

**ESTADO DEL ARTE DE LA NANOTECNOLOGIA APLICADO EN EL AREA DE  
INGENIERIA CIVIL**

**ANGÉLICA MARÍA QUINTERO ORTÍZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

**ESTADO DEL ARTE DE LA NANOTECNOLOGIA APLICADO EN EL ÁREA DE  
INGENIERÍA CIVIL**

**ANGÉLICA MARÍA QUINTERO ORTÍZ**

**Trabajo de grado para optar el título de INGENIERO CIVIL**

**Director**

**LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA**

**Ingeniero Civil, M. SC.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia que ha sido el fundamento de mi existencia a ellos les debo lo que soy; en especial doy gracias a mi madre María Eugenia por su incondicional apoyo, protección y motivación al logro de mis metas.

Agradezco al Ingeniero Luis Alberto por su guía, consejos y disposición a lo largo de este trabajo.

En general a mis amigos y compañeros de clase que de alguna manera aportaron a mi desarrollo durante este largo proceso que ya culmina.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	13
1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS	14
1.1 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES	15
1.2.1 Objetivo General	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	15
2. ESTADO DEL ARTE EN NANOTECNOLOGIA	17
2.1 CONCEPTO DE NANOTECNOLOGÍA Y SUS INICIOS	17
2.2 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGIA	18
2.2.1 Aplicación de La Nanotecnología en La Construcción y El Hábitat	18
2.3 NANOTECNOLOGÍA EN MORTEROS Y HORMIGONES	20
2.3.1 Generalidades en Morteros y Hormigón	20
2.3.2 Cementos con Adiciones	31
2.3.3 Morteros y hormigones a escala nano	45
2.3.4 Fenómenos durante la fabricación del Mortero y hormigón	48
3. NANOTECNOLOGÍA Y SUS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS	57
3.1 LA NANOTECNOLOGÍA Y SUS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS EN EL MUNDO DE LA CONSTRUCCIÓN (MORTEROS Y HORMIGONES)	57
3.2 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA MEJORA Y GENERACIÓN DE OTROS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN	62

3.3 MATERIALES, ESTRUCTURAS Y DISPOSITIVOS INTELIGENTES GRACIAS A LA NANOTECNOLOGÍA	68
3.4 NOTICIAS RECIENTES DE NANOTECNOLOGÍA	70
3.5 CONTRASTE ENTRE EL USO DE MATERIALES CORRIENTES Y MATERIALES CON VENTAJAS NANO TECNOLÓGICAS.	73
3.6 USO DE MATERIALES CON NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA CONCRETO AUTOCOMPACTANTE	77
3.6.1 Obras realizadas en Colombia utilizando concreto Autocompactante	79
3.7 BONDADES DE LA NANOTECNOLOGÍA	81
4. CONCLUSIONES	84
BIBLIOGRAFIA	85
ANEXOS	89

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Imagen del polvo de cemento dispersado en epoxi.	46
Figura 2. Diferentes imágenes de las mismas partículas de cemento.	47
Figura 3. Capas del hormigón a nanoescala.	49
Figura 4. Microfotografía de un agregado del hormigón.	52
Figura 5. Interacción a nanoescala entre las cenizas volátiles	53
Figura 6. Granos de cemento Pórtland	53
Figura 7. Formación de cristales de etringita en el concreto.	54
Figura 8. Estructura altamente ordenada de Gel C-S-H ( $\text{Ca/Si} = 0.9$ ) vista a nanoescala.	59
Figura 9. Planta de tratamiento de agua La Calera.	79
Figura 10. Alboraiá– Bogotá.	79
Figura 11. Andalucía Bogotá.	80
Figura 12. Almadia – Bogotá.	80
Figura 13. Pisos Empresa Postobón- Cali.	81

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Descripción de algunas propiedades de los materiales de construcción.	20
Tabla 2. Composición para cementos tipo Portland.	25
Tabla 3. Análisis por óxidos (según diversos autores).	28
Tabla 4. Especificaciones Químicas.	30
Tabla 5. Clasificación de las adiciones.	34
Tabla 6. Aislación Térmica (Un valor mayor de "R" significa mejor aislación):	74
Tabla 7. Conductividad Térmica (Un número menor significa "menor habilidad para conducir calor" = mejor aislación).	75
Tabla 8. Comparativo de PCI Nanolight contra Adhesivo A y B.	76

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Artículo: Adición de nanopartículas al cemento Portland.	90
Anexo B Resistencia a la Compresión vs Tiempo de curado.	105
Anexo C. Mejoría vs Tiempo de curado.	106
Anexo D Absorción de agua vs Tiempo.	107
Anexo E Expansión (%) vs Tiempo.	108
Anexo F Termogravimetría (DTG).	109
Anexo G Pérdida de peso S-C-H (%) vs Tiempo de curado.	110
Anexo H. Artículo Un futuro prometedor para el concreto.	111

## RESUMEN

**TITULO:** ESTADO DEL ARTE DE LA NANOTECNOLOGIA APLICADO EN EL AREA DE INGENIERIA CIVIL.\*

**AUTOR:**QUINTERO ORTIZ, Angélica María\*\*

**PALABRAS CLAVE:** nanociencia, nanotecnología, nanométrica, morteros, hormigones, Estructuras Inteligentes.

### DESCRIPCIÓN:

Se muestra cómo la nanotecnología está empezando a llegar a este material de construcción buscando generar hormigones de alto desempeño

La Nanotecnología nos permite tener una visión cercana del mundo esto a fin de comprender e intentar dominar las propiedades de la materia a escala nanométrica, es decir, la mil millonésima parte de un metro, longitud que puede corresponder por ejemplo a un grupo de átomos o incluso alguna pequeña molécula. A escala nanométrica la materia ofrece propiedades muy distintas a las conocidas, por eso la nanociencia posee un carácter transversal a las distintas disciplinas científicas, como biología, física química y materiales e ingeniería.

El objeto de la presente investigación, es poner en conocimiento a la Nanotecnología y los materiales relacionados con el área de la construcción. De este trabajo titulado “Estado del arte de la Nanotecnología aplicado en el área de Ingeniería Civil”, se va a realizar un compendio de tipo teórico referente a las aplicaciones de la Nanotecnología en el área de los materiales y relacionadas principalmente al campo de la Ingeniería Civil, desarrollándose temas tales como: Nanotecnología en Morteros, Hormigones de alto desempeño, otros materiales y Estructuras Inteligentes, y el comportamiento de muestras de materiales que ya han sido fabricados con nanotecnología, teniendo en cuenta los reales beneficios que presenta la Nanotecnología en nuestra región y los retos que nos queda como ingenieros de seguir investigando esta nueva ciencia que es un avance importante para la industria de la construcción. Todo lo anterior con sus respectivas conclusiones y análisis del beneficio que implica la utilización de Nanotecnología y sus expectativas de uso.

---

\* Trabajo de Grado,

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Ing. Luis Alberto

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Ing. Luis Alberto

Wladimir Silva.

## ABSTRACT

**TITLE:**STATE OF THE ART OF NANOTECHNOLOGY APPLIED IN THE AREA OF CIVIL ENGINEERING\*

**AUTHOR:**QUINTERO ORTIZ, AngélicaMaría\*\*

**KEYWORDS:** nanoscience, nanotechnology, nano, mortars, concretes, Smart Structures

### DESCRIPTION:

It shows how nanotechnology is beginning to get to this building material seeking to generate high performance concretes

Nanotechnology allows us to have a close view of the world in order to understand this and try to dominate the properties of matter at the nanoscale, for example one billionth of a meter, length may correspond for example a group of atoms or even a small molecule. A matter provides nanoscale properties very different from those known why nanoscience has a transversal to the various scientific disciplines such as biology, chemistry and physics and engineering materials.

The purpose of this research is to inform the Nanotechnology and materials related to the construction area. In this work entitled "State of the art of applied nanotechnology in the area of Civil Engineering", is going to make a compendium of theoretical nature concerning the applications of nanotechnology in the area of materials and related primarily to the field of Engineering civil, developing topics such as: nanotechnology in Mortars, high Performance Concrete, other materials and smart structures, and the behavior of material samples that have already been made with nanotechnology, considering the real benefits of nanotechnology in our region and the challenges we have as engineers continue to investigate this new science that is a major advance for the construction industry. All this with their findings and benefit analysis that involves the use of nanotechnology and its usage expectations.

---

\*Work Degree,

\*\*Faculty of Engineering Physico-mechanical, School of Civil Engineering, Director: Luis Alberto Capacho Silva.

## INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación está centrado en hacer un análisis y dar a conocer nuevas tecnologías en relación a la Nanociencia (nanotecnología) en aspectos tales como generación y estructuración de materiales o modificación de algunos existentes. La investigación también implica el compendio de desarrollos prácticos que ejemplifiquen las mejoras esperadas (en general). Como por ejemplo la investigación de probetas de mortero de cemento ya elaboradas, que a través de una serie de análisis y modificación de sus propiedades físicas y químicas demostrarán el beneficio de la utilización de la tecnología a escala nano a través de un comportamiento más óptimo en contraste con las tecnologías tradicionalmente utilizadas.

Todo lo anterior está plenamente justificado en términos científico-tecnológicos pues da una perspectiva y pone en conocimiento esta nueva tecnología además de los beneficios que ella conlleva. No basta sólo con efectuar diseño estructural eficiente con todos los resguardos y providencias del caso, o utilizar software de última generación, sino tenemos un conocimiento lo más preciso posible acerca del comportamiento y potencialidades que pueden tener los materiales de construcción. Lo anterior implica que si no somos capaces de utilizar los desarrollos tecnológicos en ciencia de materiales a nuestro favor, no sabremos optimizar nuestra labor de ingenieros.

## **1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS**

### **1.1 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el siglo XXI la ciencia se ha visto revolucionada por investigaciones relacionadas con nanociencia y nanotecnología, conceptos que se traducen en un gran desarrollo tecnológico de una variada gama de actividades de gran impacto para la sociedad. Una de ellas es el estudio de materiales utilizados en algunas áreas de la Ingeniería Civil.

La nanociencia y la nanotecnología son nuevas herramientas para la investigación, innovación y desarrollo científico a partir del control de la estructura fundamental y el comportamiento de la materia a nivel atómico. Se utiliza para generar nuevas propiedades y usos como: inclusión de nanopartículas para reforzar materiales y mejora de propiedades de materiales diseñados para trabajar en condiciones extremas; temperatura, ataque de óxidos y/o sulfatos etc.

El propósito del tema de investigación se centrará en una área regularmente abordada en las investigaciones realizadas hasta ahora dentro de la ingeniería Civil, en donde se plasmará tópicos como la determinación de la influencia de las nanomoléculas en materiales utilizados como el concreto, vidrio y pinturas, etc. El documento resultado de la investigación ilustrará el comportamiento de muestras que han sido fabricadas con nanomaterial, mencionando comportamientos físicos superficiales y microestructurales.

También se abordará si la incorporación de las nanomoléculas favorece la disminución y/o aumento de costos al fabricar un material modificado con nanotecnología.

## **1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **1.2.1 Objetivo General**

Investigar sobre la nanotecnología como alternativa de desarrollo y aplicación en el campo de la ingeniería Civil.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar un estado del arte de aplicaciones desarrolladas de la nanotecnología en la Ingeniería Civil haciendo énfasis en el área de concretos.
- Recopilar información que contenga el comportamiento físico, superficial y microestructural de muestras que han sido fabricadas con nanomateriales.
- Analizar la viabilidad del uso de la nanotecnología en materiales utilizados en el área de la Ingeniería Civil en nuestra región.
- Escribir un artículo relacionado con el tema tratado en la investigación.

## **1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES**

Es importante destacar que una investigación de este tipo, aunque trata de ser lo más completa y exhaustiva posible, no está exenta de pasar por alto algunos desarrollos y materiales por la amplitud del campo de estudio.

Así, se centró el análisis en Nanociencia (nanomecánica, materiales nanoestructurados) pues se considera esencial dar a conocer la “base” de la tecnología a escala nano, en desarrollos nanotecnológicos en

morteros,hormigones y otros materiales utilizados en la construcción (el primero, parte central del presente trabajo), en un conocimiento de otros materiales generados y mejorados a través de la nanotecnología además de una visión del presente y del futuro para desarrollos nanotecnológicos en materiales relativos al área de la construcción, ya que es importante generar una perspectiva lo más completa posible en desarrollos materiales en esta área.

## 2. ESTADO DEL ARTE EN NANOTECNOLOGIA

### 2.1 CONCEPTO DE NANOTECNOLOGÍA Y SUS INICIOS

La palabra "nanotecnología" es usada extensivamente para definir las ciencias y técnicas que se aplican a un nivel de nanoescala, esto es una medida extremadamente pequeñas "nanos" que permiten trabajar y manipular las estructuras moleculares y sus átomos. En síntesis nos llevaría a la posibilidad de fabricar materiales y máquinas a partir del reordenamiento de átomos y moléculas. El desarrollo de esta disciplina se produce a partir de las propuestas del físico estadounidense Richard Feynman.

La mejor definición de Nanotecnología es: "La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala"<sup>1</sup>.

Cuando se manipula la materia a la escala tan minúscula de átomos y moléculas, demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas. Por lo tanto, científicos utilizan la nanotecnología para crear materiales con propiedades únicas.

Más que su concepto, lo que representa potencialmente dentro del conjunto de investigaciones y aplicaciones actuales cuyo propósito es crear nuevas estructuras y productos que tendrían un gran impacto en la industria de la construcción.

---

<sup>1</sup>Tomado de European Commissioner for Science & Research, JanezPotocnik.

El padre de la "nanociencia", es considerado<sup>2</sup>Richard Feynman, premio Nobel de Física, quién en 1959 propuso fabricar productos en base a un reordenamiento de átomos y moléculas. En 1959, el gran físico escribió un artículo que analizaba cómo los ordenadores trabajando con átomos individuales podrían consumir poquísima energía y conseguir velocidades asombrosas.

Existe un gran consenso en que la nanotecnología que llevará a una segunda revolución industrial tal como anunció hace unos años, Charles Vest (ex-presidente del MIT)<sup>3</sup>.

## **2.2 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGIA**

### **2.2.1 Aplicación de La Nanotecnología en La Construcción y El Hábitat**

Las aplicaciones de la Nanotecnología, en la actualidad, en este ítem, se centran fundamentalmente en tres áreas principales:

- a) Medicina y ciencias de la vida.
- b) Electrónica y dispositivos varios.
- c) Materiales.

La mejora que esta nueva ciencia genera, se ve reflejada en la mejora de diversas propiedades de los materiales, entre las que destacan:

Propiedades ópticas: En interacción con la luz, se puede producir transparencia, absorción de la luz UV, Aumento de brillo, Mejora del color, Electroluminiscencia.

---

<sup>2</sup>Tomado de Nobelprize.org.: "Richard P. Feynman - Biography".

<sup>3</sup>Charles Vest ex-presidente del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)

Propiedades mecánicas: dureza, rigidez, resistencia a la abrasión y rayado.

Propiedades de transporte y permeabilidad: en barreras de líquidos y gases.

Propiedades magnéticas, eléctricas y térmicas: conductividad.

Comportamiento semiconductor: partículas muy pequeñas (<10nm) a temperaturas muy bajas reducen la conductividad.

Comportamiento conductor: Algunas partículas aumentan la conductividad de los polímeros.

“Resistencia al fuego” de acuerdo a lo siguiente: Prevención de goteo, combustión y gases tóxicos, Reducción de la permeabilidad de los polímeros y formación de costra impermeable.

Propiedades superficiales:

Energía superficial: mojado, sinterización.

Efectos catalíticos: antisépticos, fungicidas.

Veamos también algunas aplicaciones más prácticas en materiales de construcción:

**Tabla 1. Descripción de algunas propiedades de los materiales de construcción<sup>4</sup>.**

<b>MATERIAL</b>	<b>PROPIEDADES</b>
En cerámicas, vidrio, piedra y cemento	Decoración, autolimpiado, actuación como barrera, Control nanoestructural.
Maderas	Durabilidad, propiedades de barrera, actividad antiséptica, resistencia al fuego
Metales	Conductividad eléctrica, protección mecánica, resistencia al fuego, inhibición de la corrosión.
Plásticos	Durabilidad, permeabilidad, resistencia al fuego, comportamiento termoplástico.

## **2.3 NANOTECNOLOGÍA EN MORTEROS Y HORMIGONES**

### **2.3.1 Generalidades en Morteros y Hormigón**

El mortero es un material que viene empleándose en las construcciones desde tiempos muy remotos y en diferentes usos. En su forma más general está constituido por un árido fino y un aglomerante; ha sido utilizado como material de pega para bloques de piedra en la construcción de los edificios más antiguos que recuerda la historia en Asiria, Babilonia, etc.; así como para los primeros pavimentos de caminos. Para la fabricación de los morteros se utilizan básicamente los mismos materiales que componen el hormigón, es decir, un árido, pasta de cemento y, eventualmente aditivos o adiciones. Las funciones que el mortero cumple son por lo general bastante limitadas, debido principalmente al

---

<sup>4</sup> Fuente: Libro Materiales para la construcción LyallAddleson Volumen 1. pp. 148.

bajo desarrollo tecnológico del que éste ha sido objeto, lo que implica que su utilización ha sido muy subestimada, relacionándolo sólo con las siguientes áreas:

- Como mortero de junta, para la adherencia de unidades de albañilería.  
Como mortero de estuco, para recubrimiento de superficies de albañilería u hormigón.

Como mortero de pega para unir piezas de revestimiento prefabricadas (baldosas, pastelones, elementos cerámicos, etc.)

Como mortero de relleno en unidades de albañilería armada o placas de fundación de estructuras metálicas o equipos.

Como mortero proyectado para el recubrimiento y sustentación de superficies de suelo, roca, hormigón u otros materiales.

Como mortero de inyección de fisuras y grietas en elementos de hormigón, roca u otros.

Como material de reparación, especialmente en obras de hormigón.

Como recubrimiento interior de tubos metálicos.

Como morteros de tratamiento de juntas de hormigonado.

Para fines constructivos, un conglomerante es un material capaz de desarrollar, después que se han efectuado las reacciones apropiadas, las propiedades adhesivas y cohesivas que hacen posible ligar fragmentos minerales para producir una masa compacta, continua y resistente.

Hoy en día hay una gran variedad de conglomerantes siendo los más relevantes los calcáreos y los bituminosos. En el primer grupo el más importante es el cemento Pórtland, cuya creación se le asigna a Joseph Aspdin (1824), quien por casualidad produjo una mezcla parecida en color a las rocas depórtland, lo que le valió ese nombre a éste cemento.

Se entiende por cemento Pórtland<sup>5</sup> a una clase de cementos hidráulicos, cuyos principales componentes son cal y sílice y, en menor cantidad, alúmina y fierro, que en presencia de agua reacciona para formar finalmente una masa dura que contiene silicatos y aluminatos de calcio hidratado.

A continuación se describe brevemente los constituyentes de morteros y hormigones.

## **Cementos**

En términos generales, se emplea la palabra cemento para designar a una sustancia que tiene propiedades conglomerantes. El Icontec en la norma 31 (2<sup>da</sup> versión)<sup>6</sup> «Cemento. Definiciones» define el cemento como «Un material pulverizado que además de óxidos de calcio contiene sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Se excluyen las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.»

De otro lado, existen dos propiedades muy importantes del cemento: la propiedad hidráulica y la propiedad puzolánica. La propiedad química (propiedad hidráulica) se define como la «Aptitud de un material pulverizado de fraguar y endurecer en presencia de agua y de formar compuestos estables», mientras que la segunda

---

<sup>5</sup>AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Portland Cement, Philadelphia, ASTM, 1980, 7 p. (Standard ASTM C 150).

<sup>6</sup> Icontec: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

(propiedad puzolánica) se define como la «Aptitud de un material pulverizado de reaccionar químicamente en presencia de agua con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando compuestos que poseen propiedades hidráulicas».

Existen diversas clases de cemento, si bien el más conocido y producido comercialmente en nuestro medio es el Portland.

Entre estos se pueden citar:

«- Cemento Portland: Producto que se obtiene por la pulverización del clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker.»

«- Cemento Portland puzolánico: Producto que se obtiene por la pulverización conjunta de clinker Portland y puzolana o de una mezcla íntima y uniforme de cemento portland y puzolana finamente pulverizada con adición de una o más formas de sulfato de calcio. El contenido de puzolana debe estar comprendido entre el 25% y el 50% en masa total.»

«- Cemento Portland con adiciones: Producto que se obtiene por la pulverización conjunta de clinker Portland y otros materiales, con adición de una o más formas de sulfato de calcio. El contenido de otros materiales debe estar comprendido entre el 15% y el 30% en masa de la masa total.»

«- Cemento Portland de escoria de alto horno: Producto que se obtiene por la pulverización conjunta de clinker Portland y escoria granulada de alto horno o de mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y escoria granulada finamente

dividida con adición de una o más formas de sulfato de calcio. El contenido de escoria granulada de alto horno debe estar comprendido entre el 15% y el 85% en masa de la masa total.»

«- Cemento siderúrgico supersulfatado: Producto que se obtiene por la pulverización conjunta de escoria de alto horno con pequeñas cantidades de clinker Portland, cemento Portland y cal hidratada con una combinación de estos materiales y cantidades apreciables de sulfato de calcio. El contenido de escoria de alto horno deber ser superior al 70% en masa de la masa total.»

Dentro del cemento Portland existen cinco (5) tipos de cemento, que se diferencian básicamente por la proporción de compuestos presentes en ellos, la que a su vez le imprime ciertas características a cada tipo de cemento Portland, a saber. Dado que las materias primas para la fabricación del cemento son básicamente cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, el clinker Portland estará formado básicamente por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos.

Se establece una composición potencial del cemento, dado que estos compuestos no se encuentran realmente aislados, basada en fórmulas desarrolladas por el químico francés R.H. Bogue y que se fundamentan en el contenido de óxidos del cemento. Es importante anotar que las fórmulas de Bogue fueron desarrolladas para cemento Portland sin ningún tipo de adiciones distintas al yeso que actuarían como regulador del fraguado, por lo cual no son aplicables a cementos con algún tipo de adición, cementos que actualmente son los de producción corriente. En la tabla 2 se muestra la composición potencial para diferenciar tipos de cemento portland, como también un análisis característico de óxidos en un cemento típico:

**Tabla 2. Composición para cementos tipo Portland<sup>7</sup>.**

% del compuesto	Tipo de Cemento				
	I	II	III	IV	V
C3S	48	40	62	25	38
C2S	27	35	13	50	37
C3A	12	5	9	5	4
C4AF	8	13	8	12	9

Características de los compuestos existentes: el cemento posee una serie de características propias, que le imprimen un determinado comportamiento al cemento dependiendo de la proporción en la cual estén presentes. En la práctica resulta en una situación de compromiso dependiendo de las características que desee potenciar. Las características principales de cada uno de los compuestos son:

### **Silicato Tricálcico ( $C_3 S$ )**

Es el compuesto con mayor actividad del clinker. Es el responsable de las resistencias iniciales elevadas, pero también es elevado su calor de hidratación. Aparece en elevada proporción en cemento de endurecimiento rápido y de altas resistencias iniciales.

### **Silicato Bicálcico ( $C_2 S$ )**

Es el compuesto responsable de las resistencias a largo plazo, pero también es bajo su calor de hidratación. Es lento su endurecimiento y tiene un mejor comportamiento frente al ataque químico que el Silicato tricálcico, por lo cual aparece en mayor proporción en los cementos de buen comportamiento frente a sulfatos.

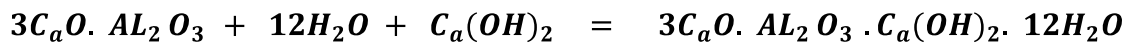
---

<sup>7</sup> Tomada: JOSE GABRIEL GOMEZ CORTES, "Tecnología del Concreto" En: Colombia 1988 pag:42

### **Aluminato Tricálcico ( $C_3 A$ )**

Presenta una elevada velocidad de fraguado, un calor de hidratación muy grande y gobierna junto con el  $C_3S$  la resistencia a corto plazo. Tiene buen comportamiento frente al agua de mar, pero muy pobre frente a los sulfatos. La razón de añadir un regulador de fraguado (yeso) al clinker es para moderar la velocidad de reacción de este compuesto; el mecanismo de este proceso es el siguiente:

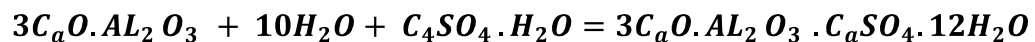
#### **Ecuación 1.**



(Aluminato agua hidróxido tricálcico) de calcio (Aluminato tetracálcico hidratado)

Simultáneamente el yeso reacciona con el  $C_3A$ , así:

#### **Ecuación 2.**



(Aluminato agua yeso tricalcico)

(Sulfoaluminato de calcio Ettringita)

El sulfoaluminato de calcio rodea al  $C_3A$ , retardando la reacción. Esta continúa lentamente rompiendo el recubrimiento.

