vera-Agullo (2012, November). *Nanotechnology applied to the construction sector*. Presented at International workshop: Application of nanomaterials in industry. Madrid, Spain.
- + T. Harford, B. Crighton. (2016, Diciembre 18). La historia oculta del omnipresente y mal querido concreto (y la lección que nos dio México). *BBC*, Serie: 50 cosas que hicieron la economía moderna.
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://nanocomposix.com/collections/silica/products/80-nm-silica-nanospheres> consultado en Febrero/2018
- + Tomado de Internet. Disponible en: https://www.sigmaldrich.com/catalog/product/aldrich/633097?lang=es®ion=MX&cm_sp=Insite-_-prodRecCold_xviews-_-prodRecCold10-10 consultado en Febrero/2018
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://www.alfa.com/en/catalog/044781/> consultado en Febrero/2018
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://nanocym.com/product/sn-50-500/> consultado en Febrero/2018
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://galenlabsupplies.com/supsil-premium-dry-powder-50nm-to-500nm/> consultado en Febrero/2018
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://mknano.com/Nanoparticles/Single-Element-Oxides/Silicon-Oxide-Nanopowder/SiO2-amorphous-15-nm-Hydrophilic> consultado en Febrero/2018

- + M. Berger. (2010, July 13). Nanomaterials in the construction industry and resulting health and safety issues. *Nanowerk*.
- + Dr. J. Turney. (2009). Risk Assessment of Products of Nanotechnologies, *CCRSERI*.
- + Tomado de Internet. Disponible en: <http://nanoontario.ca/wp/wp-content/uploads/2012/11/CSA-Z12885-WEB-Oct-26-2012.pdf.pdf> consultado en Febrero/2018
- + Tomado de Internet. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/52093.html> consultado en Febrero/2018
- + Centro Nacional de Metrología. (2017, septiembre 11). Las nanotecnologías en el CENAM. *Revista Mediciones*, Núm. 3.
- + Tomado de Internet. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5435776&fecha=03/05/2016 consultado en Febrero/2018
- + R. Zanella. (2012, enero). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano*, Vol. 5, No. 1.
- + O. Barón González, Y. Mercado Quiroz (2012). *Efectos de la sílice coloidal en las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero y concreto hidráulico*, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia.
- + Tadayon, M. K. ., Sepehri, H., & Sepehri, M. (2010). *Influence of Nano-Silica Particles on Mechanical Properties and Permeability of Concrete*.
- + Tobon Ji, Restrepo OJ, Borrachero MV, & Payá J. (2011). *Evaluation of compressive strength and durability on portland cement blended with nanosilica*.
- + K. Sobolev, M. Ferrada; How Nanotechnology Can Change the Concrete World, Part 1; *American Ceramic Society Bulletin*; 2005; 84; 10; p. 16