### **Ferro aluminato tetracálcico. ( $C_4 AF$ )**

Su presencia en el cemento se debe a la necesidad que existe en su proceso de producción de utilizar fundentes que contengan hierro. Prácticamente no aporta nada a las resistencias mecánicas presentando un bajo calor de hidratación y alta

velocidad de fraguado. Tiene un buen comportamiento frente a los agentes agresivos y su color oscuro puede resultar indeseable para ciertos cementos.

Las propiedades ingenieriles del hormigón relacionadas con la resistencia, endurecimiento y estabilidad dimensional dependen principalmente de los silicatos, bicálcicos y tricálcicos. Al reaccionar ellos con el agua forman dos compuestos hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado, frecuentemente llamados «gel de Tobermorita<sup>8</sup>». En un cemento totalmente hidratado la proporción de gel de Tobermorita es del 50% en peso y la de hidróxido de calcio alrededor del 25% en peso. Sobre esta parte de hidróxido de calcio será sobre la cual actuarán la adición (puzolanas, escorias, etc) fijándola y mejorando entonces sus resistencias mecánicas y durabilidad. El gel tiene una estructura coherente y muy finamente dividida. Esta gran superficie específica ( $3000.000 \text{ cm}^2/g$ ) de la Tobermorita es la que suministra las fuerzas de atracción superficial que ocasionan gran adherencia de las partículas.

### **Composición de óxidos**

Una manera de expresar la composición química del cemento es mediante lo que se denomina análisis por óxidos. En la Tabla 3 Se muestran tres comparaciones citadas por diversos autores:

---

<sup>8</sup> Gel SCH: Silicato de calcio hidratado o gel de cemento

**Tabla 3. Análisis por óxidos (según diversos autores)<sup>9</sup>.**

	Sandino (Ref 2.7) %	Calleja (Ref 2.5) %	Sánchez (Ref 2.8) %
Cal combinadas CaO	63.0	62.5	62.0
Sílice SiO <sub>2</sub> 22.0	21.0	21.0	—
Alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6.0	6.5	4.5	—
Oxido férrico Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5	2.5	3.5
Trióxido de azufre SO <sub>3</sub>	2.9	2.0	2.0
Oxido Magnésico MgO	2.5	2.0	1.0
Alcali Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O0.6	0.5	0.5	—
Pérdida al fuego PF	—	2.0	3.0
Residuo insoluble RI	—	1.0	1.5

Estos óxidos le imprimen ciertas características al cemento. Dentro de las más importantes se pueden citar:

### **Oxido de Magnesio (MgO)**

Durante el proceso de fabricación del cemento el enfriamiento del clinker debe ser relativamente rápido para que el magnesio presente quede en estado vítreo (cristales en desorden), pues en caso contrario queda cristalino.

### **Trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>)**

Su presencia se debe a la adición del regulador de fraguado (yeso) durante la molienda, si bien puede provenir del combustible usado en el horno. Si el contenido es elevado se puede producir el fenómeno del falso fraguado, que consiste en un endurecimiento súbito del material, debido a la hidratación total del yeso semi hidratado. Este fenómeno es reversible si se ejerce una acción mecánica (remezclado) y que la distingue del fraguado instantáneo, proceso en la cual la acción mecánica no surte ningún efecto.

---

<sup>9</sup> Tomada: JOSE GABRIEL GOMEZ CORTES, "Tecnología del Concreto" En: Colombia 1988 pag:44

### **Álcalis ( $N_aO + K_2$ )**

Su presencia proviene generalmente de las materias primas empleadas en la fabricación del cemento y es indeseable porque puede reaccionar con ciertos agregados (rocas conteniendo sílice realmente reactiva o ciertos tipos de carbonatos) presentando fenómenos expansivos a largo plazo, en lo que se denomina «reactividad álcali-agregado».

### **Callibre (CaO)**

Si el contenido de cal libre en el cemento es alto (del orden del 2% o más), una parte de ellas se hidrata durante el endurecimiento del mismo a edades tardías, produciendo fenómenos expansivos.

### **Pérdida al fuego (PF)**

Esta determinación, que consiste en evaluar la pérdida de peso de una determinada cantidad de cemento (1gr) al ser sometida a una temperatura de 95°C, es un índice de la presencia de adiciones de naturaleza caliza. Si el cemento ha sido mal almacenado, durante un período prolongado, la pérdida al fuego puede provenir del agua o CO<sub>2</sub> fijados por el cemento constituyendo entonces la prueba a una medida de la meteorización del cemento.

### **Residuo insoluble (RI)**

Este ensayo consiste en determinar el peso del residuo que queda después de someter la muestra de cemento a la acción del ácido clorhídrico, es un índice de la presencia de adiciones de naturaleza inertes las cuales no aportan poder conglomerante al cemento. El Icontec en la NTC321 «Cemento Portland.

Especificaciones Químicas»<sup>10</sup> fija los siguientes contenidos máximos y mínimos que deben cumplir los cementos Portland, los cuales se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Especificaciones Químicas<sup>11</sup>.**

	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4a	Tipo 5a
Dióxido de sílice SiO <sub>2</sub> , mínimo %	-	-	21.0	-	-	-
Oxido de aluminio Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , máximo %	-	-	6.0	-	-	-
Oxido de hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , máximo %	-	-	6.0	-	6.5	-
Oxido de magnesio MgO, máximo %	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Trióxido de azufre SO <sub>3</sub> , máximo %	3.5	3.5	-	4.5	-	-
Pérdida de fuego máximo %	-	5.0	4.0	4.0	3.5	4.0
Silicio tricálcico 3CaOSiO <sub>2</sub> , máx %	-	-	-	-	35.0	-
Silicato bicálcico 2CaOSiO <sub>2</sub> , mín %	-	-	-	-	40.0	-
Aluminato tricálcico 3CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , máx %	-	-	8.0	15.0b	7.0	5.0

### Notas

Se hace notar que los cementos que se adaptan a los requisitos de los tipos 4 y 5 no se tienen generalmente en almacenamiento. Antes de especificar su uso, los compradores o sus representantes determinarán si esos tipos de cemento se encuentran disponibles.

Cuando se requiere una resistencia moderada a los sulfatos para el cemento tipo 3, el aluminato tricálcico debe limitarse al 8%. Cuando se requiera una alta resistencia a los sulfatos el aluminato tricálcico debe limitarse al 5%.

<sup>10</sup> NTC: Norma Técnica Colombiana

<sup>11</sup> Tomada: JOSE GABRIEL GOMEZ CORTES, "Tecnología del Concreto" En: Colombia 1988 pag:45

### 2.3.2 Cementos con Adiciones

Los cementos con adiciones han venido ganando cada vez más terreno dentro de la tecnología del hormigón. De hecho el futuro apunta a que remplazarán casi en su totalidad a los cementos «normales» o Portland, puesto que presentan una serie importante de ventajas sobre ellos. A pesar de que en nuestro medio se emplea el término cemento Portland, la verdad es que la mayoría de ellos contienen adiciones de naturaleza diferente, con miras a aprovechar las ventajas que suministran dichas adiciones, tanto para el fabricante como para el consumidor. De acuerdo con la definición adoptada por el Icontec<sup>12</sup>, el cemento Portland adicionado es el «producto que se obtiene de la pulverización conjunta del clinker Portland y otros materiales arcillosos, calcáreos, sílico-aluminosos, calcinados o no calcinados, que poseen propiedades hidráulicas o puzolánicas».

Se suele confundir o emplear indistintamente el término «puzolana» como adición al cemento. Como se verá más adelante, puzolana es una de las posibles adiciones que pueden agregarse al cemento y la «propiedad puzolánica» es realmente una propiedad que debe ser inherente a una adición para que pueda considerarse activa. En otras palabras, a pesar que la adición puede ser activa o inerte, cuando se habla de adición generalmente se está pensando en una adición activa.

La actividad puzolánica o propiedad puzolánica consiste en la capacidad de la adición para combinarse con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del Clinker de cemento Portland, formando compuestos que son también cementantes. Aquí radica entonces una de sus principales características: una adición (o puzolana entendiendo el término como general) necesita de la presencia del hidróxido de calcio (es decir de Clinker de cemento hidratado) para desarrollar sus propiedades cementantes; por sí sola no puede desarrollar esa

---

<sup>12</sup> Icontec: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

actividad puzolánica o lo hará a unas velocidades irrelevantes desde el punto de vista práctico. La mayoría tienen como característica de un alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y una estructura interna vítrea amorfa (cristales en desorden, en contraste con la cristalina donde los cristales se encuentran en orden), como también estar finamente molidos, lo que les confiere una gran superficie específica.

El término puzolana viene de la población Puzzoli (Italia) donde se halla un depósito de cemento natural, lo que le confirió gran ventaja a las construcciones romanas, que contaban con un material ligante de gran calidad, como se comprueba con el paso del tiempo (ej. El muelle de Anzio) de enorme durabilidad. Es más, griegos y romanos fueron de los primeros en emplear la cal, a la que añadieron por casualidad agregados de origen volcánico, con lo que crearon ellos mismos cementos naturales puzolánicos o con adiciones. Este hecho ha dado origen a otra definición de puzolana: «Materia esencialmente silicosa que finamente dividida no posee alguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice - alúmina) capaces, a la temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas<sup>13</sup>».

Conocida entonces la acción y las ventajas de estas adiciones, una vez que se desarrolló la moderna tecnología del cemento Portland (John Smeaton en Inglaterra 1756 y luego Joseph Apsdinen Inglaterra en 1824) se pensó en combinar los dos materiales, experimentando con adiciones de diversa procedencia, en cuantías diferentes y con procedimientos de mezcla disímiles. Nació entonces el «Trass» en Alemania y Rusia, la «Tierra de Santorin» en Grecia, la «Puzolana» en Italia y España, el «Gaize» en Francia, «Moler» en Dinamarca, el «Kieselghuhr» en otros países europeos y el «Surki» indio o egipcio.

---

<sup>13</sup>Calleja, J., "Las Puzolanas", Separata de la Revista ION Vols. XXIX y XXX, Madrid, 1968.

## Clasificación

Las adiciones han sido clasificadas de diversas maneras, según el autor y el criterio con el que se juzgan. Una de las más conocidas es la de F. Massazza (Italia)<sup>14</sup> la cual clasifica las puzolanas así:

- Puzolanas naturales: Rocas Piroclásticas, Materiales de origen mixto (alterados), Rocas clásticas.
- Puzolanas artificiales: Cenizas volante, Humo de sílice, Esquistos calcinados, Biosílice, Materiales activados químicamente, Arcilla calcinadas.
- Las escorias son consideradas, junto con las puzolanas, como un tipo de conglomerante hidráulico. A su vez la A.S.T.M.<sup>15</sup> clasifica las cenizas volantes en dos grupos, basada en el contenido total de cal.

Más recientemente Kumar Mehta (U.S.A.) presentó una nueva clasificación de las adiciones que fue adoptado por el Comité Técnico de la RILEM<sup>16</sup>.

---

<sup>14</sup>Massazza, F. "Structure of pozzolana and fly-ash and the hydration of pozzolanica and fly-ash cements".

<sup>15</sup> A.S.T.M: American Society for Testing and Materials.

<sup>16</sup>RILEM: Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayos de Materiales

**Tabla 5. Clasificación de las adiciones<sup>17</sup>.**

TIPO	CLASIFICACION	COMPOSICION QUIMICA Y MINERALOGICA
I	Cementantes	Principalmente cristales de silicatos conteniendo calcio, magnesio y aluminio.
II	Cementantes y Puzolánicas (ceniza volante con alto contenido de Ca) (> 10% CaO) (C)	Principalmente cristales de silicatos conteniendo calcio, magnesio y aluminio. Puede estar presente cal libre y periclasa. Carbón sin quemar usualmente < 2 %.
III	a. Humo de sílice (Silica Fume) b. Ceniza de cascarilla de arroz (R.H.A) con quemado controlado	Esencialmente sílice en forma no cristalina Esencialmente sílice en no cristalina
IV	Puzolanas normales (ceniza volante con bajo contenido de Ca) (< 10% CaO) (F)	Principalmente cristales de silicatos conteniendo hierro y aluminio. Carbón sin quemar usualmente 65%, pero en ocasiones > 10%.
V	Otros a. Escoria de alto horno enfriada lentamente b. Ceniza del fondo de caldera (R.H.A) quemada sin control.	Principalmente minerales de silicato cristalino y pequeñas cantidades de material cristalino (Amorfo)

Desde otro punto de vista el Icontec define varios tipos de cementos con adiciones activas, entre ellos el Portland de escoria de alto horno y el Portland puzolánico. El primero es definido como el cemento que se obtiene mediante la pulverización conjunta de Clinker Portland y escoria granulada finamente molida, con adición de sulfato de calcio (yeso). El segundo es definido como el cemento que se obtiene mediante la pulverización conjunta de Clinker Portland y puzolana, o de una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y puzolana finamente pulverizado, con adición de sulfato de calcio.

## Reacción

Como se ha mencionado, las adiciones usualmente requieren la presencia de

<sup>17</sup> Clasificaciones de las adiciones según Kumar Mehta ACI (American Concrete Institute)

hidróxido de calcio, obtenido por la hidratación del Clinker de cemento Portland, para empezar a desarrollar sus propiedades. La reactividad de las adiciones es lenta puesto que el mecanismo de hidratación de ellos es por difusión. En él juega un papel importante la finura de molido del cemento y la puzolana: cuanto más grueso sea el tamaño del grano, más lenta será la reacción y la ganancia de resistencia. Por ejemplo, el humo de sílice que es de las adición es la más fina(0.1-0.3 micrones) contribuye a las resistencias después del primer día, mientras que la escoria de horno que es la más gruesa (10-20 micrones) contribuye después de tres días y algunas cenizas volantes comienzan a actuar después de 7 ó 14 días.

En el comportamiento de las adiciones es también importante la estructura (debe ser vítrea o en desorden, lo que se denominan o cristalina, en contraste con la cristalina que es ordenada). Puesto que la forma de los capilares en el hormigón y su tamaño dependen en gran medida de la adición, una modificación en su microestructura modificará esa capilaridad y consecuentemente su impermeabilidad y durabilidad.

Para valorar la reacción de las adiciones es deseable hacer pruebas sobre concreto hecho con cemento adicionado, ya que las solas pruebas sobre las adiciones o sobre el cemento no son representativas del comportamiento real. Los efectos químicos relacionados con las reacciones de hidratación de adiciones y cementos adicionados son muy importantes en la determinación de las propiedades ingenieriles finales del concreto. En contravía con lo que piensa mucha gente, incluso algunos investigadores, los efectos químicos son muy importantes y una prueba de ello es que existen numerosos resultados que muestran el comportamiento diferente de hormigones idénticos en composición y mezclado, pero que han sido sometidos a ambientes de curado diferente: un aumento en la temperatura de curado causa un aumento en resistencia de cementos adicionados. En otras palabras, los cementos adicionados y los

hormigones hechos con esos cementos son más exigentes en su proceso de curado y este proceso involucra no solo la obtención de un buen curado, sino la temperatura, humedad relativa y composición de la fase líquida en el hormigón.

### **Ventajas de las adiciones**

Básicamente las ventajas que los cementos adicionados presentan, se puede resumir así:

Representan una economía importante en la producción del cemento, puesto que representan ahorro de combustible y generalmente son subproductos industriales, con poco o ningún costo de obtención. Existe un sobre costo mínimo, comparando con el cemento sin adiciones, al tener que ser más finamente molidos (mayor tiempo de molienda) para cumplir con requisitos mínimos de resistencia.

Mejoran una cantidad importante de propiedades en hormigones hechos con esos cementos. Se destacan especialmente la mejoría en la durabilidad, menor calor de hidratación liberado, menor tendencia a la exudación y sangrado, y mayores resistencias mecánicas a largo plazo (más allá de 28 días).

Representan un beneficio ecológico importante puesto que emplean subproductos industriales que no son usados y en cambio generan contaminación del aire, el agua y el suelo. Mediante la realización de «perfiles ecológicos<sup>18</sup>» de varios materiales de construcción, los cuales toman en cuenta parámetros como la deforestación necesaria para producirlos, la contaminación causada y las emisiones de SO<sub>2</sub>, algunos autores recientemente han concluido que el concreto reforzado y más a un el concreto reforzado hecho con cemento con adiciones es

---

<sup>18</sup> Perfil Geológico: es la reconstrucción en profundidad de la estructura geológica de una zona

el material de construcción más ecológico.

### **Propiedades del hormigón modificadas**

Como se ha mencionado previamente, son varias las propiedades del cemento adicionado y del hormigón hecho con cemento adicionado que se modifican con su presencia, por fortuna en la mayoría de ellas en aspecto favorable.

### **Durabilidad**

La durabilidad del hormigón depende básicamente de su permeabilidad y de la presencia de agentes agresivos, especialmente aquellos disueltos en el agua. También son fuente de alta permeabilidad el micro agrietamiento y agrietamiento que puede ser producido por acciones de retracción de secado, esfuerzos excesivos o expansión de productos de reacciones químicas entre los poros.

### **Permeabilidad**

Medir la permeabilidad de un hormigón no es tarea fácil, entre otros aspectos por la dificultad de asegurar un estado de flujo permanente.

En cualquier caso es reconocida la bondad de las adiciones en general para disminuir la permeabilidad del hormigón. Existen estudios sobre tuberías de concreto hechas con cemento que contenía entre 30% y 50% de ceniza volante reemplazando al cemento y que demostraron ser del orden de 5 veces más impermeables que aquellas hechas con cemento sin adiciones. Otros estudios sobre morteros hechos con cemento con y sin adiciones de escoria mostraron un coeficiente de difusión entre 10 y 100 veces menor que con escoria a diferencia de los de cemento Portland.

El humo de sílice, cuya actividad puzolánica es muy alta comparada con la de escoria o ceniza volante, disminuye grandemente la permeabilidad del hormigón. Se dieron casos en la que esa permeabilidad en hormigones conteniendo solamente 100Kg/m<sup>3</sup> de cemento y 20% de humo de sílice fue similar a la de un hormigón conteniendo 250Kg/m<sup>3</sup> de cemento, sin ninguna adición de humo de sílice. Existe evidencia de que para altos contenidos de cemento la efectividad del humo de sílice para reducirla permeabilidad se ve disminuida.

### **Ataque a sulfatos**

Parece ser que las cenizas volantes con bajo contenido de calcio mejoran la resistencia al hormigón a las aguas sulfatadas, mientras que aquellos que tienen alto contenido de calcio la disminuyen. Otros investigadores mencionan que más que el calcio, es la alúmina reactiva aportada por la ceniza volante la que controla la presencia de minerales altamente sensibles al ataque de los sulfatos.

Las escorias, al disminuirla permeabilidad, también mejoran el comportamiento del hormigón al ataque de sulfatos. Estudios hechos por Douglas y citados por Mehta mostraron que los hormigones hechos, uno con cemento Portland tipo I (50%) y escoria (50%) y otro con tipo V (resistente a los sulfatos) presentaban una resistencia similar al ataque de sulfatos. No obstante, algunos autores llaman la atención sobre el hecho de que, con bajos remplazos de cemento por escoria, el contenido de alúmina de la escoria puede actuar adversamente sobre la resistencia a los sulfatos de ese cemento.

El humo de sílice, al ser tan efectivo en reducir la permeabilidad del hormigón, lo hace altamente resistente a ataques químicos, incluido el de los sulfatos y aún el de ácidos diluidos.

## **Corrosión de acero de refuerzo**

Cuando el agua de mezcla actúa sobre el acero de refuerzo, se forma una película delgada de óxido de hierro, que dificulta la acción del oxígeno (y por lo tanto de mayor corrosión) y que se denomina «capa de pasivación». La de pasivación no rotura de esa capa puede ocurrir cuando hay presencia de cloruros en el material, o cuando disminuye el pH del mismo (ej. Menos de 11) por ataque de ácidos o por carbonatación (formación de carbonato de calcio producto de reacción del CO<sub>2</sub> atmosférico e hidróxido de calcio del hormigón). Una vez que se ha roto la capa de pasivación, el progreso de la corrosión del acero está controlado por el flujo de humedad y el flujo de oxígeno en el acero y por la resistividad eléctrica del hormigón.

La permeabilidad del hormigón es la más importante, pues a su vez controla las tasas de flujo de oxígeno, humedad, carbonatación y penetración de cloruros. En ese sentido las adiciones actúan favorablemente puesto que disminuyen la permeabilidad. Además, hormigones hechos con cementos adicionados contiene menor hidróxido de calcio lo cual disminuye la cantidad de carbonatación. Se ha concluido que los hormigones hechos con cemento adicionado con ceniza volante, con una adecuada dosificación y curado, muestran protección similar a la corrosión que hormigones hechos con cemento normales. Hormigones hechos con cementos adicionados con escoria parecen favorecer la carbonatación, es decir la profundidad de ella es mayor. La adición de humo de sílice a los cementos muestra favorecer el aumento de la resistividad eléctrica del hormigón, lo cual tiene un importante efecto en reducir el potencial de corrosión del acero.

## **Reactividad álcali-agregado**

Existe consenso en que la adición de cenizas volantes o escoria disminuye la expansión del hormigón debido a la reactividad álcali-agregado.

En cenizas volantes con bajo contenido de calcio, un reemplazo entre el 25% y 30% de cemento parece ser suficiente para disminuir el peligro de reactividad álcali-agregado. En cenizas con alto contenido de calcio parece ser necesario un reemplazo mayor para lograr un efecto similar. Algunos investigadores afirman que la ceniza volante es más efectiva que la escoria para reducir la expansión por reactividad álcali-agregado. A pesar de existir pocas investigaciones, parece ser que el humo de sílice, como también la ceniza de cascarilla de arroz, disminuye la expansión por reactividad, este proceso de expansión se explica más adelante con el efecto ASR.

### **Abrasión**

La resistencia a la abrasión de un hormigón está muy ligada a las resistencias mecánicas del mismo, ausencia de sangrado, y a unas adecuadas características del agregado. Dado que la resistencia mecánica y la ausencia de sangrado dependen básicamente de la relación agua/cemento y las condiciones de curado, resultan evidentes que una baja relación A/C y unas adecuadas condiciones de curado usualmente presentes en el hormigón con cemento adicionado, favorecerá un mejor comportamiento de éste frente a la abrasión.

No existe mucha información sobre la resistencia a la abrasión de hormigones con cemento adicionados, entre otras cosas porque los ensayos que evalúan esa propiedad no son absolutamente satisfactorios y representativos y se ha concluido en que son necesarias e incluso urgentes nuevas investigaciones para evaluar la resistencia a la abrasión de esos cementos. Hasta ahora las pocas investigaciones de que el autor tiene referencia no muestran diferencias significativas entre uno y otro tipo de cementos.

## Resistencia mecánica

La resistencia última del hormigón y la velocidad a la cual gana esa resistencia tiene mucha relación en hormigones con cementos adicionados tanto con la cantidad como con las características de la adición empleada (tipo de adición, área superficial, tamaño de las partículas, reactividad de la fase vítrea), con la dosificación de la mezcla (tipo y contenido de cemento, relación agua/cemento, presencia de aditivos), y con las condiciones de curado (temperatura ambiente, humedad relativa y clase de agente de curado).

Por su alto contenido de sílice vítrea y alta superficie específica, el humo de sílice y la ceniza de cascarilla de arroz contribuyen a la resistencia del hormigón a edades relativamente tempranas (empiezan a hidratar entre 1 y 3 días y contribuyen a la resistencia en las primeras 2-4 semanas). Las cenizas volantes y las escorias de alto horno tienen un mayor diámetro de partículas y menor superficie específica (empiezan a hidratar después 3 días y empiezan a contribuir a la resistencia en un período 3-14 días y esa contribución es más prolongada). Debido al tamaño de las partículas y al mayor contenido de calcio, cenizas y escorias tienden a tener una tasa de ganancia de resistencia (pendiente curva resistencia vs. tiempo) mayor que los cementos normales.

En el caso de ceniza volante y escoria de alto horno, las resistencias mecánicas a cortas edades son menores, debido a la lentitud con que estas adiciones fijan el hidróxido de calcio, pero las resistencias a edades mayores son más altas con respecto a hormigones hechos con cementos normales. Para el humo de sílice la resistencia a todas las edades aumenta respecto al cemento no adicionado. Este aumento no es tan significativo para relaciones A/C altas (0.6) pero sí es importante para relaciones A/C bajas (0.4).

Una alternativa interesante consiste en combinar el uso de las escorias o ceniza

volante con humo de sílice, con lo cual el efecto de menores resistencias iniciales de aquellas se ve compensado con el de mayores resistencias del humo de sílice. Investigaciones que demostraron que comparando la resistencia de hormigones con cemento normal, cemento adicionado con ceniza volante (70% de cemento 30% de ceniza) y cemento adicionado con ceniza volante y humo de sílice (10-20% de humo de sílice en adición a la ceniza), la resistencia a 7 días de las mezclas de ceniza y humo de sílice fue casi el doble de las mezclas hechas con cemento con adición sólo de ceniza. En otras palabras, la combinación de humo de sílice y escoria de alto horno o puzolanas hacen que, a edades entre 7-28 días, la pérdida de resistencia a la compresión imputable a la incorporación de un 30% de adición sea totalmente compensado por la adición de un 10% de humo de sílice.

### **Trabajabilidad**

La trabajabilidad de una mezcla esta ligada con el grado de fricción entre las partículas del agregado y ésta a su vez con el contenido de pasta de la mezcla, puesto que la lubricación es el principal papel de la pasta en el hormigón en estado fresco.

La presencia de la adición en reemplazo del cemento resulta en un aumento en el volumen de la pasta puesto que la densidad de las adiciones es menor que la del cemento Portland. De otro lado, casi todas las adiciones presentan partículas de tamaño más fino que las del cemento. Esto resulta favorable pues disminuye la tendencia al sangrado del hormigón, puesto que reduce el diámetro de capilares y por tanto el flujo de agua con cemento en ascenso a la superficie libre.

Finalmente, parece existir evidencias de la capacidad de adiciones para actuar como dispersante de las partículas de cementos floculados (grumos) en la pasta de cemento fresca, con la cual se mejora la trabajabilidad de hormigones hechos

con cementos adicionados.

### **Retracción de secado, módulo de elasticidad y flujo plástico**

Se ha establecido que de una manera directa, la incorporación de adiciones al cemento no afecta las características de retracción de secado, (módulo de elasticidad y flujo plástico).

No obstante, hay que tener en cuenta que las adiciones pueden modifica el contenido de pasta y por tanto del agregado (relación vol. Agregado / vol. hormigón), la relación agua / cemento la resistencia mecánica, las cuales si tienen repercusión en estas propiedades, como también una necesidad de curado más adecuado. En general, cuando disminuyen las resistencias mecánicas, disminuye el módulo de elasticidad y aumenta la retracción de secado y el flujo plástico, si bien la excepción a este aserto lo es el hormigón de alta resistencia.

Se ha establecido que los hormigones con cementos adicionados con cenizas volante presentan mayor deformación por el flujo plástico a edades tempranas pero menores a edades tardías. Para adiciones hasta el 20% de ceniza las diferencias no son muy marcadas, pero si lo son para remplazos entre 30-50% de ceniza.

El comportamiento desde el punto de vista de retracción de secado es similar al del flujo plástico. Estudios realizados muestran que la adición hasta el 25% de ceniza volante no tiene efecto significativo en la variación de retracción de secado, pero reemplazos de un 50% mostraron un aumento importante de los valores de retracción de secado. No existen en cambio muchos datos sobre cambios en retracción de secado por el uso de humo de sílice.

## **Especificaciones y métodos de prueba para cementos adicionados<sup>19</sup>**

Como se desprende de la información anteriormente presentada, no todas las especificaciones y métodos de ensayo para cemento Portland son apropiados e igualmente aplicables a cementos con adiciones. Incluso los países que poseen especificaciones y métodos de ensayo de prueba para adiciones y cementos adicionados muestran no estar satisfechos con los estándares para ceniza volante y escorias (solo Canadá y Noruega tiene especificaciones para el humo de sílice). La razón principal para esta insatisfacción es que existen muchas prescripciones para requisitos físicos y químicos las cuales no parecen servir tanto a los intereses de los productores como los consumidores de las adiciones minerales. Por lo tanto sólo algunos requisitos cuidadosamente seleccionados deben ser exigidos para lograr los propósitos de aseguramiento de uniformidad, calidad y nivel deseado de comportamiento del material. Independientemente del tipo o fuente de adición, parece que únicamente la pérdida al fuego, finura e índice de actividad con cemento Portland son las características del material que justifican una prueba prescriptiva y de control y en aras de la simplicidad sería deseable que existieran estándares generales que cubrieran todas las adiciones minerales.

Es indudable que los cementos adicionados serán más ampliamente usados en el futuro y prácticamente remplazarán a los cementos normales. La cantidad de adiciones empleada también será mayor. Se hará necesario no sólo el estudio del comportamiento de hormigones hechos con esa mayor cantidad de adición, sino también una amplia gama de aditivos (ej. Super plastificantes, incorporadores de aire, acelerantes etc). También sería interesante en nuestro medio estudiar el comportamiento de adiciones autóctonas que son efectivas o prometedoras (ej. La ceniza de cascarilla de arroz, etc.) y definitivamente es necesario impulsar el

---

<sup>19</sup> Fuente: ASTM C1240-05 Especificaciones normalizadas para Humo de Sílice utilizado en mezclas cementicias.

conocimiento y el buen uso de estos cementos que presentan tan atractivas ventajas y relativamente pocas desventajas.

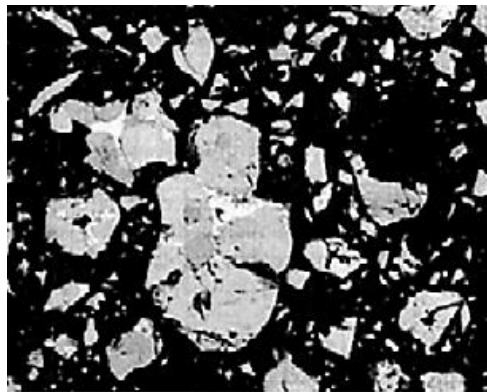
### **2.3.3 Morteros y hormigones a escala nano**

El término “concreto” proviene del latín “concretus” (crecer juntos), este “crecimiento” ocurre en una escala de tiempo de horas y días mediante un proceso de hidratación causada por la suspensión “cemento/agregados”, con el fin de desarrollar, a partir de un fluido viscoelástico y moldeable, un sólido duro y rígido. Importante es destacar, como se vio anteriormente, que el concreto es una mezcla de cemento, arena, agua y agregados pétreos de tamaños superiores a 5 mm, mientras que un mortero se constituye solo de cemento, arena y agua, y a veces una adición de cal para mejorar su retentividad. En ambos casos, el cemento juega un papel esencial pues es el elemento que reacciona con el agua para formar la “pasta de cemento”, un material sólido y fuerte que forma la matriz del concreto y mortero. El concreto es un material poroso, con diferentes tipos de poros, generados por los vacíos de aire que queda atrapado en el proceso de mezclado (situación similar es observada en morteros), estos vacíos pueden ser de gran tamaño, arriba de algunos milímetros de diámetro para los “poros capilares”, los cuales son esencialmente espacios ocupados por agua después del mezclado; hasta poros a escala nanométrica los cuales existen en algunos productos de hidratación generados por la reacción química cemento-agua. A esta nanoescala se produce el proceso de hidratación e interacción entre el calcio y silicatos, cuyo producto es en definitiva el que “pega” las diferentes capas de concreto y mortero y lo convierte en una estructura monolítica; es por ello que se dice que “ambos (concreto y mortero) de alguna manera son materiales a nanoescala”.

Hay principalmente dos modelos microestructurales que han sido desarrollados a escala de la pasta de cemento (micrómetros o menos) y a escala del concreto

(milímetros). Para la pasta de cemento, se usa un modelo celular automatizado, el cual opera mediante una imagen digital tridimensional de partículas de cemento en multifase. La información a partir de las partículas es obtenida mediante un microscopio de barrido y escaneo de neutrones y análisis de Rayos X. La Figura 2 muestra las distribuciones espaciales para: a) el calcio, b) el silicio, c) el aluminio. Se destaca que el aluminio sólo aparece en las capas intersticiales, conectando principalmente los granos de calcio y silicio. Este modelo es válido para cualquier tipo de hidratación de cemento que se desarrolle correctamente. La información de los Rayos X es mostrada en la Figura 1 y es usada para identificar la distribución espacial de los componentes químicos de un cemento estándar a nivel de partículas.

**Figura 1. Imagen del polvo de cemento dispersado en epoxi<sup>20</sup>.**

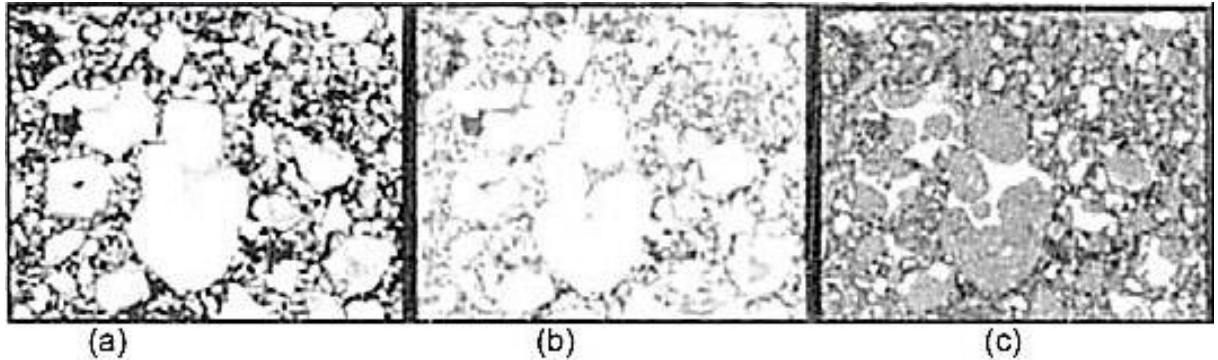


En la figura 1 el tamaño de las partículas ronda los 50  $\mu\text{m}$  de ancho. La naturaleza de multifase de esta mezcla es apreciada de acuerdo a la diferente escala de grises.

---

<sup>20</sup>(“Smart and designer structural material systems”, Ken P. Chong et al, 2002).

**Figura 2. Diferentes imágenes de las mismas partículas de cemento<sup>21</sup>.**



En la figura 2, es interesante notar como los diferentes químicos están ubicados en la microestructura, e incluso en el polvo de cemento: a) imagen del calcio, b) imagen del silicio, c) imagen del aluminio. La escala de grises es más fuerte cuando hay menor cantidad de los elementos de interés presente. El aluminio está ubicado preferentemente en las regiones intersticiales entre los grupos de calcio-silicio.

A escala milimétrica se han usado modelos para predecir de una manera exitosa la difusividad de iones en los espacios porosos del concreto (en este caso). La distribución de los agregados a escala de partículas es obtenida a partir de estos modelos, se puede apreciar de lo anterior que la matriz de pasta de cemento es alterada por la presencia de los agregados, los cuales son generalmente más porosos que la matriz de pasta. Este tipo de modelación usa partículas esféricas, las cuales son adecuadas para algunas propiedades como la “difusión iónica”, donde los agregados tienen cero propiedades al ser comparados con la matriz de pasta de cemento. En este caso se aprecia que las formas hacen muy poca diferencia. Sin embargo, muchas otras propiedades tales como la reología<sup>22</sup> del concreto en estado líquido y la elasticidad en estado sólido tienen una dependencia respecto a la forma de los agregados. A escala nanométrica el concreto ha sido objeto de trabajos de modelación a través de pruebas

<sup>21</sup> (Fuente: “Cap. 22: Nanostructured Materials”, Airat A. Nazarov et al, 2003).

<sup>22</sup>Reología: Ciencia de la deformación y flujo de la materia.

experimentales con bastantes similitudes entre las predicciones de los modelos y los resultados experimentales. Un importante desarrollo en esta área ha sido el uso de técnicas de Dinámica Molecular para analizar la interacción de varios iones con superficies resultantes del proceso de hidratación del cemento. Esta aplicación puede abrir el camino a la escala atómica de manera de comprender y controlar a cabalidad las estructuras de concreto. Al igual que los criterios anteriores, podemos caracterizar al hormigón como un material poroso debido a “burbujas” de aire que son porosidades a escala nanométrica producidas por la reacción química cemento-agua. A partir de estos poros a nanoescala hay un control del producto de la hidratación calcio-silicato-hidratos la cual es el principal pegamento que une al concreto<sup>23</sup>.

#### **2.3.4 Fenómenos durante la fabricación del Mortero y hormigón**

Entre las iniciativas de investigación que están siendo seguidas por la FHWA<sup>24</sup> se encuentra el uso de tecnología nuclear de resonancia para estudiar la hidratación del cemento a nivel de nanoescala. El resultado es una mejor idea de los fenómenos que se dan en la superficie de las partículas del hormigón conduciendo a la mejora en los estándares de la industria y guías para el mezclado y el curado del hormigón. Actualmente se efectúan análisis y mediciones en diversas instituciones a nivel mundial (Universidad de Connecticut, por ejemplo) acerca de cómo el cemento reacciona con el agua a nanoescala; lo anterior con el objeto de lograr la mejor manera de controlar los procesos del cemento. El método utiliza una serie de átomos de nitrógeno los cuales son utilizados para reaccionar con los átomos de hidrógeno ubicados en los granos de cemento, componente fundamental del agua o sus productos de reacción. Los resultados de la prueba son entregados a través de una grafica denominada “perfil de la profundidad del hidrógeno”, la cual muestra la tasa de penetración del agua en el cemento, e

---

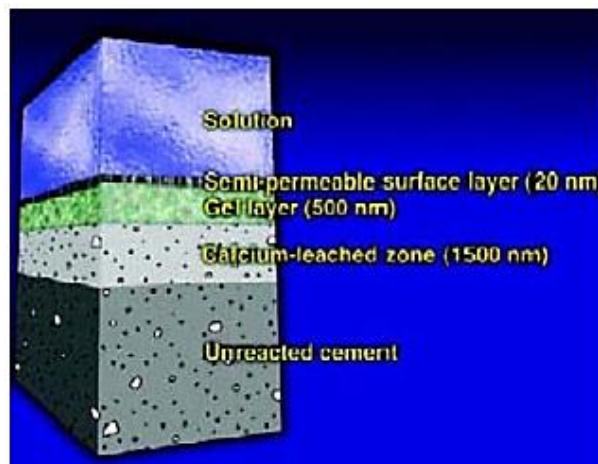
<sup>23</sup> (Chong Ken P. et al, 2002).

<sup>24</sup> Federal Highway Administration's Advanced, USA.

indica el “acomodamiento” de las diversos estratos que se formaron durante la reacción. Una capa de 20 nanómetros de espesor actúa como una barrera semi-permeable que deja ingresar el agua a los granos de cemento. Sin embargo, los iones de silicato de mayor tamaño están ubicados bajo esta capa. A continuación un estrato de gel de silicato se forma bajo el estrato de la superficie, causando un aumento de volumen (“hinchazón”) entre los granos de cemento lo que eventualmente puede conducir a la falla del estrato de la superficie. Esta falla libera el silicato acumulado en la solución circundante, reaccionando con iones de calcio para formar un gel de hidratos de silicio y calcio, el cual une los granos de cemento y comienza a formar el hormigón.

La evolución del “perfil de hidrógeno” muestra el tiempo de falla del estrato superficial. Esta información puede ser usada para estudiar los procesos de formación del hormigón en función del tiempo, temperatura, química del cemento entre otros factores. De esta forma investigadores de la FHWA<sup>25</sup> determinaron que la hidratación del cemento a 30°C provoca la falla en 1.5 horas.

**Figura 3. Capas del hormigón a nanoescala<sup>26</sup>.**



<sup>25</sup> FHWA: Federal Highway Administration.

<sup>26</sup> “Small science will bring big changes to roads”, Tom Kuennen, 2004.

Fenómenos dañinos en el hormigón: Efecto ASR.

La reacción álcali-sílica (ASR)<sup>27</sup> es una reacción química entre los hidróxidos álcali en la solución porosa del hormigón y ciertas fases reactivas del silicio presentes en el interior de los agregados. La reacción genera una serie de características petrográficas en el interior o en las proximidades de las partículas reactivas del agregado, incluyendo al gel Álcali-Calcio-Silicio (Sílica), aumenta de volumen en presencia del agua a través de desarrollo de presiones en los alrededores de la pasta de cemento. Estas presiones son capaces de exceder la resistencia a la tensión de la pasta y los agregados generándose microquebres y causando expansión volumétrica en el hormigón.

Daños a la infraestructura como resultado de la reacción álcali-sílica (ASR) se han conocido actualmente a lo largo del mundo y en diferentes tipos de estructuras de hormigón, incluyendo represas, canales, puentes, pavimentos rígidos y edificios. La reacción ASR produce un deterioro entre silicio y silicatos reactivos presentes en algunos agregados y álcalis ( $K_2O$  y  $Na_2O$ ), quienes están presentes en la solución porosa. El cemento ayudaría a estos álcalis durante los procesos de hidratación o estos pueden permear al hormigón desde su medio circundante; en párrafos precedentes, el resultado de esta reacción el gel álcali-sílica que se cree se expande osmóticamente en presencia de agua.

Respecto a las tensiones que se desarrollan alrededor de la pasta de cemento podemos complementar que debido a la baja capacidad a tensión que posee el hormigón, deformaciones de 0.04%-0.05% o mayores son suficientemente significativas como para fracturar al hormigón o los morteros. De esta manera propiedades materiales significativas en el comportamiento satisfactorio de estructuras en servicio, incluyendo impermeabilidad, resistencia y

---

<sup>27</sup>NizarSmaoui et al, 2004.

rigidez, resultan comprometidas con la expansión de este gel ASR<sup>28</sup>.

En resumen, se requieren tres componentes para producir daño mediante esta reacción: la presencia de suficiente cantidad de álcalis, sílica o silicio reactivo y agua. A continuación se hará una descripción de los fenómenos y actores involucrados en los daños al concreto, además de posibles soluciones.

a) Química coloidal del Gel Reactivo Álcali-Silicato<sup>29</sup>:

El fenómeno ASR ocurre entre álcalis provenientes del cemento y una forma reactiva de sílice proveniente desde “agregados inadecuados”; la reacción entre ambos puede generar el gel Álcali-silicato. Si la humedad es excesiva el gel se expandirá dañando al concreto.

El efecto ASR debilita al concreto al punto que éste se hace muy vulnerable a fuerzas externas; es por este motivo que se ha denominado a este fenómeno como el SIDA del concreto. El trabajo de FHWA (USA) involucra fundamentalmente investigaciones en procesos químicos y físicos en referencia a los daños que el gel ASR puede provocar. El mecanismo de expansión del gel ASR parece involucrar una transformación de fase desde gel amorfo a estructuras en capas, a nanoescala. La investigación incluye la aplicación de la técnica de “barrido de neutrones” y una espectroscopia<sup>30</sup> de “aniquilación de positrones” para medir cambios a escalas nanométricas y menores a ella en la microestructura del gel, como una función de la química, temperatura y humedad relativa.

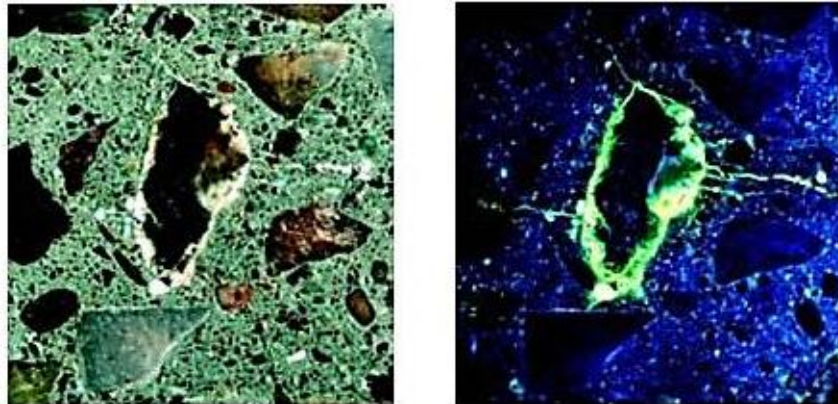
---

<sup>28</sup> K. E. Kurtis, P. J. Monteiro, 2003

<sup>29</sup> Kuennen Tom, 2004.

<sup>30</sup> Espectroscopia: estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o emisión de energía radiante

**Figura 4. Microfotografía de un agregado del hormigón<sup>31</sup>.**



En la Figura 4 (izquierda) se tiene una microfotografía en cuyo centro se aprecia un agregado del hormigón afectado por la reacción álcali-silicato. En la Figura 4. (derecha) se ve una muestra del daño que se produce por la reacción álcali-silicato (ASR). Después de la aplicación de una solución de acetato de uranio, el área dañada por la acción expansiva ASR (gel) se aprecia en color amarillo fluorescente.

**b) Caracterización de la reactividad de cenizas volátiles<sup>32</sup>:**

Esta investigación de la fundación FHWA es una visión fundamental acerca de la interacción entre “cenizas volátiles” producidas y la nanoestructura gel del cemento Pórtland a nanoescala, que afecta la resistencia y durabilidad del concreto incluyendo la reacción ASR. Esto implica el uso de un “barrido de neutrones” a pequeña escala con tal de cuantificar los cambios a escala nano como una función del tiempo y la composición de la ceniza volátil. Un espectroscopio vibratorio esta siendo utilizado para una medición no destructiva del poder reactivo de las cenizas volátiles.

---

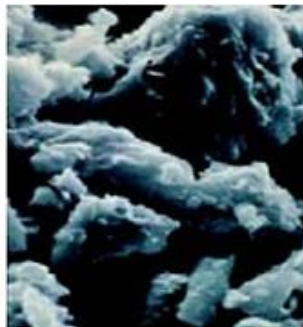
<sup>31</sup>Fuente: “Small science will bring big changes to roads”, Tom Kuennen, 2004.

<sup>32</sup>Fuente: (Kuennen Tom, 2004).

**Figura 5. Interacción a nanoescala entre las cenizas volátiles<sup>33</sup>**



**Figura 6. Granos de cemento Pórtland<sup>34</sup>**



c) Ensayos de potencial ASR en agregados<sup>35</sup>:

El efecto ASR puede ser evitado en el hormigón mediante la adición de agregados NO reactivos. Esta investigación de la FHWA (USA) involucra investigaciones fundamentales en referencia a la formación de geles ASR al reaccionar con distintos tipos de agregados usando resonancia magnética nuclear en estado sólido, con el objeto de medir la formación de cadenas de silicatos a nanoescala.

d) Daño por formación de DEF (Delayed Ettringite Formation)<sup>36</sup>:

La formación de “etringita”<sup>37</sup> se produce, entre muchos otros motivos, por una

---

<sup>33</sup>Fuente: “small science will bring big changes to roads”, Tom Kuennen, 2004.

<sup>34</sup>Fuente: “small science will bring big changes to roads”, Tom Kuennen, 2004.

<sup>35</sup> Fuente:(Kuennen Tom, 2004).

<sup>36</sup> Fuente: (Kuennen Tom, 2004).

<sup>37</sup>Etringita: forma de sulfoaluminato de calcio, se encuentra en cualquier parte de cemento.

reacción interna de componentes del concreto con sulfatos. Investigaciones de la FHWA están explorando las diversas maneras en que la formación de “etringita” daña al hormigón al transformarse desde una condición gel, expandirse y terminar formando cristales a nanoescala. Esta investigación implica la aplicación de radiación sincrotrónica con el fin de estudiar la relación entre la formación de cristales de “etringita” y la expansión del concreto.

**Figura 7. Formación de cristales de etringita en el concreto<sup>38</sup>.**



e) Cinética de la hidratación del cemento<sup>39</sup>:

Este conocimiento es esencial para tener un modelo exacto de la tasa de la reacción del cemento con el agua como función de la temperatura, relación agua/cemento y tamaño de los granos; sin embargo esta información ha sido muy difícil de obtener utilizando métodos analíticos convencionales porque las reacciones tienen lugar en los poros del gel de cemento a escala nano. Pese a lo anterior, los métodos de barrido de neutrones se consideran muy adecuados para medir el movimiento y las reacciones del agua a esta escala; es por esto que los investigadores han estado probando diversas variantes de este método con tal de determinar el efecto de otros factores en la tasa de desarrollo de fracturas del

---

<sup>38</sup> “Small science will bring big changes to roads”, Tom Kuennen, 2004.

<sup>39</sup> (Kuennen Tom, 2004).

cemento a nanoescala.

f) Algunas soluciones<sup>40</sup>:

En la construcción de nuevas estructuras, es posible efectuar mejoras para evitar problemas como los que se han mencionado, partiendo por tomar medidas de tipo menor: esto implica utilizar cementos de bajos álcalis, agregados no reactivos, y reducir la permeabilidad del hormigón a través de adecuadas proporciones de mezcla (incluyendo el uso de materiales puzolánicos), y por supuesto, usando buenas técnicas de construcción.

En algunos casos conseguir un tipo de cemento bajo en álcalis y agregados no reactivos es extremadamente difícil a costos razonables. La necesidad de mecanismos alternativos para evitar los daños que la reacción ASR produce ha sido investigada mediante el uso de distintos aditivos químicos. Se encontraron sales químicas y componentes orgánicos para inhibir la expansión en barras de mortero.

Estas investigaciones iniciales y estudios subsecuentes han mostrado que ciertos químicos incluyendo sales de litio, de calcio y acetona, pueden reducir la expansión causada por la reacción ASR.

Es importante entender cómo el uso de estos químicos (LiCl, CaCl<sub>2</sub> y acetona) afecta la expansión del gel álcali-sílica. Hay mecanismos potenciales de control que incluyen:

- Los aditivos promueven la disolución de silicio inhiben la repolimerización.
- El aditivo interactúa con el silicio disuelto, de forma que genera productos no expansivos o de baja expansión.
- El aditivo interactúa con el producto potencialmente expansivo haciéndolo

---

<sup>40</sup> (Chong Ken P. et al, 2004).

menos expansivo.

- El aditivo interactúa con el silicio disuelto para formar productos que hacen la reacción más lenta (ralentizan el proceso).

El análisis precedente se justifica debido a que la reacción álcali-sílica, ocurre fundamentalmente a nivel manométrico dado el espesor del estrato donde se produce 500nm, capa de gel, siendo muy agresiva al generar microquiebres e hinchazón del hormigón, provocando no sólo disminución en los índices de resistencia del material, sino también fallas muy prematuras.

### **3. NANOTECNOLOGÍA Y SUS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS**

#### **3.1 LA NANOTECNOLOGÍA Y SUS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS EN EL MUNDO DE LA CONSTRUCCIÓN (MORTEROS Y HORMIGONES)**

La nanotecnología ha cambiado y continuara cambiando nuestra visión, expectativas y habilidad para controlar el mundo de los materiales. Estos desarrollos afectarán definitivamente la construcción y los materiales de construcción. Grandes logros recientes incluyen la capacidad de observar la estructura a nivel atómico, medir resistencia y dureza de fases microscópicas y nanoscópicas de materiales compósitos (compuestos).

Logros mas específicos constituyen el descubrimiento de una nanoestructura cristalina altamente ordenada del Gel amorfo C-S-H; desarrollo de pinturas y materiales de terminaciones con propiedades autolimpiantes, resistencia al descoloramiento, protección ante los rayados (graffitis), altas resistencias de uso, tejas autolimpiantes, cristales de ventanas, pinturas y morteros basados en tecnología fotocatalítica, recubrimientos delgados (de espesor nanométrico) para proteger al acero contra la corrosión y aumento del aislamiento térmicos de cristales de ventanas, entre otras novedades.

Nuevos polímeros de nanoingeniería son superplastificantes altamente eficientes para concretos y fibras de alta resistencia con capacidades excepcionales de absorción de energía. Nanopartículas tales como el silicio (sílice) son aditivos efectivos para los polímeros y el concreto, además desarrollos realizados en hormigón de alto desempeño y en hormigón autocompactante muestran mejoras en la trabajabilidad y en la resistencia.

El cemento Pórtland, uno de los artículos de comercio de mayor consumo mundial, es un buen producto, pero al mismo tiempo, no se han explorado completamente su potencial. Una mayor comprensión y precisión en Ingeniería de estructuras extremadamente complejas de materiales basados en el nivel nanométrico, aparentemente resultarán en una nueva generación de hormigones más resistentes y durables, con un comportamiento esfuerzo-deformación ideal y probablemente poseerá un rango de propiedades novedosas tales como la conductividad eléctrica, manejo de temperatura humedad y gran habilidad en la detección de esfuerzos.

Al mismo tiempo este nuevo hormigón deberá ser sustentable y tener una buena relación costo-resistencia como respuesta a las demandas de la sociedad moderna. Nanobinders<sup>41</sup> o materiales de Ingeniería basados en cemento, con componentes cementicios de tamaño nanométrico u otras partículas de esas dimensiones pueden ser el siguiente desarrollo de esta tecnología.

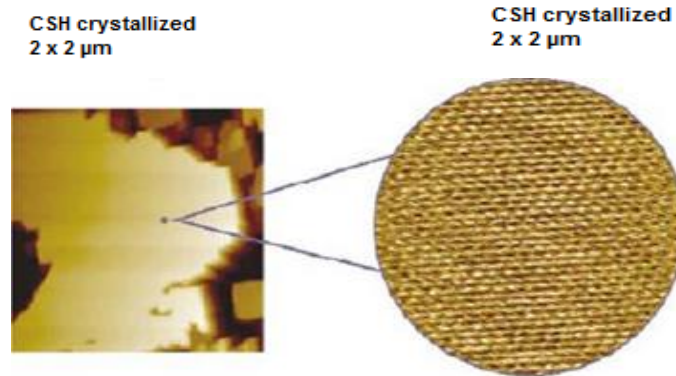
De acuerdo a lo anterior, la mayor parte de las investigaciones en nanotecnología en el sector de la construcción esta enfocada en la estructura de materiales basados en cemento y sus mecanismos de fractura. Nuevos avances en equipamiento hacen posible observar la estructura a nivel atómico. Además es posible efectuar mediciones de resistencia, dureza y otras propiedades básicas. El microscopio de fuerza atómica (AFM)<sup>42</sup> ha sido aplicado en la investigación y caracterización de la estructura del gel amorfo C-S-H. Esto ha llevado a concluir a los investigadores que el producto tiene una estructura altamente ordenada a nanoescala.

---

<sup>41</sup>Nanobinders: Ligantes a escala nano.

<sup>42</sup>Atomic force microscopy.

**Figura 8. Estructura altamente ordenada de Gel C-S-H (Ca/Si = 0.9) vista a nanoescala<sup>43</sup>.**



La comprensión de los procesos a nanoescala ayuda a analizar la influencia de importantes procesos relacionados con la producción y usos de materiales de construcción, incluyendo el desarrollo de resistencias, entendimiento de fracturas, corrosión y diseño de propiedades deseadas. Por ejemplo, se ha desarrollado azulejos autolimpiantes, cristales de ventana y pinturas con tecnología fotocatalítica. Otro aspecto del autolimpiado es entregado por la “hidrorrepelencia” de la superficie. Esto contribuye a eliminar el polvo y la suciedad. Otros ejemplos están relacionados a “cubiertas delgadas” de espesor nanométrico en polímeros conductores que protegen al acero contra la corrosión o cristales de ventana cubiertos con una “nanocapa de plata” invisible que aumenta el aislamiento térmico de los edificios.

La nanoquímica con sus posibilidades de análisis a fondo, entrega nuevos productos que pueden ser aplicados de una manera efectiva en la tecnología del concreto. Un ejemplo es el desarrollo de nuevos “superplastificantes” tales como el “éter policarboxílico” (PCE), un producto que ha sido desarrollado recientemente por Degussa<sup>44</sup>, el cual tiene un acercamiento a un diseño nanométrico que se

<sup>43</sup> “How nanotechnology can change the concrete world, part 2”, Miguel Ferrada et al, 2005.

<sup>44</sup>Degussa: empresa alemana de ámbito internacional de los sectores químico y metalúrgico.

centra en una gran “retentividad” en las mezclas de concreto.

Se ha propuesto que las nanopartículas puedan ser incorporadas en materiales de construcción convencionales. Ellas además poseen propiedades avanzadas o inteligentes necesarias para la construcción en altura, a gran escala o inteligente en el área civil y sistemas de infraestructura. Como ejemplo, nanopartículas de Silicio pueden ser usadas como un aditivo para concreto de alta resistencia o autocompactante, mejorando de una manera ostensible la trabajabilidad y la resistencia. La nanosílica ha mostrado ser un aditivo efectivo para polímeros que mejora la resistencia, flexibilidad y durabilidad.

Algunos investigadores analizaron compósitos de epoxi llenados con partículas de nanosílica obtenidas usando el procedimiento “sol-gel”. Las partículas de sílica uniformemente sintetizadas fueron modificadas sustituyendo los grupos de “silanol”<sup>45</sup> superficiales. Se encontró que las partículas modificadas podían unirse químicamente al matriz epoxi, lo cual resulta en una disminución del coeficiente de expansión termal (CTE) de los compósitos. Cuando se aumenta el contenido de nanosílica, el compuesto exhibe una disminución del CTE, aumento de la temperatura de transición del vidrio y disminución de humedad.

#### Hormigón con nanopartículas

Las propiedades mecánicas de morteros de cemento con “nanooxido de acero” y “nanosílica” fueron analizadas y los resultados experimentales mostraron aumentos en las resistencias a compresión y flexurales de morteros que contienen nanopartículas. Más aun, la resistencia de los morteros de cemento con nanopartículas fue mayor que la resistencia de los morteros con silicio en polvo. Estudios SEM<sup>46</sup> indicaron que el “nanoóxido de acero” y las partículas de

---

<sup>45</sup>Silanol: también conocido como alcohol sililo.

<sup>46</sup>Fuente: SEM scanning electron microscope.

“nanosílica” llenaron los poros y disminuyeron el contenido de hidróxido de calcio dentro de los productos de la hidratación. Son estos los efectos que producen la mejora en las propiedades mecánicas de los morteros de cemento con nanopartículas.

Estudios de laboratorio de grandes volúmenes de “cenizas volátiles” de hormigón de alta resistencia que incorporó nanosílica, fueron realizados por investigadores, estos estudios de los procesos de hidratación confirman que la actividad puzolánica de la ceniza volátil puede ser significativamente mejorada por la aplicación de nanosílica. Se concluyó que el uso de nanosílica llevó a aumentar la resistencia última de altos volúmenes de hormigón a temprana edad. El hormigón desarrollado con nanosílica tiene una resistencia un 81% superior al ser comparado al hormigón normal.

La resistencia del hormigón desarrollado después de dos años fue de 115,9 Mpa (más alta que la resistencia del concreto con cemento Pórtland de referencia que fue de 103,7 Mpa.).

También se han efectuado investigaciones en hormigones autocompactantes con aditivos minerales (caliza molida, cenizas volátiles y cenizas volátiles molidas). La “nanosílica” (5-50 nm.) con una dosis del 1 a 2% con respecto a la cantidad de cemento fue usada como agente modificador de la viscosidad. Una razón constante agua/cemento (A/C) de 0,58 fue usada en todas las mezclas, y un flujo de 780-800 mm fue mantenido ajustando la dosificación de superplastificante basados en polímeros-acrílicos. Para mantener el flujo especificado la dosis de superplastificante fue aumentada 0,21% para cada porcentaje de nanosílica utilizada. La adición de nanosílica hace la mezcla de hormigón más cohesiva y reduce el “sangramiento” y segregación.

Aunque la nanosílica no afecta la resistencia a compresión del hormigón que

contiene varios tipos de “cenizas volátiles”, la resistencia a compresión del hormigón que contiene caliza molida disminuyó ligeramente. El mejor desempeño fue mostrado para el hormigón con cenizas volátiles correspondiente a un 2% de nanosílica y 1,5% de superplastificante. Este concreto tiene una elevada resistencia a la compresión de 55 (MPa.) a una edad de 28 días con un comportamiento deseado en estado fresco, esto es “bajo sangrado”, “buena cohesión”, “buen asentamiento de cono”. La investigación también muestra que la nanosílica no afectó la durabilidad del hormigón.

### **3.2 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA MEJORA Y GENERACIÓN DE OTROS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN**

Sabemos que la nanotecnología se basa en la habilidad de crear y manipular materiales, dispositivos y diversos sistemas a escala nanométrica, esto es la milmillonésima parte de un metro ( $10^{-9}$  (m.)). De allí que los ingenieros, físicos y biólogos hablen de una especie de “alquimia” a escala atómica por los enormes y fantásticos alcances que puede tener esta nueva ciencia. Veamos algunos desarrollos y aplicaciones de la Nanotecnología en algunos materiales:

<sup>47</sup>Nanotubos de Arcilla natural refuerzan compósitos

Natural Nano Inc. es una compañía de desarrollo y licencia de nanomateriales. Desarrollan procesos para extraer, separar y clasificar nanomateriales naturales. El material inicial con el que trabajan está basado en nanotubos naturalmente formados que han sido encontrados en arcilla. Arcilla Aluminosilicato es clasificada como una especie de “material salvador”, pues los compósitos reforzados con nanotubos de arcilla poseen pesos ultralivianos y una altísima resistencia. Son

---

<sup>47</sup> (Cooper Sarah, 2005).

amistosos en términos medioambientales, tienen propiedades térmicas mejoradas y una altísima dureza.

#### Aplicaciones de la Nanotecnología en aditivos y revestimientos

La nanotecnología, además de colaborar en la mejora de diversos materiales y participar en distintos desarrollos, también actúa en el área de los aditivos y diversos materiales de esa índole: pinturas, pegamentos, etc. Que constituyen una innovación en el área de los aditivos para morteros y hormigones, entre otros.

A continuación se presentan los materiales más destacados en este campo:

- <sup>48</sup>PCI-NANOLIGHT: Adhesivo deformable para colocación de todo tipo de cerámica sobre todo tipo de soportes.

Entre sus propiedades más destacadas se encuentran:

- Una combinación única de áridos ligeros y nanotecnología.
- Elevado rendimiento gracias a la combinación de áridos ligeros y aditivos especiales. Consistencia de mortero plástico de fácil trabajabilidad.
- Endurecimiento sin retracción en aplicaciones en espesores de hasta 15 mm. Rápido endurecimiento combinado con un tiempo de trabajabilidad prolongado de hasta 90 minutos.
- Deformable. Absorbe movimientos por cambios de temperaturas o deformaciones del soporte.
- Gran adherencia con cualquier tipo de baldosa cerámica, incluso materiales con poca absorción (gres porcelánico, etc.).

La base del material esta constituida por Cemento, áridos ligeros especiales seleccionados, aditivos y resinas con un tratamiento a nivel nanométrico.

---

<sup>48</sup>Fuente: [www.bettor-mbt.es](http://www.bettor-mbt.es).

Campo de aplicación:

- Para interiores y exteriores.
  - Para paredes y suelos.
  - Para colocación sobre todo tipo de soportes: hormigón, mortero de cemento, hormigón prefabricado, hormigón celular, anhidrita, magnesita, revestimientos cerámicos antiguos, suelos calefactados, cartón-yeso, yeso, asfalto fundido (sólo en interiores), placas aislantes, madera, aglomerado, revoques de yeso, de cemento, de cemento y cal, revestimientos firmes de PVC, etc.
  - Para colocación de todo tipo de baldosas cerámicas: azulejo, gres, gres porcelánico, mosaico vítreo, clínker, etc.
  - Para colocación en capa fina y en capa media.
  - Para mejorar y regularizar soportes irregulares (fábrica de ladrillo, revoques de mortero, etc) antes de la colocación de baldosas.
- 
- PINTURA NANSULATE: Aislación térmica y anticorrosivo líquida

Nansulate es un salto tecnológico revolucionario en la ciencia de las aislaciones térmicas porque es una pintura de aplicación líquida en frío, y en forma simultánea es un revestimiento anticorrosivo de grado industrial de desempeño superior que contiene "Hydro-NM-Oxide"<sup>49</sup>, un producto de la nanotecnología documentado como el mejor material aislante en el planeta con una conductividad térmica de 0.018 (W/mK) a 25°C, que posee propiedades aislantes únicas y sorprendentes que superan todos los métodos de aislación disponibles hasta el momento. A diferencia de otros revestimientos, Nansulate no pierde su valor de aislación debido a la humedad y al polvo.

Algunos de los usos de las pinturas Nansulate son: Tuberías de petróleo, agua, aceites, gas, etc.; tanques, camiones, techos exteriores, techos interiores,

---

<sup>49</sup>Fuente: NASA Jet Propulsion Laboratory en el California Institute of Technology.

paredes, embarcaciones, contenedores, uso a elevadas temperaturas, climas extremos. El funcionamiento es el siguiente: el componente aislante térmico de Nansulatees un material llamado Hydro-NM-Oxide. El pasaje de energía térmica a través de un material aislante es un intento de transferir energía desde moléculas más calientes y que vibran más rápidamente a moléculas más frías y con vibraciones más lentas a fin de alcanzar un equilibrio. Esto sucede de tres maneras: conductividad sólida, conductividad gaseosa y transmisión por radiación (infrarroja).

- Aditivo GleniumSki<sup>50</sup>

Admixture Systems Europa, una unidad de negocios de la organización mundial Degussa Construction Chemicals, ha revelado una revolucionaria nueva línea de producción de aditivos basada en los últimos desarrollos en el campo de la nanotecnología para su uso en la producción de hormigón preparado. Por primera vez, el fabricante de hormigón preparado puede responder a la necesidad que tiene la industria del hormigón de gestionar los dos requisitos opuestos a los que siempre se ha enfrentado: la producción de un hormigón con una baja relación de agua/cemento y que mantenga su retención de docilidad a lo largo de un período prolongado.

La aplicación de la nanotecnología a la ciencia de los aditivos ha permitido que los investigadores, científicos y expertos en hormigón de Degussa Construction Chemicals crearan una nueva familia de super plastificantes Glenium® que cumple los requisitos más recientes de la industria del hormigón preparado: obtención de una reducción muy superior de la relación de agua/cemento al tiempo que se mantiene la retención de la docilidad. Los conocimientos y el apoyo del personal de servicio técnico distribuido por todo el mundo de Degussa Construction Chemicals ayuda a los fabricantes de hormigón preparado a producir

---

<sup>50</sup>Fuente: Revista Cemento Hormigón 2012.

y ofrecer un hormigón con valor añadido, que cumple la especificación de ingeniería desde su producción hasta su aplicación en la obra, garantizando un material de construcción de alta calidad.

El nuevo y revolucionario aditivo Glenium SKY utilizado en el concepto de “Total Performance Control”, produce un hormigón con una elevada reducción de agua, que al tiempo mantiene la consistencia. Gracias a este hormigón controlado y consistente, los usuarios, contratistas e ingenieros de calidad obtienen un material de construcción de uso fácil y seguro, pero que al mismo tiempo desarrolla una resistencia rápida y controlada.

- GAIA Nanosílice.

GAIA Nanosílice es sílice en estado líquido con partículas de tamaño nanométrico. Es sílice hecha gracias a la nanotecnología; reemplaza a la microsílice en polvo en todas sus aplicaciones, y fue creada gracias a una sinergia entre Cognoscible Technologies y Ulmen S.A. El producto está disponible en forma líquida y facilita la distribución satisfactoria de partículas de Nanosílice en el hormigón, combina los efectos de disminución de agua y mejoras en la trabajabilidad.

- DUCTAL<sup>51</sup>.

Se trata de un hormigón armado con fibras metálicas creado y comercializado por la empresa francesa Lafargeeste producto es resistente a todo tipo de agresiones de origen externo, como la abrasión, la carbonatación, la contaminación, la corrosión, los impactos, características que lo hacen comparable al granito. Los agregados presentes en la mezcla son muy finos, lo que permite gran fluidez y manejabilidad. Tiene una resistencia entre seis a ocho veces superior a la del hormigón convencional, posee gran ductilidad, su gran flexibilidad permite que se construyan con él, formas antes impensables como columnas extremadamente esbeltas con gran resistencia. La utilización de este hormigón, además colabora a

---

<sup>51</sup> Fuente: <http://www.ductal-lafarge.com>.

logros estéticos en la obra y es amigable con el ambiente por sus propiedades térmicas ya que una vez puesto en obra contribuyen a la reducción del consumo energético y durante su proceso de fabricación se requieren menos recursos naturales y energía que otros hormigones comunes, lo que se traduce en una menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y menor gasto de energía.

- TX-Active<sup>52</sup>.

Está basado en un principio fotocatalítico que, incorporado al cemento, reduce las sustancias contaminantes presentes en el aire. Tras diez años de investigación. Se trata de un principio fotocatalítico que, utilizado en productos de cemento, tiene la capacidad de reducir el nivel de sustancias contaminantes, orgánicas e inorgánicas, presentes en el aire, además de contar con propiedades autolimpiantes, aportando a la construcción una nueva dimensión, como es la capacidad de descontaminación de las superficies exteriores de los edificios o de los pavimentos.

Los ensayos de validación de este principio activo se han realizado en prestigiosas universidades y centros de investigación europeos, entre los que cabe mencionar la Universidad de Ferrara, CNR-IT, el Centro Común de Investigación de Ispira, la Universidad de Atenas y el Centro Técnico del Grupo Italcementi (CTG). Estos ensayos, llevados a cabo con aplicaciones en emplazamientos urbanos, han demostrado una capacidad para reducir los contaminantes de entre el 20 y el 80%, dependiendo de las condiciones atmosféricas y de radiación solar. De esta manera por ejemplo, si en una ciudad como Madrid se recubriera el 15% de la superficie visible con productos que contengan Tx Active®, se podría reducir la contaminación en un 50%.

---

<sup>52</sup> Fuente: Revista técnica Cemento y hormigón noticias, No.900, 2007.

### 3.3 MATERIALES, ESTRUCTURAS Y DISPOSITIVOS INTELIGENTES GRACIAS A LA NANOTECNOLOGÍA

En los últimos años investigadores de diversas disciplinas han hecho grandes esfuerzos para desarrollar estructuras inteligentes que puedan monitorearse asímismas, detectar fracasos inminentes, además de controlarlos (daños) y adaptarse a los cambios que presente el medio. La aplicación potencial de tales materiales inteligentes es amplia, extendiéndose desde el diseño de dispositivos inteligentes embebidos con fibras ópticas para detectar fallas estructurales, puentes con sensores/actuadores a nanoescala para repeler o aminorar vibraciones violentas, MEMS<sup>53</sup> voladores con control remoto para examinar la estructura y reparar inconvenientes que se presenten en ella, sigilosos vehículos submarinos con músculos natatorios fabricados con polímeros especiales. Para lo anterior se están desarrollando sistemas de infraestructura civil multidisciplinarios (SIC)<sup>54</sup>, en cuyo frente de investigación tenemos científicos de materiales, físicos, químicos, biólogos e ingenieros en diversos campos (mecánicos, eléctricos, civiles, informáticos y aeronáuticos) quienes investigan los beneficios que la nanotecnología presentará en estas diversas áreas.

Las estructuras y materiales inteligentes son generalmente creados a través de síntesis mediante la combinación de sensores, procesadores y actuadores integrados con materiales convencionales estructurales tales como acero, hormigón o compósitos<sup>55</sup>.

Algunas de estas estructuras o materiales están siendo investigadas corrientemente o están en uso:

- Compósitos piezoeléctricos los cuales comúnmente convierten la corriente eléctrica en fuerza mecánica.

---

<sup>53</sup> MEMS: Sistemas Microelectromecánicos.

<sup>54</sup> SIC: Sistemas de Infraestructura Civil.

<sup>55</sup> (Chong Ken P. et al, 2002).

- Aleaciones con memoria de forma, las cuales pueden generar fuerza através de cambios de temperatura en un estado de transición.
- Fluidos electro-reológicos (ER) y magneto-reológicos (MR), los cuales pueden cambiar desde el estado líquido al sólido (o viceversa) en campos eléctricos y magnéticos, respectivamente, alterando dramáticamente las propiedades básicas de los materiales.

Algunos ejemplos de materiales y/o estructuras inteligentes son:

- Las estructuras inteligentes pueden repararse así mismas cuando se quiebran, en función a esto en los últimos años se ha estado desarrollando un tipo de “hormigón autorreparante”. Otra idea en el área del hormigón es ubicar fibras huecas llenas de un material para el sellado de quiebres o microquiebres, embebidas en el hormigón, de tal manera que cuando éste sufra dichos quiebres, las fibras también lo hagan liberando el material sellante. Se han desarrollado también “pinturas inteligentes” las cuales liberan “tintes rojos” cuando se producen quiebres en las estructuras.
- Fibras ópticas que cambian las propiedades de transmisión de luz debido a los esfuerzos son sensores muy útiles; ellos pueden estar embebidos en el hormigón o estar unidos a estructuras existentes.
- También se están desarrollando sistemas de sensores de fibra óptica para monitorear en línea y en tiempo real los componentes críticos de los sistemas estructurales (tales como puentes, etc.) para la detección y cuidado de fallas inminentes en el sistema estructural.
- Investigadores japoneses han desarrollado de manera reciente refuerzos de fibra de carbón y vidrio para el concreto que entregan datos de los esfuerzos mediante mediciones en los cambios de la resistencia eléctrica de las fibras de carbón, todo lo anterior a escala nanométrica.
- Investigadores de la Universidad de California y de Berkeley completaron recientemente su estudio acerca de la aplicación de los Fluidos Electro-Reológicos(ER) para efectuar un control de las vibraciones de una estructura.

Los Fluidos ER se rigidizan muy rápidamente en un campo eléctrico cambiando sus propiedades líquidas y elásticas. Otros investigadores (Universidad de Texas, Virginia Tech, MIT) están estudiando “Aleaciones con memoria de forma”, micro y nanoaleaciones superelásticas de superficie tales como sensores y actuadores, y control de vibraciones del tipo activo-magnetorestrictivo.

- Experimentos fotoelásticos en Virginia Tech. demostraron en una aleación con memoria de forma denominada “Nitinol”<sup>56</sup>, que las fibras pueden ser usadas para disminuir el factor de intensidad del esfuerzo mediante la generación de una fuerza de compresión en la grieta.

### **3.4 NOTICIAS RECIENTES DE NANOTECNOLOGÍA**

En esta sección del trabajo se hará mención a desarrollos nanotecnológicos recientes o novedades en cuanto a la aplicación de la nanociencia en estos días. Actualmente se están develando desarrollos relativos a microestructuras, aplicaciones de nanotubos de carbono, mejora en materiales, además de diversos comunicados referentes a la seguridad de la tecnología a esta escala. Los desarrollos e informaciones actuales de la nanociencia serán mencionados a continuación:

- Desarrollo de Cubierta Nanotecnológica Industrial que previene la corrosión otorgando aislamiento y protección, además de estar diseñada para aplicaciones de alta exigencia; ha sido anunciada por “Industrial Nanotech Inc.”. De manera adicional, las cubiertas no pierden sus valores de aislamiento debido a la humedad o moldeado. El color traslúcido de las cubiertas permite una inspección visual del sustrato, lo cual es crítico para la inspección a equipos requerida en muchas industrias, particularmente la de aceites y combustibles<sup>57</sup>.

---

<sup>56</sup>Nitinol: Aleación entre Níquel y Titanio.

<sup>57</sup> (Zazoff David, 2005).

- Generación de Barras de acero con tecnología a nanoescalaMMFX<sup>58</sup> alcanza resistencias del orden de 100 Ksi ~ 700 Mpa (Faza Salem, 2005). Usos de una nanomatriz en la fabricación de losas. Investigadores del “RensselaerPolytechnicInstitute” en la Universidad de Florida han descubierto una matriz hecha de nanotubos flexibles que no muestra fatiga<sup>59</sup>. En un reporte publicado en la reciente edición de la revista “Science”, los investigadores mostraron que una lámina hecha por nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNTs)<sup>60</sup> puede ser comprimida hasta alcanzar un espesor correspondiente a 1/6 del normal, retornando ésta después a su espesor habitual. Mas aún, una “espuma” de nanotubos recobra su forma mas rápidamente que las convencionales y además no se fractura o colapsa. Los nanotubos de carbón han sido destacados por su resistencia y estabilidad en ambientes agresivos. Combinando estas nuevas aplicaciones podrían desarrollarse una serie de novedosos usos, desde amortiguadores hasta cubiertas absorbentes de energía, para ser utilizadas en actuadores electromecánicos.
- Creación de Nanotubos de carbono “soldados” para construir cables a nanoescala, debido a las inigualables propiedades de los nanotubos que hacen posible el transporte de grandes cantidades de corriente eléctrica sin pérdidas de calor<sup>61</sup>.

Además de los desarrollos anteriores hay una serie de otras investigaciones y/o descubrimientos que están en etapas iniciales de prueba o planificación, abarcando aspectos tales como:

- Nanosensores en pavimentos, para procesos de deterioro y agrietamiento. Así, esta información se puede utilizar para extender la vida de servicio de las vías.

---

<sup>58</sup>MMFX Steel Corporation of America

<sup>59</sup>(Winters Jeffrey, 2006).

<sup>60</sup> MWCNTs Electrochemistry of Multi Wall Carbon nanotubes

<sup>61</sup> (Ganapathiraman, 2006).

- Sensores similares en puentes para monitorear vibraciones y cargas. Estos sensores miden diversas variables tales como: tráfico, viento y cargas sísmicas. Estas mediciones tiene pretensiones tan ambiciosas como generar nuevos parámetros de modelación de estructuras (hacer el análisis estructural mas real).
- Mayor desarrollo de la nanotecnología del concreto para mejorar aún más sus características de resistencia, deformación, resistencia a los ataques químicos, etc.
- Desarrollo de Nanotecnología en acero y otros materiales estructurales, conobjetivos similares al punto anterior.

Otros desarrollos futuros podrían ser:

- Conocimiento de nanopartículas y nanofibras.
- Caracterizaciones nanoestructurales mas específicas.
- Creación de materiales autorreparables y sensores de diversa índole.
- Creación de nuevos nanocompósitos y materiales híbridos.

En relación a nanoproduitos relativos a la ciencia del hormigón podemos esperar los siguientes avances para los próximos años<sup>62</sup>:

- Catalizadores para la síntesis a bajas temperaturas del clínquer y aceleración en la hidratación del cemento convencional.
- Ayudas para el molido ultrafino y la activación mecanoquímica de loscementos.
- Reforzamiento de Binder (carpetas) con nanopartículas, nanorodillos, nanotubos (incluyendo SWNTs), nanomallas y nanoresortes.
- Binders con mejoras/nanoingeniería de las uniones internas entre los productos de hidratación.
- Binders modificados por partículas poliméricas de tamaño nanométrico, emulsiones o nanopartículas poliméricas.

---

<sup>62</sup> (Ferrada et al, 2011).

- Compósitos basados en cemento reforzado con nuevas fibras que contienen nanotubos así como fibras cubiertas por nanocapas (para la mejora de las uniones y la resistencia a la corrosión o introducción de nuevas propiedades, tales como la conducción eléctrica).
- Nueva generación de superplastificantes para un control total de la trabajabilidad y una destacable reducción del agua.
- Materiales basados en cemento con gran resistencia, ductilidad y dureza.
- Binders con suministro controlado interno de humedad para evitar/disminuir el microquebre (microcracking).
- Ecobinders modificados por nanopartículas de producidos con una sustancial disminución del volumen del componente de cemento Pórtland (bajo 10-15%) o binders basados en sistemas alternativos (magnesio, fosfatos, geopolímeros y yeso).
- Materiales autorreparantes y tecnologías de reparación que usan nanotubos y mezclas aditivas químicas.
- Materiales con conductividad eléctrica controlada, propiedades deformativas, no reductoras y de baja expansión térmica.

### **3.5 CONTRASTE ENTRE EL USO DE MATERIALES CORRIENTES Y MATERIALES CON VENTAJAS NANO TECNOLÓGICAS.**

Para comenzar a concluir esta investigación contrastaremos tres materiales desarrollados mediante nanotecnología versus sus contrapartes tradicionales. Lo anterior nos ayudará en las conclusiones posteriores referentes a las ventajas que presenta el uso de la tecnología a escala nano. Es importante destacar que se hizo un énfasis especial en el contraste de Nanosílice y Microsílice, pues la primera constituyó un pilar fundamental en los desarrollos prácticos vistos en el presente trabajo y la segunda constituye uno de los aditivos más comúnmente usados en el área de la construcción de obras civiles.

A continuación el desarrollo de estos planteamientos:

a) Pintura Nansulate v/s aislantes tradicionales

Existen dos medidas estándar de la calidad aislante de un material, y para el siguiente análisis utilizaremos uno de ellos: Valor-R ó Conductividad Térmica (W/mK). El revestimiento Nansulate una vez curado (un mínimo de 30 a 60 días después de aplicado, dependiendo de la humedad ambiente), consiste en más del 70% en volumen del nanomaterial llamado Hydro-NM-Oxide. Otros materiales aislantes (espuma, lana de vidrio, etc.) funcionan atrapando el aire, y este aire provee la aislación. Estos productos atrapan también moho, humedad, polvo, hongos, etc. en el tiempo, reduciendo su efectividad. No ofrecen protección contra la corrosión, condensación o fuego. A continuación se presenta la comparación con otros materiales:

**Tabla 6. Aislación Térmica (Un valor mayor de “R” significa mejor aislación)<sup>63</sup>:**

<b>Material</b>	<b>Valor-R por Pulgada</b>	<b>Fuente</b>
Hydro-NM-Oxide	10 a 13	Sandia NationalLab
Espuma de Poliuretano	6.64	Glacier Bay Thermal Study
Espuma de Poliisocianurato	6.35	Glacier Bay Thermal Study
Poliuretano rígido	5.8 a 6.2	IFAS, University of Florida
Poliestireno (extruido)	5.0	IFAS, University of Florida
Poliestireno (moldeado)	3.9 a 4.4	IFAS, University of Florida
Poliestireno (expandido)	3.84	Glacier Bay Thermal Study
Celulosa	3.2 a 3.7	IFAS, University of Florida
Lana de vidrio	3.2	IFAS, University of Florida
Fibra de vidrio	2.2	IFAS, University of Florida
Asbestos (disgregado)	2.0	IFAS, University of Florida

<sup>63</sup> (Fuente: [www.protansa.com](http://www.protansa.com), Protan S.A, Protección Anticorrosiva).

**Tabla 7. Conductividad Térmica (Un número menor significa “menor habilidad para conducir calor”= mejor aislación)<sup>64</sup>.**

<b>Material</b>	<b>Conductividad Térmica</b>	<b>Fuente</b>
Hydro-NM-Oxide	0.017 W/mK	Sandia NationalLab
Espuma de Poliuretano	0.040 W/mk	DeepSeaEngineering
“Cenoesferas”	0.110 W/mK	Microspheres S.A.
Microesferas Cerámicas	0.150 – 0.400 W/mk	3M

Como podemos apreciar, la utilización de la Nanotecnología en el desarrollo de materiales de este tipo, genera profundas mejoras en sus características principales. Genera beneficios en la calidad de vida, al genera espacios más confortables y con mejores características de aislación y protección frente a la acción del medio (en este caso).

Una evaluación del tipo económico es compleja tratándose de materiales innovadores, pues los actores involucrados difícilmente entregan algún tipo de información de este tipo (la que fue insistentemente solicitada), creemos, debido a asuntos estratégicos de comercialización y secretos de desarrollo.

Sin embargo, el contraste anteriorejemplifica claramente la “intervención nanotecnológica” en el desarrollo de materiales.

**b) Adhesivo PCI Nanolight versus pegamentos de alta exigencia tradicionales**

PCI Nanolight es un adhesivo cementoso multiuso, posee gran ligereza, consistencia y trabajabilidad, lo que lo hace fácil y rápido de aplicar. Su nombre (Nanolight) proviene del sistema de áridos que posee, esto es, las aplicaciones de la nanotecnología en la mejora de las características del árido junto a la especial ligereza que éstos poseen, generan en definitiva mejora en diversas propiedades.

<sup>64</sup> (Fuente: [www.protansa.com](http://www.protansa.com), Protan S.A, Protección Anticorrosiva)

Se formula a partir de tres componentes:

- Agente de adhesión.
- Áridos.
- Resinas en polvo.

¿Cómo actúa a nivel nanométrico?

De la misma manera que los finos “pelos” de la piel de los reptiles les permiten sostenerse y trepar por superficies aparentemente lisas, el adhesivo cementoso Nanolight emplea la nanotecnología para producir estructuras finas como agujas que emulen el efecto del velcro. La mayor eficiencia de la masa cementosa permite a éstas nanoestructuras adaptarse mejor a la rugosidad y porosidad de las baldosas (si fuera el caso) y el soporte, mejorando la adherencia.

Comparación entre adhesivos

**Tabla 8. Comparativo de PCI Nanolight contra Adhesivo A y B<sup>65</sup>.**

<b>ITEM</b>	<b>PCI Nanolight</b>	<b>Adhesivo A</b>	<b>Adhesivo B</b>
Adherencia por tracción.	980 (Kgf./cm <sup>2</sup> )	170 (Kgf./cm <sup>2</sup> )	340 (Kgf./cm <sup>2</sup> )
Consumo (1 mm. de espesor)	0.9 (Kg/cm <sup>2</sup> )	1.7 (Kg/cm <sup>2</sup> )	1.7 (Kg/cm <sup>2</sup> )

Se comparó PCI Nanolight con 2 adhesivos distintos A y B (ambos fabricados en base a resinas epóxicas y cargas inactivas) de alto rendimiento, líderes en el mercado.

Como podemos apreciar, en el área de los adhesivos el uso de la Nanotecnología

---

<sup>65</sup>(Fuente: Internet: <http://www.bettor-mbt.es>)

también genera ventajas apreciables, esto es aumentos extraordinarios en los niveles de adherencia gracias a la generación de “nanomecanismos” y mayores rendimientos, lo que hace a los nanoproductos elementos óptimos para mejoras en la calidad de la construcción. Como se indicó en el ítem anterior, fue necesario obviar comparaciones del tipo económico por el problema ya mencionado en la obtención de datos.

Nota:

- El adhesivo Nanolight posee una completa ficha técnica en la fuente citada, sólo se mencionó aquí aquella que podía ser objeto de comparación con los datos técnicos disponibles para otros aditivos.
- No se citan las fuentes correspondientes a Adhesivos A y B, pues no fue autorizada su exposición pública.

### **3.6 USO DE MATERIALES CON NANOTECNOLOGÍA EN COLOMBIA CONCRETO AUTOCOMPACTANTE**

El concreto es el más esencial de todos los materiales de construcción. Que este adecuadamente puesto en obra es vital para obtener estructuras durables y sin defectos. El concreto autocompactado es una alternativa para mejorar la calidad y el desempeño de las edificaciones de concreto.

Es una mezcla de gran trabajabilidad, fluidez extrema, cohesivo y sin segregación que permite ocupar todos los espacios de las más complejas formaletas. El concreto autocompactante debido a sus sobresalientes características autocompactantes no requiere procesos de compactación adicionales como vibración.

**Propiedades en estado fresco:** No requiere vibración, mezcla de alta

fluidez, concreto cohesivo sin segregación, autonivelante.

**Propiedades en estado endurecido:** Baja permeabilidad, matriz homogénea, excelente acabado superficial, alta resistencia a ataques químicos y a la carbonatación, baja contracción. Después de abrir la compuerta el concreto debe fluir hasta 40 cm en 3-6 segundos. La diferencia de altura horizontalmente debe ser menos del 20% después de que el flujo se ha detenido.

**Ventajas:** Rápida colocación por su extrema fluidez, economía por su alta velocidad de colocación y alta calidad de acabado, evita tener que corregir defectos, permite la producción de elementos arquitectónicos de formas complejas, la gran cohesión del concreto fresco y la ausencia de segregación, permiten obtener un concreto con muy baja permeabilidad y con alta durabilidad ya que impide el paso de cloruros, carbonatación y otros tipos de ataques químicos, menor requerimiento de equipos de colocación y mejor uso de la mano de obra lo que hace un proceso productivo más económico.

### **Aplicaciones del concreto Autocompactante**

- Áreas de alta densidad de refuerzo.
- Estructuras esbeltas y complejas formas geométricas.
- Dovelas preesforzadas.
- Tanques de almacenamiento de agua.
- Pisos industriales.

### 3.6.1 Obras realizadas en Colombia utilizando concreto Autocompactante

Figura 9. Planta de tratamiento de agua La Calera<sup>66</sup>.



Figura 10. Alboraiá- Bogotá<sup>67</sup>.



<sup>66</sup> Fuente: Archivo fotográfico de Cemex Colombia

<sup>67</sup> Fuente: Archivo fotográfico de Cemex Colombia

**Figura 11. Andalucía Bogotá<sup>68</sup>.**



**Figura 12. Almadia – Bogotá<sup>69</sup>.**



<sup>68</sup> Fuente: Archivo fotográfico de Cemex Colombia

<sup>69</sup> Fuente: Archivo fotográfico de Cemex Colombia

**Figura 13. Pisos Empresa Postobón- Cali<sup>70</sup>.**



### **3.7 BONDADES DE LA NANOTECNOLOGÍA**

Hemos visto a través del presente trabajo de titulación que la Nanotecnología implica mejoras en diversas áreas del sector de la construcción (el estudiado en éste caso) en lo referente a materiales dispositivos y sistemas en general.

A partir de lo anterior y analizando el trabajo realizado, podemos establecer las siguientes “bondades” de la nanotecnología:

- La nanomecánica denota la necesidad de discretizar cualquier sistema material, para mejorar el conocimiento respecto a su funcionamiento y potencialidades de uso y rendimiento. Detalle muy importante para la ciencia de materiales hoy en día.
- El beneficio de la utilización de nanotubos de carbono debido, entre otros, a su forma bien definida y su buen comportamiento en diversas aplicaciones científico-tecnológicas tales como microscopía, dispositivos nanoelectrónicos,

---

<sup>70</sup> Fuente: Archivo fotográfico de Cemex Colombia.

sensores, emisión de ondas y compósitos (con polímeros).

- La generación de materiales nanoestructurados que poseen un buen número de propiedades físicas y mecánicas mejoradas y muy superiores a policristales convencionales, los cuales son muy atractivos en un sinnúmero de aplicaciones de ingeniería.
- La Nanotecnología ha implicado investigaciones básicas en la ciencia de materiales así como también otras muy innovadoras, tales como desarrollo de estructuras inteligentes y diseño de diversos materiales que han mostrado un enorme potencial para mejorar la funcionalidad, serviciabilidad e incremento en la vida útil en los diversos sistemas de infraestructura civil.
- La utilización de la nanociencia también ha implicado mejoras en diversas propiedades de los materiales, destacando las propiedades ópticas, mecánicas, de transporte, magnéticas y superficiales.
- Mejora en las propiedades de hormigones y morteros dada la posibilidad de conocer en detalle (y a escalas menores a la micrométrica) las diversas reacciones que se producen durante la generación de dichos materiales, lo que hace más fáciles y efectivas las soluciones y modificaciones que impliquen mejoras en su comportamiento.
- Generación de nuevos materiales tales como nanomateriales en capas, nanocristales (para efectos catalíticos), materiales semiconductores a escala atómica inclusive, electrodos nanoestructurados, desarrollos en nanotecnología metalúrgica, materiales a escala nano para aplicaciones espaciales, instrumentos de medición (nanoescalares), etc.
- En el sector constructivo, además de mejoras en mortero y hormigón, la nanotecnología está produciendo mejoras por ejemplo en adhesivos, pinturas y/o revestimientos, además de aditivos para morteros y hormigones. Todo lo anterior con el fin de mejorar el comportamiento de estructuras o sistemas, lo que implica en definitiva mejorar la calidad de vida de las personas.
- Creación de estructuras inteligentes gracias a la utilización de nanosensores, lo que implica un monitoreo y conocimiento cabal del comportamiento de grandes

obras civiles como puentes o dispositivos similares, lo que dice relación con la determinación de esfuerzos y otras sollicitaciones que pueden ser muy útiles en futuros diseños.

Como se puede apreciar, las bondades y beneficios que implica la utilización de la nanotecnología abarcan todas las áreas de la ciencia aunque en el presente trabajo sólo nos concentremos en los materiales más relacionados con el área de la construcción.

Esto es un indicador de su revolucionaria influencia en la calidad de vida de las personas pues se genera más confianza y seguridad en las estructuras y su respuesta frente a las influencias del medio. Importante es destacar también lo vertiginoso de los avances, lo que nos hace pensar que los límites de la nanociencia podrían ir más allá de lo que podríamos imaginar.

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo al objetivo más general del presente trabajo de titulación, podemos establecer que el beneficio de la investigación radica en que ésta da una pauta y pone en conocimiento el tema de la “Nanotecnología” a través de sus aplicaciones en el sector de la construcción. Creemos que dicho objetivo está cumplido pues se desarrollaron las siguientes actividades a través de éste informe:

- Se entregó una visión respecto a la estructura de morteros, hormigones (como materiales principales para ésta investigación) a nanoescala, lo que implicó un mayor conocimiento de sus mecanismos de acción, posibilidades de falla, entre varios otros aspectos.
- Se mostraron mejoras en construcción y hábitat; materiales con mejores características de dureza, capacidad de deformación, más livianos; en general, con una mejora en diversas propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas, entre muchas otras.
- Se presentaron y conocieron la nanomecánica, nanotubos de carbono y materiales nanoestructurados, junto a las pautas referentes a potenciales aplicaciones de los mismos.
- Se presentaron materiales y herramientas nanotecnológicas con capacidades autorreparantes y de mayor monitoreo y/o análisis.
- Se presentaron noticias y desarrollo de materiales novedosos como una manera de ilustrar las potencialidades y beneficios del uso de ésta nueva “ciencia”.
- El uso de la nanotecnología en nuestra región no es de interés común, se podría pensar que solo el sector privado, ha investigado e introducido algunos materiales novedosos en el mercado de la construcción y estos fueron recibidos de manera tímida.

## BIBLIOGRAFIA

- AKASH A, Nair B, Wilson M, Zhao Q, Persson J; 2010; "Net-Shaped Nanoceramics"; American Ceramic Society Bulletin; Vol. 84; Issue 6; páginas 16-18 (3p.); disponible en base de datos EBSCO.
- BHUSHAN, Bharat; 1999; Cap.10 "Nanomechanical properties of solid surfaces and thin films"; Handbook of micro/nano tribology; 92 páginas.
- BRENNER, Donald; 2009; Cap.24 "Contributions of molecular modeling to nanometer-scale science and technology"; Handbook of nanoscience, engineering and technology; 33 páginas.
- BRYNER Michelle, Scott Alex; 2010; "Nanotechnology"; Chemical Week; Vol. 167; Issue 42; páginas 22-23 (2p.); disponible en base de datos EBSCO.
- CHAUDHURYPRODIP; 2010; "Nanostructured steel combines hardness, toughness, high wear"; Metals, Material Progress, Advanced Materials & Processes; Vol. 161; Issue 7; página 8; disponible en base de datos EBSCO.
- CHONG, Ken; Garbozzi, Edward; 2008; "Smart and designer structural material systems"; Progress in structural engineering and materials; Vol N°4; Issue 4; 14 páginas (417-430).
- COOPER Sarah; 2010; "Natural Clay Nanotubes reinforce Composites"; AdvancedMaterials&Processes; página 26; disponible en base de datos EBSCO.
- DOMINGUEZ Luis E.; "Red de aplicación de nanotecnologías en materiales y productos para la construcción y el hábitat"; RENAC; 19 páginas.
- Empedocles Stephen; 2010; "Nanocomposite Photovoltaic"; Nanonews, American Ceramic Society Bulletin; Vol. 82; Issue 9; página 10; disponible en base de datos EBSCO.
- KEYSER Carl A; "Ciencia de Materiales para Ingeniería"; Primera Edición;

México; Editorial Limusa- Wiley S.A; Año 1972; 460 páginas.

- KURTIS K. E, Monteiro P. J; 2007; “Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanism of control”; Journal of Materials Science; páginas 2027-2036.
- LIWEI Lin; 2007; “UCB Researchers grow nanowires directly on microstructures”; Ceramic Bulletin; páginas 10.
- LYSHEVSKI, Sergey; 2008; Cap.23 “Nano and micromachines in NEMS and MEMS”; Handbook of nanoscience, engineering and technology; 27 páginas.
- LYSHEVSKI, Sergey; 2008; Cap.18 “Nanotechnology”; The CRC Handbook of mechanical engineering. Second edition; 18 páginas.
- NAZAROV, Airat; Mulyukov, Radik; 2003; Cap.22 “Nanostructures materials”; Handbook of nanoscience, engineering and technology; 41 páginas.
- Norma Técnica Colombiana (NTC); “Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico”; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, Colombia; 2009;10 páginas.
- Norma Técnica Colombiana (NTC); “Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos”; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, Colombia; 2007;10 páginas.
- Norma Técnica Colombiana (NTC); “Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, Colombia; 2007;10 páginas.
- Massazza, F. “Structure of pozzolana and fly-ash and the hydration of pozzolanic and fly-ash cements. 7th. International Congress on the Chemistry of Cement, V. 4 París; p. 85; 1980.
- MEYYAPPAN, Meyya; Srivastava, Deepak; 2008; Cap.18 “Carbon Nanotubes”; Handbook of nanoscience, engineering and technology; 26 páginas.
- Mehta, P.K. Pozzolanic and cementitious by products in concrete -Another look., Proceedings of Third CANMENT/ACI Int. Conf., V:M. Malhotra. Michigan,

ACI SP 114 : American Concrete Institute, Vol. 1., 1989. pp 1-43.

- P. KumarMehta, Paulo j.m. Monteiro,1998, Concreto; estructura, propiedades y materiales, editorial Arq. Heraclio Huidobro y Ing. Raúl Huerta Martínez, Págs.3-5.
- Patilnilesh V.; 2005; “Nanoclays make polymers stronger”; Advanced Materials & Processes; Diciembre 2005; páginas 39-40.
- PICKRELL Dave; 2005; “Omega Piezocopper/carbon nanocomposite manages high heat”; Advanced Materials & Processes; Diciembre 2005; página 37.
- QIAN, Dong; Wagner, Gregory; 2003; Cap.19 “Mechanic of carbon nanotubes”; Handbook of nanoscience, engineering and technology; 63 páginas.
- RAMAN Arvind; 2005; “Multi-walled carbon nanotubes measure structured and devices”; Advanced Materials & Processes; Agosto 2005; página 27.
- RAWALSURAJ; 2005; “Nanotechnology for Space Applications”; Advanced Materials & Processes; Diciembre 2005; páginas 22-23.
- SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Curso Concretos hidráulicos especiales. Popayán 1992.
- SANDINO PARDO, Alejandro; RODRIGUEZ, Carlos Alberto; GÓMEZ CORTÉS, José Gabriel; NARANJO VILARO, Ricardo. Tecnología del concreto. Bogotá. 1988.
- TOBON, Jorge, Ivan; 2011; “Departamento de materiales y minerales”; Investigación la nanotecnología en la industria del cemento.

#### Páginas web recomendadas

- [www.bettor-mbt.es](http://www.bettor-mbt.es): Bettor MBT S.A. España. Información acerca del adhesivo nanotecnológico “PCI Nanolight”.
- [www.degussa-cc.es](http://www.degussa-cc.es): Degussa Construction Chemicals. España S.A. Información acerca del aditivo nanotecnológico “GleniumSky”.
- <http://www.hormigonespecial.com/>: Piel de hormigón, aspectos técnicos y

estéticos del hormigón autocompactante.

- [www.nanoword.net](http://www.nanoword.net): Completa enciclopedia sobre nanotecnología.
- [www.protansa.com](http://www.protansa.com): Protan S.A Argentina. Información referente a la Pintura nanotecnológica “Nansulate”.

## ANEXOS

## Anexo A. Artículo: Adición de nanopartículas al cemento Portland<sup>71</sup>.

### ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS AL CEMENTO PORTLAND PORTLAND CEMENT BLENDED WITH NANOPARTICLES

JORGE IVÁN TOBÓN

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia. E-Mail: jitobon@unal.edu.co. Grupo del Cemento y Materiales de Construcción

OSCAR JAIME RESTREPO BAENA

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia. E-Mail: ojrestre@unalmed.edu.co. Grupo del Cemento y Materiales de Construcción

JORGE JUAN PAYÁ BERNABEU

Profesor Titular, Universidad Politécnica de Valencia – España. E-Mail: jipaya@cst.upv.es. GIQUIMA (Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción)

Recibido para revisar 27 de Junio de 2006, aceptado 14 de Agosto de 2006, versión final, 28 de Septiembre de 2006

#### RESUMEN

En este artículo se presenta la revisión del estado del arte sobre la adición de nanopartículas al cemento Portland. Se muestra cómo la nanotecnología está empezando a llegar a este material de construcción buscando generar hormigones de alto desempeño y cómo varios investigadores han incorporado algunos tipos de partículas nanométricas para evaluar fundamentalmente el desempeño físico y mecánico de los cementos adicionados con éstas contra cementos con adiciones de comportamiento más conocido como el humo de sílice, escorias de alto horno y las cenizas volantes.

Se encontró que hay una gran expectativa por el efecto positivo de las nanopartículas en el desempeño del cemento, pero que poco se ha trabajado en las posibles modificaciones que ocurren en la mineralogía de las pastas del cemento y en la durabilidad de los morteros a causa de la incorporación de estos nuevos materiales. Además, se identificaron otros vacíos en el conocimiento en este tema como son: la definición de los mecanismos de interacción de las nanopartículas con el cemento Portland durante el proceso de hidratación, definición de los porcentajes óptimos de adición de las nanopartículas y su real aporte a las resistencias mecánicas

**PALABRAS CLAVE:** nanopartículas, hormigones de alto desempeño, nanotecnología, nanocompuestos

#### ABSTRACT

In this paper a review about Portland cement blended with nanoparticles is presented. It shows as the nanotechnology is a new topic in cement industry to produce high performance concretes. Physical and mechanical properties had been evaluated by some researches incorporated particles of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-TiO<sub>2</sub>, magnetite ash, carbon nanotubes and high fine fly ash to compare them with blended cement with silica fume, slag furnace and fly ash.

It was found that exists a few work about mineralogy modification of paste cement and durability of mortars by incorporation of nanoparticles. Beside, definition of interaction process, better blend percentage and real participation of strength resistance are few known.

**KEY WORDS:** nanoparticles, high performance concretes, nanotechnology, nanocomposites

Dyna, Año 74. Nro 152. pp 277-291. Medellín. Julio de 2007. ISSN 0012-7353

---

<sup>71</sup>Fuente: JORGE IVAN TOBON, OSCAR RESTREPO, JORGE JUAN PAYA, "Adición de nanopartículas al cemento Portland". En: Colombia Dyna ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombia, v. fasc.152 p.277 - 291,2007.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cada vez más a los materiales ingenieriles se les exige un mejor desempeño en cuanto a sus propiedades y el cemento Portland no es la excepción a esta regla. Hoy por hoy, se desea tener cementos con altas resistencias mecánicas, por ejemplo, para construir edificios altos en espacios muy pequeños (estructuras esbeltas), especialmente en las grandes ciudades donde la presión del crecimiento poblacional es cada vez mayor. Para fabricar los cementos de altas especificaciones (resistencias por encima de las convencionales) se han ensayado diferentes soluciones como molienda ultrafina, enriquecimiento en fases mineralógicas como la alita y la belita y la incorporación de adiciones activas como el humo de sílice, las cenizas volantes, el metacaolín, la ceniza de la cascarilla de arroz y las escorias de alto horno, entre otras (Taylor, 1967; Hewlett, 1998; Blanco, 1995; Tobón, 2000; Calleja, 2001; Knöfel, 1979; Mostafa y Brown, 2005; Ganjian & Sadeghi, 2005; Razak & Wong, 2005; Richardson, 2004; Chindaprasirt *et al.*, 2005; McCarthy & Dhir, 2005; Etsuo Sakai *et al.*, 2005; Tangpagasit, 2005; Atis, 2005; Kalinski & Hippley, 2005; Poon *et al.*, 2001; Jauberthie *et al.*, 2003; Feng *et al.*, 2004; Jaturapitakkul, 2004; Payá, Monzo & Borrachero, 1997; Payá *et al.*, 2001).

Dado que las nanopartículas presentan propiedades físicas y químicas excepcionales han sido aplicadas en muchos campos para fabricar nuevos materiales con funciones novedosas en propiedades como las eléctricas y las mecánicas, es por esto que la nanotecnología se asocia comúnmente a grandes desarrollos médicos, electrónicos, telecomunicaciones y militares (Ginebra, Driessens & Planell, 2004), pero este desarrollo tecnológico está empezando a llegar a cosas tan cotidianas como el hormigón, es por esto que ya existen empresas en el mundo que dentro de su catálogo de productos ofrecen cementos adicionados con nanopartículas, buscando

generar hormigones de alto desempeño. Además, el cemento se considera un material nanoestructurado natural porque su principal componente cuando está hidratado, llamado gel

de tobermorita (C-S-H), es una nanopartícula con diámetros alrededor de los 10 nm (Taylor, 1993; Zhang, 2000; Catering, 1997 citado por Qing *et al.*, *in press*; Collepardi *et al.*, 2005; Ye, 2001 citado por Ji, 2005) y de esta fase mineral depende en buena medida el desempeño del hormigón. Se espera que con un mejor entendimiento de las propiedades del hormigón a escala nanométrica se puedan fabricar hormigones más resistentes, durables y de forma más sostenible ambientalmente hablando.

Es por esto que los investigadores han empezado a trabajar con estos materiales con la idea de encontrar combinaciones de ellos con el cemento Portland que permitan conseguir un material de alto desempeño (Li *et al.*, 2004; Ji, 2005), en términos de autores como Li *et al.* (2006) al incorporar adiciones nanométricas para mejorar propiedades mecánicas de los cementos surge un campo de investigación muy prometedor en el área de los nanocompuestos y en el desarrollo de mejores y nuevas aplicaciones como construcciones muy elevadas, muy amplias o sistemas de infraestructura civil inteligente (Li *et al.*, 2004; Li, Xiao & Ou, 2004).

En el caso del cemento Portland algunos pocos investigadores han empezado a probar con nanosílice, nanoalúmina, óxidos de hierro y de titanio nanométricos, cenizas de magnetita, nanotubos de carbono y cenizas volantes ultrafinas para evaluar fundamentalmente el desempeño físico y mecánico de los cementos adicionados con estas nanopartículas contra cementos con adiciones de comportamiento más conocido como el humo de sílice, escorias de alto horno y las cenizas volantes las cuales se consideran adiciones micrométricas con lo que hay una gran diferencia en las escalas de trabajo (Li *et al.*, 2004; Li, 2004; Li, Wang & Zhao, 2005; Collepardi *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; Shih, Chang & Hsiao, 2006; Li, Zhang & Ou, 2006). Otros como Björnström *et al.* (2004) han preferido evaluar lo que sucede a la hidratación del cemento cuando se usan las nanoadiciones con cementos monominerales, ellos trabajaron con sílice coloidal (5 nm y 500 m<sup>2</sup>/g) en un cemento de laboratorio compuesto por alita (C<sub>3</sub>S) pura del sistema triclinico. Pero poco se ha trabajado en los temas de las posibles

modificaciones que ocurren en la mineralogía de las pastas del cemento y en la durabilidad de los morteros a causa de la incorporación de estos nuevos materiales (Ji, 2005). Además, de la revisión del estado del arte se pueden identificar otros vacíos en el conocimiento de este tema como son: la definición de los mecanismos de interacción de las nanopartículas con el cemento Portland durante el proceso de hidratación, porcentaje óptimo de adición de las nanopartículas y su real aporte a las resistencias mecánicas.

## 2. ADICIONES DE NANOPARTÍCULAS EN EL CEMENTO PÓRTLAND

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS NANOPARTÍCULAS EMPLEADAS

**2.1.1 Nanosilice (NS):** Son nanopartículas (1 – 500 nm) de SiO<sub>2</sub> amorfa insolubles en agua. El tamaño, la distribución de tamaños y el área superficial específica son parámetros que se definen de acuerdo al proceso de síntesis (Björnström et al, 2004). Gracias a sus propiedades la nanosilice se ha convertido en el material silice de mayor reactividad, por lo cual, ha sido adicionada a materiales como los

polímeros para incrementar su resistencia mecánica, flexibilidad y resistencia al envejecimiento (Zhang, Wang & Cheng, 2002 y Bauer et al, 1996 citados por Li, 2004)

Los investigadores buscando la máxima reactividad utilizaron en sus proyectos NS comercial de baja cristalinidad como lo muestra la DRX (Figura 1), con purezas iguales o superiores al 99.9%, área superficial específica entre 160±20 m<sup>2</sup>/g y 640±50 m<sup>2</sup>/g, densidad alrededor de los 0.15 g/cm<sup>3</sup> y diámetro promedio de las partículas entre 5 nm y 20 nm. Los porcentajes de adición estuvieron en general entre el 1% y el 12% por peso, se usaron 1%, 2%, 3%, 5%, 6%, 10% y 12%, trabajaron con relación agua/cemento (a/c) constante y utilizaron superplastificantes comerciales (Qing et al. *in press*; Li, Zhang & Ou, 2006; Ji, 2005; Li, 2004; Li et al, 2004; Björnström et al, 2004; Li, Xiao & Ou, 2004). Entre los pocos que se apartaron de este esquema están Shih, Chang & Hsiao (2006) quienes adicionaron porcentajes de nanosilice por debajo del 1% (0.2%, 0.4%, 0.6% y 0.8%), variaron la relación a/c (0.25, 0.35, 0.45, 0.55 y 0.65) y no utilizaron superplastificantes y Byung-Wan Jo et al (2006) quienes utilizaron en su proyecto NS más gruesa (40 nm y 60 m<sup>2</sup>/g).

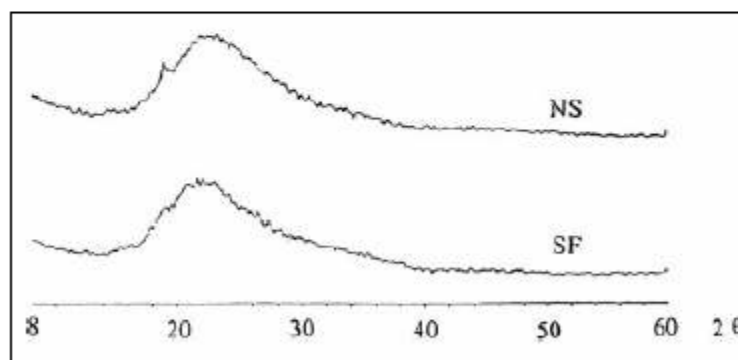


Figura 1. DRX nanosilice (NS) y humo de silice (SF). Tomada de Qing et al. (*in press*)  
Figure 1. XRD powder pattern of nano-SiO<sub>2</sub>(NS) and silica fume(SF). Taken of Qing et al. (*in press*)

**2.1.2 Otras:** Li et al (2006) usaron nanoalumina α, comercial, mayor de 99.99% de pureza, partículas inferiores a los 150 nm, superficie específica de 10±5 m<sup>2</sup>/g y densidad entre 0.3 y 0.5 g/cm<sup>3</sup>. Utilizó 3%, 5% y 7% de sustitución.

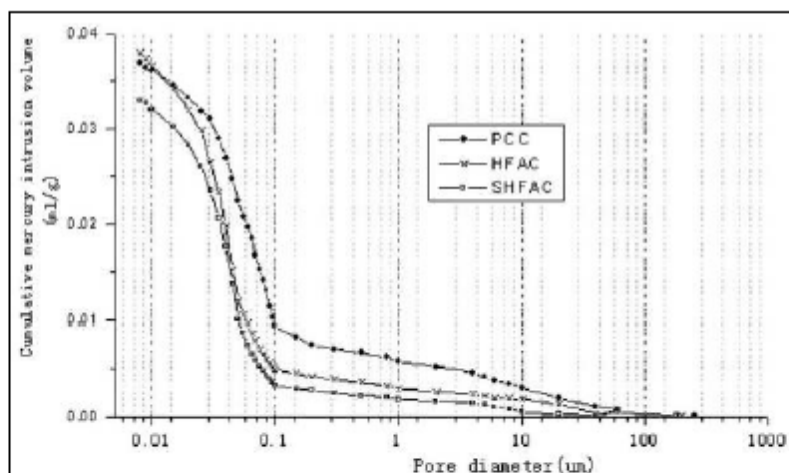
Con a/c constante de 0.4 y cemento/arena 1:1. Li et al (2004) y Li, Xiao & Ou (2004) usaron partículas comerciales de hierro nanométrico de 30 nm. En porcentajes de 3%, 5% y 10% por peso. Li, Zhang & Ou (2006) usaron nanotitanio

(anatasa) comercial, de baja cristalinidad, del 99.7% de pureza, superficie específica  $240 \pm 50$   $\text{m}^2/\text{g}$ , densidad entre 0.04 y 0.06  $\text{g}/\text{cm}^3$  y un diámetro promedio de 15 nm. En porcentajes de 1%, 3% y 5% por peso.

## 2.2 INCIDENCIA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS

Qing *et al.* (*in press*) encontraron que al incrementar el porcentaje de adición de NS la consistencia de la pasta decrecía suavemente y que lo contrario ocurre con la adición de SF, es decir, la NS acelera el proceso de hidratación en comparación con la SF. Esto es apoyado por autores como Björnström (2004) y Li (2004) quienes encontraron que la sílice en tamaños nanométricos acelera el proceso de hidratación y la formación de tobermorita (C-H-S) gracias a su elevada energía superficial.

Li (2004), Shih, Chang & Hsiao (2006) y Byung-Wan Jo *et al.* (2006), mediante análisis microestructural, determinaron que las muestras con más alta resistencia presentan texturas más densas y compactas porque las nanopartículas rellenan los poros (Figura 2). Algo similar encontraron Wen-Yih Kuo y sus colaboradores (2005) al utilizar montmorillonitas órgano-modificadas y verificar que la permeabilidad se reducía hasta en 100 veces. Se debe resaltar que las montmorillonitas son micro partículas y no nanopartículas por lo cual sólo alcanzan a penetrar en poros hasta de 0.1  $\mu\text{m}$ . Esto queda físicamente demostrado en el trabajo de Ji (2005) quien compara la penetración de agua en un concreto normal contra uno adicionado con NS y encuentra que en este último la penetración es significativamente menor 146 mm y 81 mm respectivamente.



**Figura 2.** Porosidad a los dos años. **PCC** concreto de cemento Pórtland; **HFAC** Concreto con alto volumen de cenizas volantes (50%); **SHFAC** Concreto con alto volumen de cenizas volantes (50%) incorporándole nanosilíce (4%). Tomada de Li, 2004.

**Figure 2.** Porosity measurement at 2 year. **PCC** concrete of Portland cement; **HFAC** concrete with high volumen fly ash (50%); **SHFAC** concrete with high volumen fly ash (50%) blended with nanosilíce (4%). Taken of Li, 2004

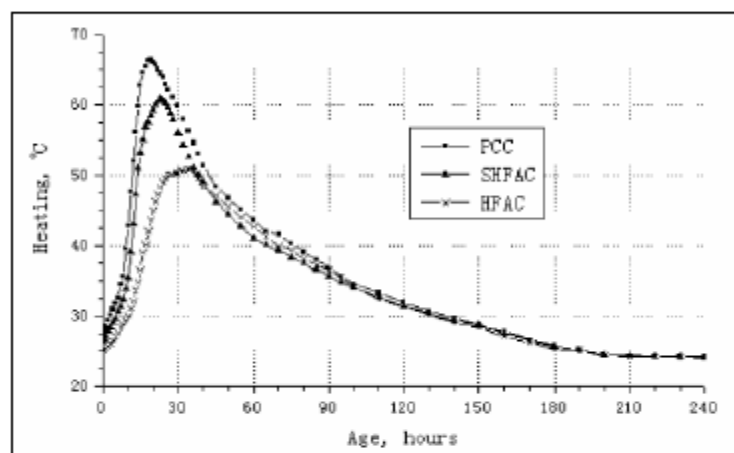
Li (2004) reafirma lo dicho por Sánchez de Rojas & Frias (1996) cuando plantea que el calor de hidratación indica la actividad puzolánica de los materiales; si el material muestra alta actividad el calor producido durante su hidratación será mayor. En su trabajo él encontró el siguiente orden de liberación de calor para sus

muestras: cemento de referencia ( $65^{\circ}\text{C}$  a las 15 – 25 horas), adición de nanosilíce ( $61^{\circ}\text{C}$  a las 15 – 25 horas), adición de cenizas volantes ( $51^{\circ}\text{C}$  a las 30 – 40 horas), lo cual muestra una mayor reactividad y liberación de calor en la NS en comparación con la FA (Figura 3). Byung-Wan Jo *et al.* (2006) también evidenciaron que al

incrementar el porcentaje de adición de la NS se incrementa el calor de hidratación de la mezcla como consecuencia del grado de finura de las nanopartículas

Byung-Wan Jo et al (2006) encontraron que al incrementar la adición de NS se incrementa también la demanda de agua y superplastificante, esto es confirmado por Li, Zhang & Ou (2006)

quienes señalan que cuando el contenido de nanopartículas es grande, 3% para las NS y 5% para NT, la trabajabilidad del concreto es mala y el número de microfisuras se incrementa lo cual se traduce en un descenso de la resistencia del concreto. Shih, Chang & Hsiao (2006) proponen como relación a/c óptima 0.55 para pastas con adición de NS.



**Figura 3.** Liberación de calor: **PCC** concreto de cemento Pórtland; **HFAC** Concreto con alto volumen de cenizas volantes (50%); **SHFAC** Concreto con alto volumen de cenizas volantes (50%) incorporándole nanosilice (4%). Tomada de Li, 2004.

**Figure 3.** Heating over time. **PCC** concrete of Pórtland cement; **HFAC** concrete with high volumen fly ash (50%); **SHFAC** concrete with high volumen fly ash (50%) blended with nanosilice (4%). Taken of Li, 2004

Li, Xiao & Ou (2004) para el caso de las adiciones con nano-hierro encontraron que sus resistividades decrecen ligeramente con el incremento del porcentaje de adición aún cuando se les aplica carga y aparecen las grietas, lo cual indica que el NF no decrece significativamente la resistividad lo cual es beneficioso para la durabilidad del refuerzo del hormigón.

### 2.3 INCIDENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

La mayoría de investigadores aceptan que al incrementar el contenido de nano-SiO<sub>2</sub> en un cemento Pórtland se obtiene una mejora sustancial en el desarrollo de resistencias a la compresión, especialmente a edades tempranas (3 días). Al ser comparado este comportamiento con el que se presenta con la adición de humo de

silice se nota que la NS es mucho más reactiva, es decir, tienen mayor actividad puzolánica (Qing et al, *in press*; Byung-Wan Jo et al, 2006; Shih, Chang & Hsiao, 2006; Li et al, 2004; Li, Xiao & Ou, 2004; Li, 2004). En este sentido Qing et al, (*in press*) encontraron que la NS siempre mostró valores más altos que los de las muestras de referencia (hasta en un 40%), mientras que las muestras con SF para 1 y 3 días de curado presentaron resistencias por debajo de las muestras de referencia (hasta un 3%). A los 28 días obtienen valores de resistencia del 125% y del 120% y a los 60 días los valores son del 115% y 113% con 5% de adición de NS y SF respectivamente, los cuales son los máximos valores, esto podría estar significando que el efecto de estas adiciones tiende a nivelarse con el tiempo. Byung-Wan Jo y otros (2006)

encontraron que la resistencia de las muestras con 3% de nanosilice es mayor que la resistencia de las muestras con 15% de humo de silice a 28 días. Además, evidenciaron que los valores de resistencia de las probetas adicionadas con nanosilice se incrementan con el porcentaje de adición, aunque, los valores de resistencia para 10% y 12% de adición varían muy poco. Li *et al* (2004) y Li, Xiao & Ou (2004) encontraron que con la nanosilice se obtienen incrementos hasta del 20% para 7 días y del 26% para 28 días de fraguado, con la adición del 10%. La mayor reactividad o actividad puzolánica de la NS se entiende bien cuando se tiene en cuenta que es un material más puro, de tamaño de partícula más reducido y de mayor área y energía superficial que el humo de silice.

En los resultados de estas investigaciones se sugiere una primera contradicción porque mientras Qing *et al.* (*in press*) estarían sugiriendo que el empleo de NS sólo es importante para alcanzar resistencias altas en los 3 primeros días de fraguado y que en el largo plazo la resistencia se equipara con la de

cementos adicionados con humo de silice, Byung-Wan Jo y otros (2006) afirman que con una quinta parte NS con respecto a SF se logran los mismos valores de resistencia a los 28 días de curado y Li *et al* (2004) y Li, Xiao & Ou (2004) que la resistencia se sigue incrementando aún a los 28 días de curado. Una segunda contradicción se encuentra al comparar estos resultados con los obtenidos por Ji (2005) quien encontró que la resistencia a 28 días del concreto normal (NC) era mayor que la del concreto adicionado con NS, 47.5 MPa y 44.0 MPa respectivamente, el autor no se hace discusión alguna sobre este resultado.

Shih, Chang & Hsiao (2006) encontraron que las resistencias a la compresión aumenta con el porcentaje de NS hasta el 0.6% donde obtuvieron el máximo valor de 65.62 MPa para 56 días de curado, ya para el 0.8% las resistencias caen para todas las edades. En cuanto a la edad ellos afirman que aún para los 56 días de curado la NS está aportando al desarrollo de resistencias (Figura 4).

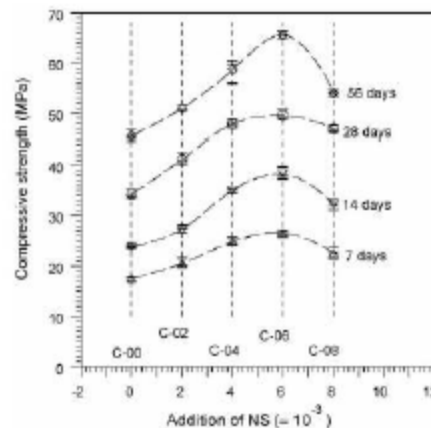


Figura 4. Resistencia a la compresión de pastas adicionadas con NS. Tomada de Shih, Chang & Hsiao (2006)  
 Figure 4. Compressive strenght of pastes blended with NS. Taken of Shih, Chang & Hsiao (2006)

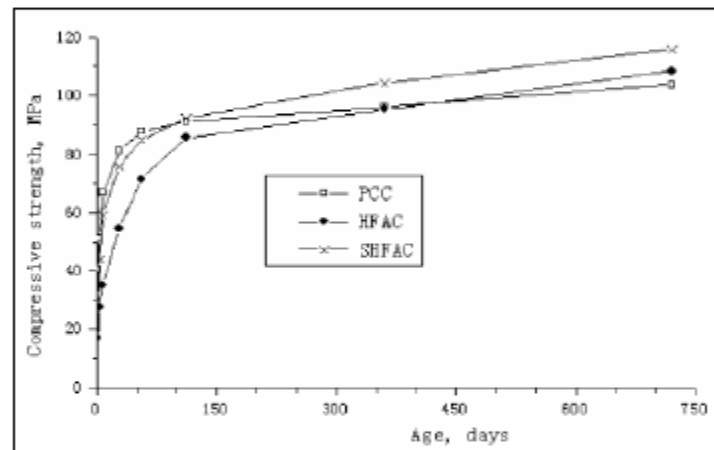
Shih, Chang & Hsiao (2006) estarían de acuerdo con el incremento de la resistencia a medida que se incrementa el porcentaje de adición de NS, aún a 56 días de curado. Su gran diferencia con los otros autores radica en que ellos siempre usaron menos del 1% de adición, mientras que los otros llegan hasta el 12%. Sin embargo, otros

autores como Li, Zhang & Ou (2006) concluyen en su trabajo que cuando las nanopartículas son adicionadas en pequeñas cantidades ( $\leq 3\%$ ) la resistencia a la compresión y flexión del concreto son acrecentadas. Sin embargo, cuando se adicionan en grandes cantidades la resistencia a la flexión llega a ser más baja que la de la

muestra patrón (-1.87%) y la resistencia a la compresión puede ser un poco mayor (3.51%). Los mejores resultados los obtienen con el 1% de adición donde la resistencia a la flexión se mejora en un 4.21% y la compresión en 12.31%.

Li, Zhang & Ou (2006) Al comparar los resultados de cementos adicionados con NS y otros con fibras de polipropileno encuentran que las muestras adicionadas con este último material siempre presentaron resistencias a la flexión significativamente mayores que las que contenían NS, pero la resistencia a la compresión siempre fue menor.

Li (2004) encontró para concretos con un reemplazamiento del 50% (ceniza volante) y del 54% entre cenizas volantes y nanosilice (FA 50% y NS 4%) una tendencia a incrementar su resistencia aún para edades de curado superiores a los dos años. Las muestras adicionadas solamente con altos volúmenes de cenizas volantes muestran resistencias inferiores a la muestra de referencia hasta el primer año y de ahí en adelante la supera (Figura 5). Se puede afirmar entonces que las resistencias de los concretos con grandes reemplazos de cenizas volantes son sensiblemente mejoradas con sólo la incorporación de 4% de NS, por ejemplo, para el día tres lo hace en un 81%



**Figura 5.** Desarrollo de resistencias. PCC concreto de cemento Portland; HFAC Concreto con alto volumen de cenizas volantes (50%); SHFAC Concreto con alto volumen de cenizas volantes (50%) incorporándole nanosilice (4%). Tomada de Li, 2004.

**Figure 5.** Compressive strength. PCC concrete of Portland cement; HFAC concrete with high volumen fly ash (50%); SHFAC concrete with high volumen fly ash (50%) blended with nanosilice (4%). Taken of Li, 2004

Para este caso y en el trabajo de Collepardi et al (2004) obtuvieron mejoría en el desempeño del mortero al combinar las adiciones. Collepardi y sus colaboradores (2004) encontraron que cementos con combinaciones temarias de humo de silice, cenizas volantes y nano-SiO<sub>2</sub> se desempeñaban igual de bien en términos de resistencia y durabilidad que cementos con sólo adición de humo de silice, pudiendo reducir el SF de 60 kg/m<sup>3</sup> a 15-20 kg/m<sup>3</sup> para mantener los costos constantes. Sin embargo, esto no siempre

ocurre por ejemplo en los trabajos de Li et al (2004) y Li, Xiao & Ou (2004) combinaron nanosilice con nanohierro en un cemento buscando mejorar el desempeño y encontraron que estas muestras presentaban menores valores de resistencia que los morteros hechos con sólo NS o sólo NF.

Li, Zhang & Ou (2006) encontraron que las nanopartículas y las fibras de polipropileno mejoran considerablemente resistencia a la

abrasión del hormigón. Sin embargo, la mejora con las nanopartículas es significativamente mayor, hasta en un 180%, aumentando la vida útil del pavimento. El porcentaje de incremento de la resistencia a la abrasión de los concretos decrece con el incremento del porcentaje de adición de las nanopartículas. La resistencia a la abrasión con nanotitanio (NT) tiene el mismo comportamiento decreciente en el porcentaje de mejora con el incremento en el porcentaje de adición que con la NS, sin embargo, el valor de la resistencia siempre fue mejor con NT que con el mismo porcentaje de NS.

Para el caso de la resistencia a la flexión, autores como Li *et al* (2004); Li, Xiao & Ou (2004); Ye *et al* (2003) citado por Ji (2005), encontraron que ésta se ve incrementada por las adiciones de nanopartículas y que en el caso de NS y nanohierro (NF) disminuye con el incremento de la nanoadición. Particularmente, Li *et al* (2004) y Li, Xiao & Ou (2004) recalcan que al aumentar el porcentaje de adición de óxidos de hierro nanométrico se presentaba una caída de

los valores de resistencia, aún cuando siempre estuvieron por encima de la muestra patrón. Aunque los autores no lo expresan es importante resaltar que los incrementos de resistencia con 3% de nanohierro son iguales a los obtenidos con 10% de nanosilice, lo que estaría sugiriendo una mayor efectividad del NF en comparación con la NS empleadas por los autores.

La nonoalúmina (NA) según Li *et al* (2006) incidió positivamente en el módulo elástico de los morteros alcanzando los máximos valores con el 5% de adición con incrementos por encima del 200% con respecto al cemento sin adición. Para el 7% de adición de nanoalúmina los valores caen levemente (Figura 6a). En la resistencia a la compresión su efecto no fue tan notorio como sobre el módulo elástico, para 3 y 7 días los valores fueron levemente superiores a la muestra de referencia, pero para 28 días únicamente la muestra con el 7% de adición presentó un valor superior al de la referencia (Figura 6b).

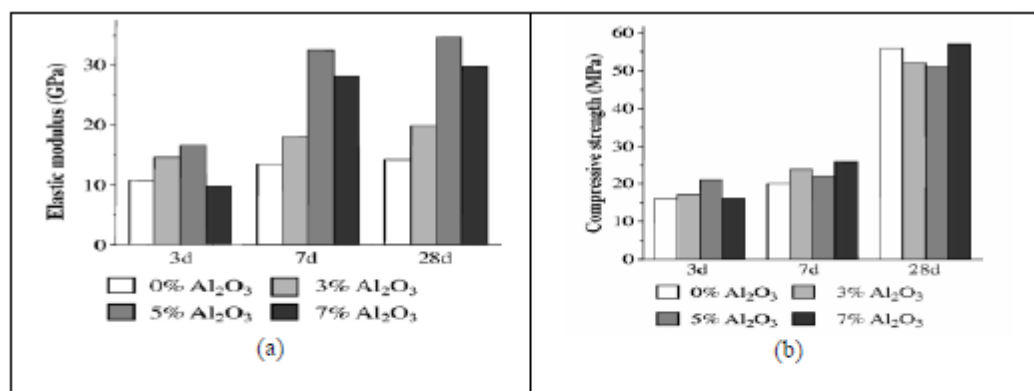


Figura 6. Módulo elástico (a) y resistencia a la compresión (b) con adición de nanoalúmina. Tomada de Li *et al* (2006).

Figure 6. Elastic modulus (a) and Compressive strength (b) of mortars blended with nanoalumina. Taken of Li *et al* (2006).

Una causa para la baja incidencia de la nanoalúmina en el desarrollo del cemento experimentado por Li *et al* (2006) es que utilizaron  $\alpha$ -alúmina que es un material de buena

cristalinidad, por lo cual su reactividad se ve seriamente disminuida. Además, es un material

grueso y de baja superficie específica en comparación de la NS.

Li, Wang & Zhao (2005) encontraron que después de 28 días de curado el uso de nanotubos de carbono mejora tanto la resistencia a la compresión (19%) como a la flexión (25%) de los cementos. Mientras que las fibras de carbono convencionales mejoraron la resistencia a la flexión (22%), pero la resistencia a la compresión la disminuyeron.

## 2.4 INCIDENCIA EN LA MINERALOGÍA

En general los diferentes autores han encontrado que al incrementar la adición de NS se reduce el número, el grado de cristalinidad y el tamaño de los cristales de portlandita (Qing *et al.* *in press*; Byung-Wan Jo *et al.* 2006; Ji, 2005; Björnström *et al.* 2004; Li *et al.* (2004)). Afirman además que la actividad puzolánica de la nano-SiO<sub>2</sub> es mayor que la del humo de sílice, esto es irrefutable conociendo que la actividad puzolánica depende de la composición (la sílice

es el compuesto más indicado por su afinidad química con el calcio y su posibilidad de formar silicatos de calcio – la NS es de un mayor pureza generalmente que la SF), baja cristalinidad, y superficie específica (donde la NS es mucho mayor). Por lo cual la NS puede reaccionar con los cristales de CH que se forman en ITZ y producir C-H-S, es decir, una estructura más estable. Así, la cantidad y tamaño de los cristales de CH se reducen significativamente y la resistencia a edades tempranas se incrementa.

En este sentido Qing *et al.* (*in press*) muestran como NS consume el CH (pico B en la Figura 7) reduciendo el tamaño de los cristales y afecta su forma con tan sólo un 3% de adición, como se aprecia al comparar las portlanditas grandes y hexagonales de la Figura 8a con las pequeñas y amorfas de la Figura 8b. Además, plantean que la NS puede disminuir la orientación de los cristales de CH más efectivamente que la SF, esto a partir del cálculo de las relaciones entre las intensidades de los picos (001) y (101).

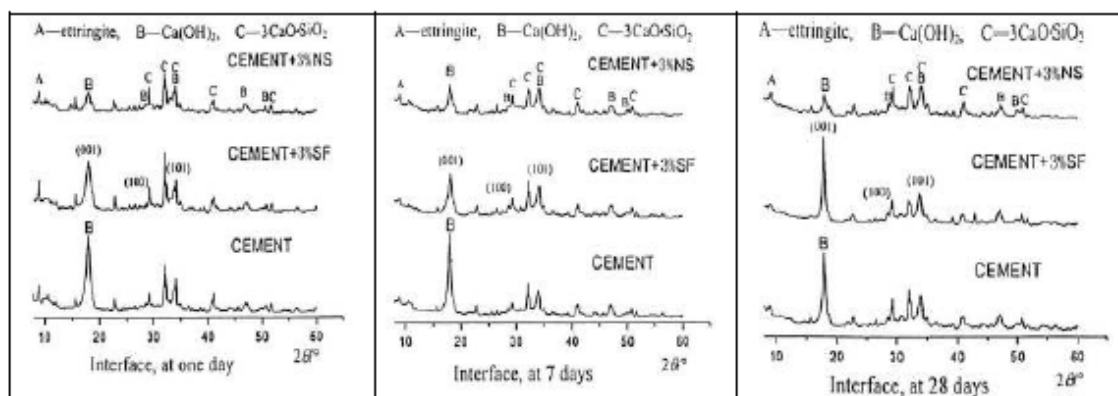
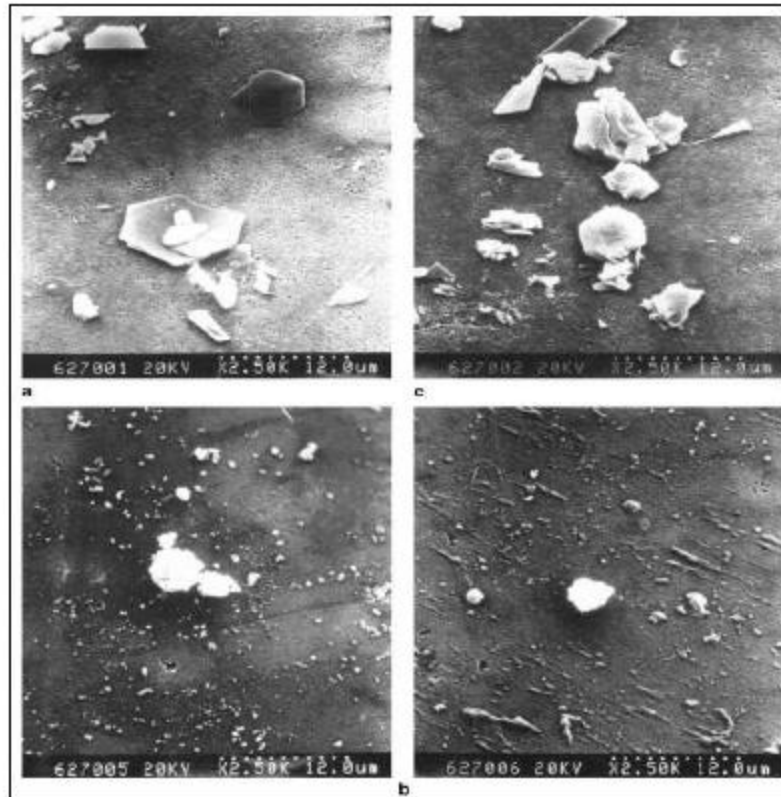


Figura 7. Asimilación del hidróxido de calcio con NS y SF. Tomada de Qing *et al.* *in press*  
 Figure 7. Variation of Ca(OH)<sub>2</sub> with NS and SF. Taken of Qing *et al.* *in press*



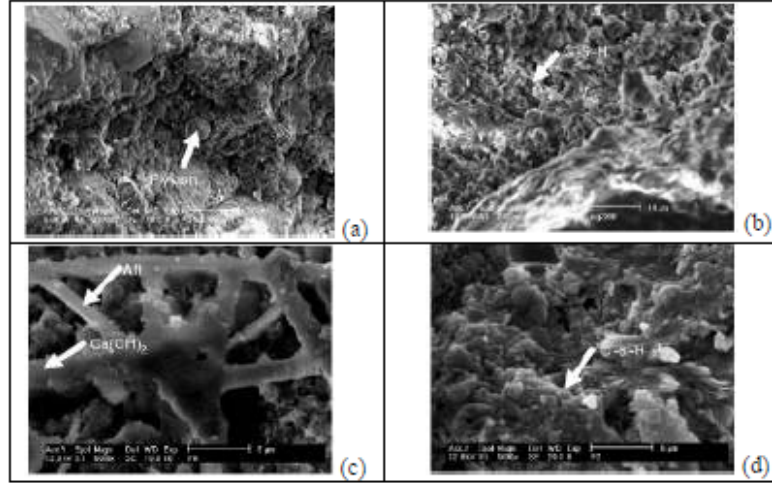
**Figura 8.** Microfotografía SEM del hidróxido de calcio a 28 días: (a) sin adición; (b) 3% de NS y (c) 3% de SF.  
Tomada de Qing *et al*, *in press*

**Figure 8.** SEM micrographs of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  at 28 days: (a) without addition; (b) 3% of NS and (c) 3% SF. Taken of Qing *et al*, *in press*

Björnström *et al* (2004) muestran que con la adición de la sílice coloidal se acelera la disolución de C3S (alita) y se incrementa la tasa de polimerización de C-S-H durante las primeras etapas de la hidratación (4 – 12 horas), lo que se traduce en un desarrollo más rápido de HC. Después de las 12 horas el desarrollo de portlandita se equipara para el cemento con y sin adición.

Li *et al* (2004), encuentran que con las nanoadiciones la textura de los productos de

hidratación fue más densa y compacta y no se presentaron cristales grandes de HC. En el mismo sentido Ji (2005) afirma que la presencia de NS acelera la reactividad de la ceniza volante en los concretos normales, hace al concreto más denso y compacto y desaparece los cristales grandes de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y Aft (Figura 9). Como se ven en la Figura 9b con la adición de NS las partículas de FA desaparecen y en la Figura 9d desaparecen los cristales de CH y Aft y el material toma un aspecto más denso.



**Figura 9.** (a) concreto normal 28 días de curado; (b) concreto adicionado con NS a 28 días de curado; (c) concreto normal 180 días de curado; (d) concreto adicionado con NS a 180 días de curado. Tomada de Ji (2005).  
**Figure 9.** (a) normal concrete at curing age of 28 days; (b) concrete blended with NS at curing age of 28 days; (c) normal concrete at curing age of 180 days; (d) concrete blended with NS at curing age of 180. Taken of Ji (2005)

Li, Wang & Zhao (2005) encontraron que con la adición de nanotubos de carbono la porosidad y el tamaño de los poros se redujo, haciendo la estructura más compacta.

## 2.5 PORCENTAJE DE ADICIÓN

En el caso de la NS se puede afirmar que no hay consenso en cual es el porcentaje más apropiado de adición. Hay autores que plantean que son mejores los porcentajes bajos de adición como Shih, Chang & Hsiao (2006) quienes proponen 0.6% como el porcentaje óptimo de adición de NS, para alcanzar la máxima resistencia a la compresión. Li, Zhang & Ou (2006) quienes encontraron los mejores resultados de resistencia a la flexión y a la compresión con el 1% de adición de NS y NT y Qing et al. (*in press*) quienes dicen que con un 3% es suficiente para lograr una buena asimilación del HC. Del otro lado, están los que recomiendan porcentajes más altos como Byung-Wan Jo et al (2006) y Li et al (2004) quienes encuentran mejoras significativas con adiciones cercanas al 10% de NS.

Dadas las características físicas de la nanosilice parecería más aconsejable utilizar porcentajes

bajos (no superiores al 5%) dado que con el incremento en el porcentaje de esta adición se incrementa la demanda de agua, se dificulta la homogeneización de la mezcla, se genera mayor calor de hidratación y los costos de producción se disparan.

Para el óxido de hierro (Li et al, 2004) recomiendan no superar el 10% de adición porque se empieza a tener una incidencia negativa sobre el desarrollo de resistencias mecánicas. Sin embargo, de acuerdo con los datos de ellos parecería que el valor óptimo está es alrededor del 3% porque con esta adición se obtienen un incremento del 26% en la resistencia a 28 días, mientras que con el 10% de adición de nanohierro se obtiene un incremento apenas del 3.7% en la resistencia a 28 días, por esto parece más aconsejable utilizar menor cantidad que implica mayores resistencias a menores costos

Para la nanoalúmina (Li et al, 2006) encontraron que los mejores módulos elásticos se obtenían con el 5% de adición y que caían con el 7%, pero que para las resistencias a la compresión sólo el 7% fue superior a la muestra patrón a los 28 días de curado.

## 2.6 MECANISMO DE ACCIÓN

Los mecanismos propuestos de los fenómenos que ocurren al incorporar las nanopartículas de sílice en el cemento se pueden recoger de la siguiente manera:

- Estas actúan como núcleos durante el proceso de hidratación gracias a su alta energía superficial y a la actividad de los átomos en su superficie que le permiten generar muchos más sitios de nucleación para la formación de los productos de hidratación. Lo cual se traduce en una mejora de la adherencia del cemento hidratado y aumento de la cinética de hidratación del cemento, lo cual es favorable para la resistencia de los morteros (Qing et al, *in press*; Li et al, 2004; Li, Xiao & Ou, 2004; Björnström et al, 2004).
- Las nanopartículas entre los productos de hidratación pueden absorber rápidamente o reaccionar para impedir el crecimiento de los cristales, tales como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y AFm, que se forman especialmente en ITZ durante el proceso de hidratación y que van en detrimento de la impermeabilidad del producto y se espera que su durabilidad mejore también. Que estos cristales sean pequeños los hace favorables para la resistencia de las pastas de cemento. Además, la nano- $\text{SiO}_2$  participa en el proceso de hidratación para generar C-S-H a través de la reacción con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y del aceleramiento del proceso de hidratación, este C-S-H llena los espacios vacíos de la ITZ para mejorar la densidad, la cohesión y la impermeabilidad. Por otro lado, la NS puede rellenar los vacíos de C-S-H haciendo a la matriz más densa, mejorando la integración y estabilidad de los productos de hidratación. (Ji, 2005; Li, Xiao & Ou, 2004)
- La tercera razón, es que las nanopartículas rellenan los poros del cemento densificando la matriz y disminuyendo la porosidad y permeabilidad de pastas y morteros, esto a su vez incrementa la resistencia, tal

como lo hace el humo de sílice (Li, Xiao & Ou, 2004). Algo similar encontraron Wen-Yih Kuo y sus colaboradores (2005) al utilizar montmorillonitas órgano-modificadas y verificar que la permeabilidad se reducía hasta en 100 veces. Se debe resaltar que las montmorillonitas son micro partículas y no nanopartículas por lo cual sólo alcanzan a penetrar en poros hasta de 0.1  $\mu\text{m}$ , esto da una idea del orden de magnitud que se podría alcanzar en este tópico con las nanopartículas

Li et al (2006) explican la acción de la nanoalúmina de la siguiente manera: “justo después del mezclado, los agregados son encapsulados por el agua y hay una relación agua/cemento alta sobre la superficie de la arena. Por causa de la alta relación a/c y el espacio limitado crecen grandes cristales de hidratos alrededor de la arena y una red estructural inestable sobre su superficie. Así, los morteros poseen más poros en la ITZ (*Interfacial Transition Zone*) que en la matriz... las nanopartículas de alúmina poseen alta energía superficial por lo cual un muchas de ellas son absorbidas sobre la superficie de la arena, por las fuerzas de van Der Waals, relleno los poros, mejorando la red estructural, incrementando el grado de densidad de ITZ y como resultado el módulo elástico de los morteros se incrementa”

Li, Wang & Zhao (2005) explican la mejoría en las propiedades mecánicas al usar nanotubos de carbono como una mejora en la microestructura gracias a que los nanotubos de carbono actúan como un puente a través de los poros y las grietas (garantizando la transferencia de carga en caso de tensión) y a que estos son cubiertos por la tobermorita, lo que indica que hay una buena adherencia entre los nanotubos y la matriz del cemento

## CONCLUSIONES

Gracias a sus características físicas las nanopartículas, especialmente la nano- $\text{SiO}_2$ , presentan una alta actividad puzolánica

acelerando la formación de tobermorita (C-H-S) y el proceso de hidratación.

La mayoría de investigadores aceptan que al incrementar el contenido de nanopartículas en un cemento Portland se obtiene una mejora sustancial en el desarrollo de resistencias a la compresión y que se reduce el número, el grado de cristalinidad y el tamaño de los cristales de portlandita. La contradicción está en el tiempo y en el porcentaje de adición recomendado. En el caso de la nano-SiO<sub>2</sub>, mientras algunos plantean que esto ocurre a edades tempranas (3 días) otros hablan hasta de 56 y 180 días. Con el porcentaje de adición algunos proponen que debe estar por debajo del 1% y otros alrededor del 10%.

Lo más aconsejable parecería utilizar porcentajes bajos de nanopartículas (no superiores al 5%) dado que con el incremento en el porcentaje de está adición se incrementa la demanda de agua, de superplastificante, la liberación de calor y la aparición de microfisuras y se disminuya la trabajabilidad y los costos de producción se disparan

Las mezclas de nanopartículas con adiciones micrométricas parecen ser efectivas a la hora de mejorar desempeño de los morteros y disminuir costos.

Poco se ha trabajado en los temas de las posibles modificaciones que ocurren en la mineralogía de las pastas del cemento y en la durabilidad de los morteros a causa de la incorporación de estos nuevos materiales. Además, se pudieron identificar otros vacíos en el conocimiento de este tema como son: la definición de los mecanismos de interacción de las nanopartículas con el cemento Portland durante el proceso de hidratación (química de superficie), porcentaje óptimo de adición de las nanopartículas y su real aporte a las resistencias mecánicas.

## REFERENCIAS

[1] ATIS, C. D. Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete and influence of curing condition. *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 1112– 1121.

[2] BLANCO A., F. Tecnología de cementos. Universidad de Oviedo. España, 1995.

[3] BJÖRNSTRÖM J., MARTINELLI A., MATIC A., BÖRJESSON L. and PANAS I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letter*, 392. 2004. P. 242 – 248.

[4] BYUNG-WAN JO, CHANG-HYUN KIM, GHI-HO TAE & JONG-BIN PARK. Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles. *Construction and Building materials*. 2006. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Consultado en agosto de 2006.

[5] CALLEJA CARRETE JOSÉ. La Portlandita -hidróxido de calcio- y la Tobermorita -silicatos de calcio hidratados- de la pasta de cemento: tratamiento estequiométrico de sus comportamientos. En: *Cemento Hormigón – Barcelona*, 2001.-- Vol 72. No 824. 2001. P. 526-542

[6] COLLEPARDI, M.; COLLEPARDI, S.; SKARP, U. and TROLI, R. Optimization of silica fume, fly ash and amorphous nano-silica in superplastized high-performance concretes. *Proceeding of eighth CANMET/ACI International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete*, Las Vegas, USA, 23-29 May, 2004. pp. 495 - 506

[7] COLLEPARDI, S.; BORSOI, A.; OLAGOT, J. J. O.; TROLI, R. and COLLEPARDI, M. Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC. 2005.

[8] CHINDAPRASIRT, P., JATURAPITAKKU L., CH. and SINSIRI, TH. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement & Concrete Composites* 27. 2005. P. 425–428.

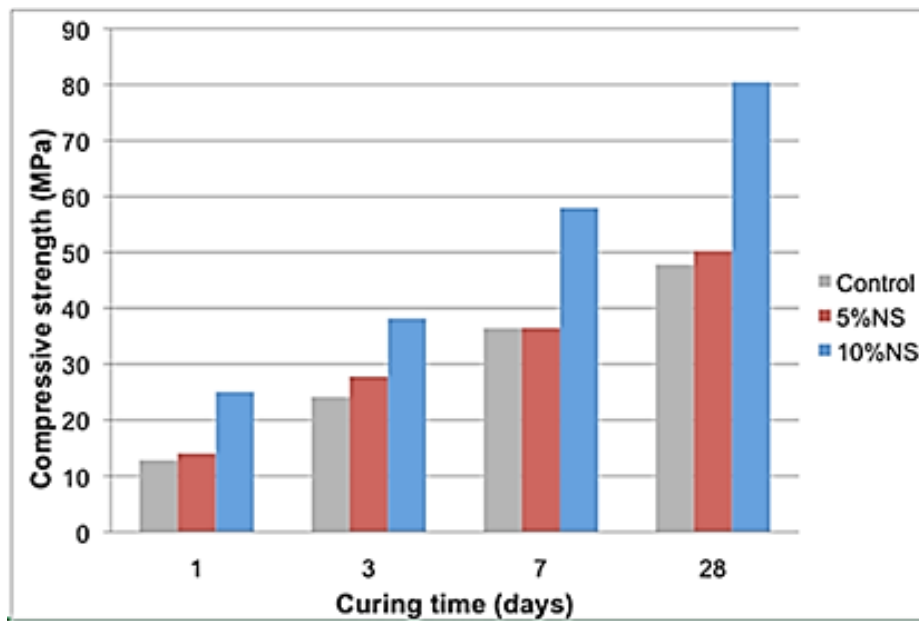
[9] ETSUO SAKAI, SHIGEYOSHI MIYAHARA, SHIGENARI OHSAWA, SEUNG-HEUN LEE, MASAKI DAIMON. Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 1135– 1140.

[10] FENG, Q.; YAMAMICHI H.; SHOYA M. & SUGITA S. Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and Concrete Research* 34. 2004. P. 521–526

- [11] GANJIAN, E. and SADEGHI, H. Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone. *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 1332-1343
- [12] GINEBRA, M.; DRIESSENS, F. & PLANELL J. Effect of the particle size on the micro and nanostructural features *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 680- 687
- [13] HEWLETT, P. C. *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4<sup>th</sup> ed. Oxford, 1998. 1057
- [14] JATURAPITAKKUL CH, KIATTIKOMOL K, SATA V, LEEKEERATIKUL T. Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete. *Cement and Concrete Research* 34. 2004. P. 549-555
- [15] JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S. AND CISSE, I. K. Properties of cement—rice husk mixture. *Construction and Building Materials* 17. 2003. P. 239-243
- [16] JI, TAO. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 1943 - 1947.
- [17] KALINSKI, M. E AND HIPPLEY, B. T. The effect of water content and cement content on the strength of portland cement-stabilized compacted fly ash. *Fuel* 84. 2005. P. 1812-1819.
- [18] KNÖFEL, D. Relationships between chemism, phase content and strength in Portland cements. *En Zement-Kalk-Gips*. Wiesbaden, 32 (9). 1979. P. 446-456.
- [19] LI, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research* 34. 2004. P. 1043 - 1049.
- [20] LI, G. Y.; WANG, P. M. & ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon* 43. 2005. P. 1239 - 1245.
- [21] LI, H.; XIAO, H. & OU, J. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research* 34. 2004. P. 435-438.
- [22] LI, H.; XIAO, H.; YUAN, J & OU, J. Microstructure of cement mortar with nanoparticles. *Composite Part B: engineering* 35. 2004. P. 185 - 189.
- [23] LI, H.; ZHANG, M. & OU J. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear* 260. 2006. P. 1262 - 1266
- [24] LI, Z.; WANG, H.; HE, S.; LU, Y and WANG M. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters* 60. 2006. P. 356-359.
- [25] McCARTHY, M.J. & DHIR, R.K. Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel* 84. 2005. P. 1423-1432.
- [26] MOSTAFA, N.Y. AND BROWN, P.W. Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. *Thermochimica Acta* 435. 2005. P. 162-167.
- [27] PAYÁ, J.; MONZO, J and BORRACHERO, M.V. Mechanical treatment of fly ashes: Part III. Studies on strength development of ground fly ashes. *Cement and Concrete Research*. 27 (9). 1997. P. 1009 - 1377.
- [28] PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E and AMAHJOUR F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research* 31. 2001. P. 41-49.
- [29] POON, C. S.; LAMA, L.; KOU, S.C.; WONG, Y. L. AND WONG, R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research* 31. 2001. P. 1301-1306.
- [30] QING, Y.; ZENAN, ZH.; DEYU, K. & RONGSHEN, CH. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*. In press. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Consultado en enero de 2006.
- [31] RAZAK, H. and WONG H.S. Strength estimation model for high-strength concrete incorporating metakaolin and silica fume. *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 688- 695
- [32] RICHARDSON, I.G. Tobermorite/jennite - and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, h-dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag.

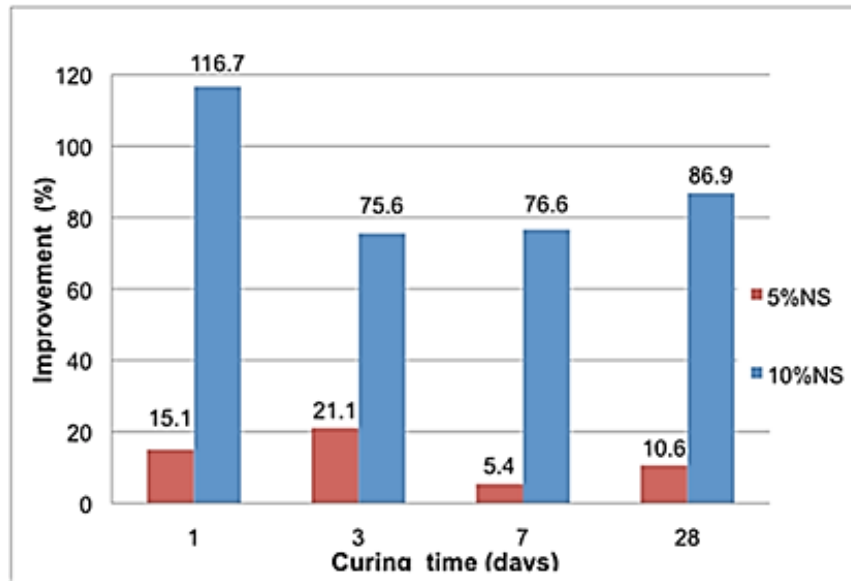
- metakaolin, or silica fume. *Cement and Concrete Research* 34. 2004. P. 1733–1777.
- [33] SHIH, J. Y., CHANG, T. P. & HSIAO, T. Ch. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering A* 424. 2006. P266 – 274.
- [34] TANGPAGASIT, J., CHEERAROT, R., JATURAPITAKKUL, Ch. & KIATTIKOMOL, K. Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research* 35. 2005. P. 1145–1151.
- [35] TAYLOR, H. F. W. *Química de los cementos*. Ediciones URMO, Portugal. 1967. Volúmenes I y II.
- [36] TAYLOR, H. F. W. Nanostructure of C-S-H: current status. *Adv Cem Bas Mater.* 1. 1993. P 38 – 46.
- [37] TOBÓN, J. I. Una mirada a algunas industrias. Trabajo de Promoción - Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2000.
- [38] WEN-YIH KUO, JONG-SHIN HUANG, CHI-HSIEN LIN. Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. *Concrete and cement Research* (2005). Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Consultado en enero de 2006.
- [39] ZHANG, XZ. Nanostructure of calcium silicate hydrate gels in cement paste. *Journal American Ceramic Society.* 83 (10).

## Anexo B Resistencia a la Compresión vs Tiempo de curado<sup>72</sup>.



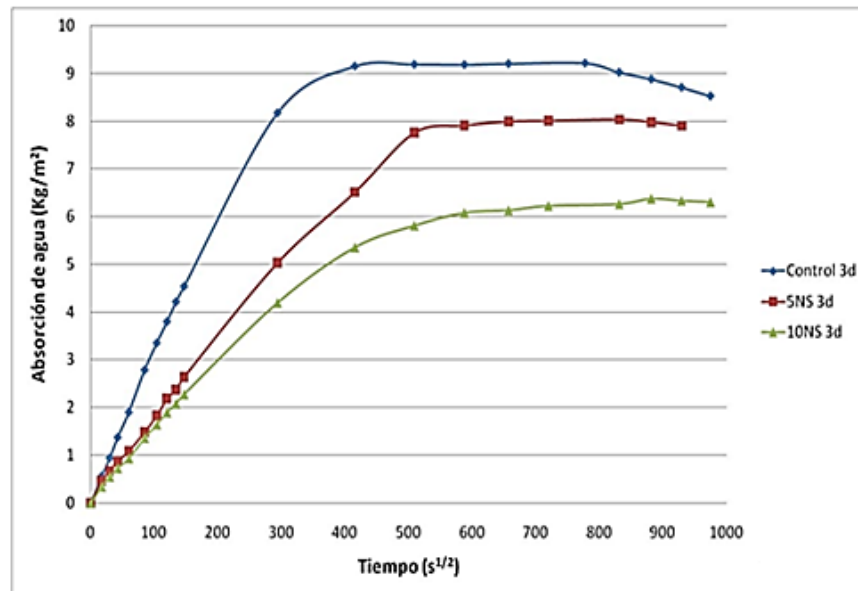
<sup>72</sup> Fuente: JORGE IVAN TOBON, OSCAR RESTREPO, JORGE JUAN PAYA, "Comparative analysis of performance of portland cement blended with nanosilica and silica fume". En: Colombia, Dyna ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombia v.77 fasc.163 p.37 - 43, 2010

### Anexo C. Mejoría vs Tiempo de curado<sup>73</sup>.



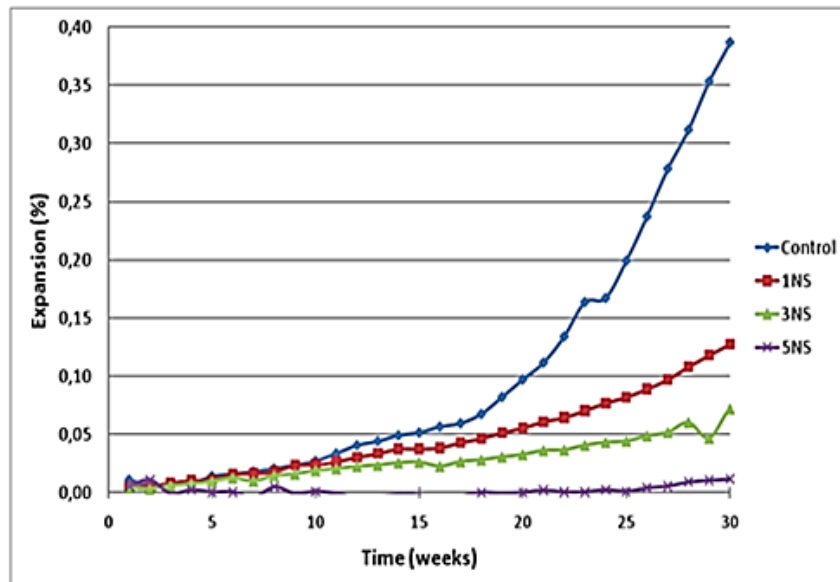
<sup>73</sup>Fuente: JORGE IVAN TOBON, OSCAR RESTREPO, JORGE JUAN PAYA, "Comparative analysis of performance of portland cement blended with nanosilica and silica fume". En: Colombia, Dyna ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombia v.77 fasc.163 p.37 - 43, 2010

## Anexo D Absorción de agua vs Tiempo<sup>74</sup>.



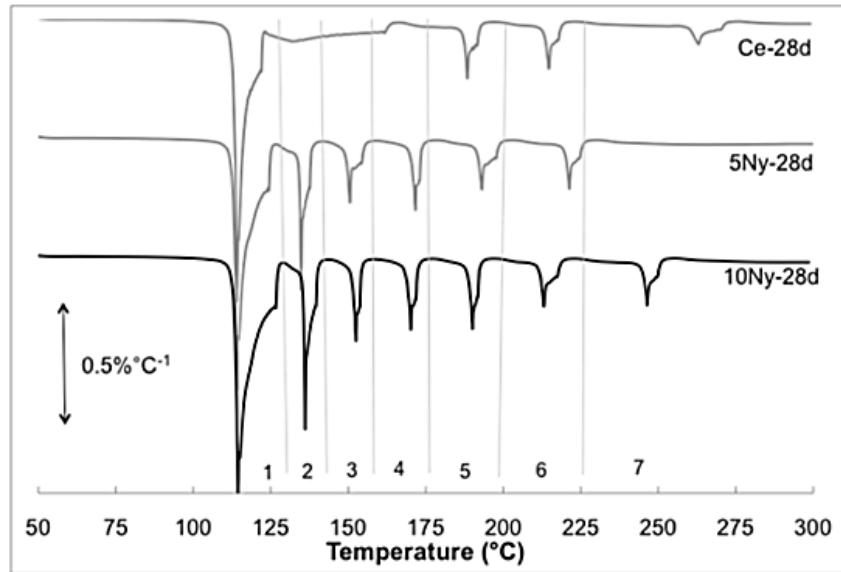
<sup>74</sup>Fuente: JORGE IVAN TOBON, OSCAR RESTREPO, JORGE JUAN PAYA, "Comparative analysis of performance of portland cement blended with nanosilica and silica fume". En: Colombia, Dyna ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombia v.77 fasc.163 p.37 - 43, 2010.

## Anexo E Expansión (%) vs Tiempo<sup>75</sup>.



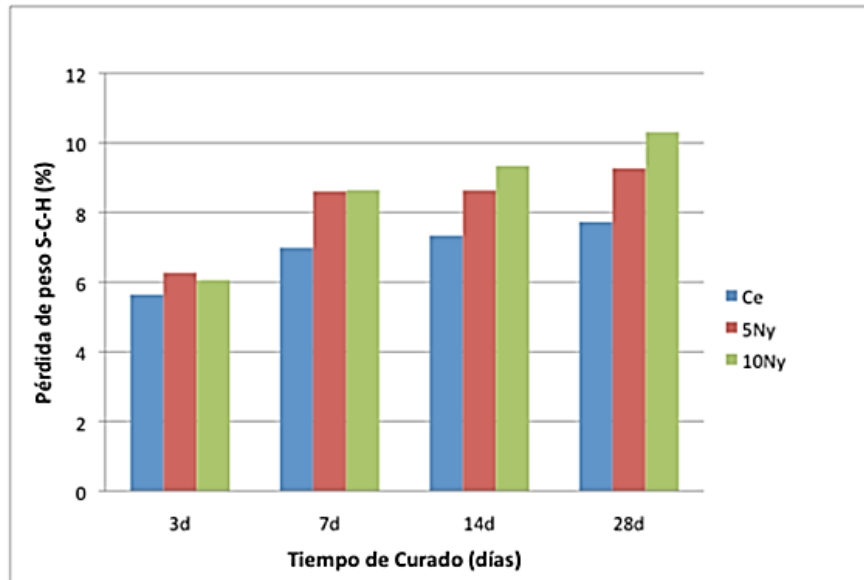
<sup>75</sup>Fuente: JORGE IVAN TOBON, OSCAR RESTREPO, JORGE JUAN PAYA, "Comparative analysis of performance of portland cement blended with nanosilica and silica fume". En: Colombia, Dyna ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombia v.77 fasc.163 p.37 - 43, 2010.

## Anexo F Termogravimetría (DTG)<sup>76</sup>.



<sup>76</sup>Fuente: JORGE IVAN TOBON, "Determination of the optimum parameters in the high resolution thermogravimetric analysis (HRTG) for cementitious materials" , En: *Hungría Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry* ISSN: 13886150 ed: Kluwer Academic Publishers v.107 fasc.N/A p.233 - 239 ,2012.

**Anexo G Pérdida de peso S-C-H (%) vs Tiempo de curado<sup>77</sup>.**



<sup>77</sup>Fuente: JORGE IVAN TOBON, OSCAR RESTREPO, JORGE JUAN PAYA, "Comparative analysis of performance of portland cement blended with nanosilica and sílica fume".En: Colombia, Dyna ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombiav.77 fasc.163 p.37 - 43 ,2010.

## **Anexo H. Artículo Un futuro prometedor para el concreto.**

### **UN FUTURO PROMETEDOR PARA EL CONCRETO**

Angélica María Quintero Ortiz<sup>78</sup>, Luis Alberto Capacho Silva<sup>79</sup>.

#### **RESUMEN**

El presente artículo da a conocer la magia de los concretos del futuro, algunos de los cuales ya están en el mercado. Específicamente en el concreto, el estudio a escala nano permite, lograr mayor información sobre procesos críticos como la hidratación del cemento, la obtención de resistencia y la formación de fisuras, lo cual llevar a producir mejoras, predecir comportamientos y controlar virtualmente todas las propiedades y características del material. En este campo ha tenido gran avance la industria de aditivos químicos para el concreto mientras que los desarrollos nanotecnológicos se han venido implementando en determinadas mezclas especiales, desarrollos que en muchas ocasiones son imperceptibles a los ojos quienes no estén familiarizados con el tema.

**Palabras Clave:** nanotecnológicos, aditivos químicos, fisuras, hidratación.

#### **ABSTRACT**

This article reveals the magic of the concrete of the future, some of which are already on the market. Specifically in particular, allows nano-scale study, achieve more on critical processes such as cement hydration, obtaining resistance and cracking, which lead to produce improvements, predict behavior and control virtually all the properties and material properties. This field has the industry breakthrough chemical additives for concrete while nanotechnological developments have been implemented in certain special mixtures, developments that are often invisible to the eye those unfamiliar with the subject.

**Keywords:** nanotechnology, chemical additives, cracks, hydration.

---

<sup>78</sup>Estudiante de ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.Colombia. [angiemq24@hotmail.com](mailto:angiemq24@hotmail.com).

<sup>79</sup>Ingeniero Civil, M. SC. Profesor Adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Colombia. [lcapacho@gmail.com](mailto:lcapacho@gmail.com).

## INTRODUCCION

Más de un siglo después de haber sido inventado, el concreto sigue siendo el material de construcción más utilizado a nivel mundial, y el desarrollo no se detiene. Son admirables los avances tecnológicos que ha experimentado desde cuando se dieron sus primeros usos, tanto que se ha logrado adaptar a gran cantidad de aplicaciones en todo el planeta. Concretos con fibras, de resistencia acelerada, de baja permeabilidad, bombeables y autocompactantes, son algunos de los muchos tipos de mezclas que hace cien años eran impensables y hoy se consiguen con facilidad en el mercado. Sin embargo, siguen siendo sorprendentes algunos avances que se avizoran en el futuro del material y que abren puertas hacia nuevas aplicaciones o hacia mejoras importantes en los usos ya conocidos. A continuación se presenta un resumen de unos cuantos desarrollos e innovaciones que ya están disponibles, que lo estarán en el futuro cercano o que están en etapa experimental y pueden materializarse algún día.

### Concretos dúctiles y autorreparables



**Figura 1.** Fibras sintéticas para el refuerzo del concreto

La ductilidad es una propiedad que permite a los materiales deformarse sin

romperse. El concreto no es considerado tradicionalmente un material dúctil. Para producir mejoras en esta propiedad, es indispensable en ciertas aplicaciones, por lo general se utilizaban fibras de acero, vidrio o polímeros. Sin embargo, luego de más de 15 años de investigaciones, la Universidad de Michigan ha logrado producir concretos dúctiles, que tienen casi 300 veces la resistencia de los concretos normales antes de romperse: es decir, estos concretos pueden doblarse prácticamente en “U”. Los investigadores encontraron una manera eficiente de transferir la carga de la matriz de mortero hacia las fibras de refuerzo, de manera gradual y ordenada. Tales concretos no utilizan agregados gruesos sino arena muy fina, cenizas volantes y microfibras.

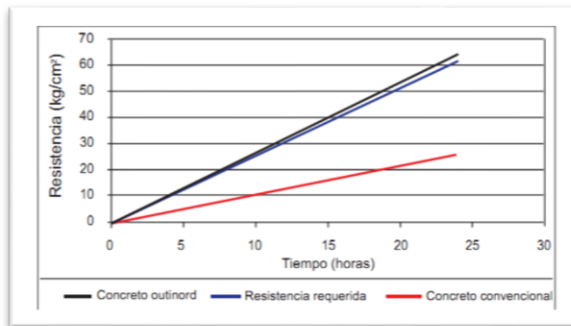
Como ventaja adicional, son concretos que tienen la propiedad de autorreparar sus grietas y sellarlas de nuevo aunque, de acuerdo con los experimentos de la Universidad de Michigan, las grietas no deben ser mayores de 150 micrómetros.

El concreto dúctil es un desarrollo existente y tiene aplicaciones en pavimentos, puentes, concretos arquitectónicos y reparaciones.

### Concretos de resistencia a temprana edad

La necesidad de la construcción actual son más exigentes y requieren tiempos de colocación y desencofrado mucho menores. Ya existen concretos que ofrecen tiempos de manejabilidad de dos horas para su colocación y, no obstante lo anterior cuatro horas después los elementos fundidos pueden ser desencofrados o dados al servicio. En los concretos convencionales es difícil combinar un buen tiempo de manejabilidad con altas resistencias iniciales, pero en estas nuevas mezclas

el problema ya se resolvió. Serán muy útiles en todo tipo de obras que requieren utilizar formaletas.



**Figura 2.** Grafica comparativa del desarrollo de resistencia, entre un concreto convencional y un concreto de resistencia a edad temprana.

**Concretos aislantes**

La creciente mundial por la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible exigen edificaciones de mayor eficiencia energética. Gracias al desarrollo tecnológico de la industria del concreto, hoy en día es posible aplicar diversas estrategias de diseño de mezcla. Tales como la inclusión de altos contenidos de aire o el uso de agregados extremadamente livianos (riolita, espuma de poliestireno, entre otros), para lograr concretos que mejoran las capacidades de aislamiento térmico y acústico. De esta manera es posible mantener a temperatura estable el interior de los edificios son consumir mas electricidad que la necesaria para operar.

**Concretos descontaminantes**

Son concretos capaces de transformar los agentes contaminantes en la atmosfera en productos neutros para el ambiente. Existen dos desarrollos en este campo: el primero de ellos se basa en el principio aplicado en sectores como el vidrio o la cerámica de reaccionar con la luz solar. Específicamente en el concreto, una empresa italiana ha podido incorporar un

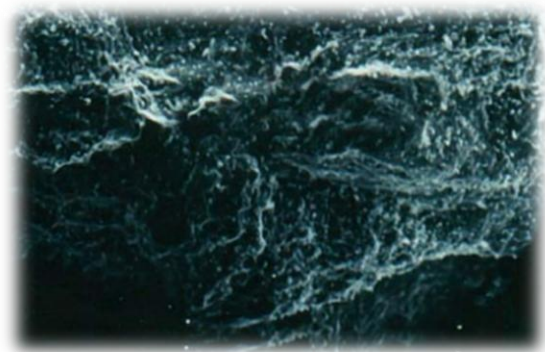
principio activo del cemento para generar una reacción fotocatalitica en las superficies hechas con ese material, luego de una investigación cuyo costo supero los cinco millones de euros, el resultado ha demostrado que con recibir radiación solar durante tres minutos, una superficie tratada con el agente fotocatalitico es capaz de reducir hasta en 75% los agentes contaminantes en contacto con ella ( sustancias nocivas como los óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles como benceno, tolueno, producidos por la actividad humana). Estos materiales ya se han utilizado en el aeropuerto parisino de charles de Gaulle. Durante las pruebas se pavimento una calle en la ciudad de Segrate, Italia, donde se midió una reducción cercana al 60% de los gases de oxido de nitrógeno.



**Figura 3. Iglesia del Jubileo en Roma.**

Construida en concreto blanco con un aditivo especial de dióxido de titanio, que además de preservar la blancura, es altamente reactivo cuando se expone a los rayos ultravioleta del sol. Esta reacción mata las bacterias y hongos que puede afectar la superficie del material además tiene la capacidad de eliminar otros contaminantes que suelen oscurecer el concreto con el tiempo.

## Concretos para el espacio



**Figura 4.** Muestra de concreto para el espacio.

Desde 1989, la NASA encargó al laboratorio CTL de Estados Unidos una simulación de mezclas de concreto utilizando materiales que una de las misiones Apolo halló en el suelo lunar. CTL realizó varias pruebas y encontró que es factible desarrollar cemento con el suelo de la Luna, pero con una gran barrera: no habría agua para fabricar el concreto y construir bases lunares con materiales producidos localmente.

Con planes de llegar hasta Marte utilizando primero una base lunar, y tras el descubrimiento de hielo en la Luna hecho por la NASA en Octubre de 2009, se abrió de nuevo la posibilidad de producir concreto para una instalación en el satélite. El material sería ideal por la protección que ofrece frente a radiaciones solares y las condiciones extremas que reina allí. Las mezclas experimentales encontraron que las resistencias en promedio con los materiales lunares rondarían los 10.000 psi luego de un curado de 24 horas a 82 °C. La mezcla se haría forzando un proceso de hidratación del cemento mediante inyecciones de vapor a alta presión.

## CONCLUSION

Muchos de los avances tecnológicos descritos en este artículo son, en mayor o menor medida, una respuesta tecnológica a la creciente necesidad de mezclas de concreto que combinen mejoras técnicas con los requerimientos de sostenibilidad y minimización del impacto ambiental. Los concretos de alto desempeño mencionados anteriormente no son solamente de alta dureza, se debe primero saber y entender que se va a construir como se va a construir y como hacerlo durable. El desafío final es reducir la cantidad de Clinker y Dióxido de carbono.

## BIBLIOGRAFIA

- Arbelaez German. Durabilidad en materiales Cementicios. Seminario Internacional, México, 2010, pp.185.
- Jaramillo David., Revista Construcción y tecnología, 2009, pp24.
- Cardona, B., Gómez. Obtención de fases del cemento utilizando desechos agrícolas e industriales. Ciencia UANL, Abril 2008.
- R. Jauberthie, F. Rendell. Construction and Building Materials. Vol. 14 (2008), pp. 41-43.
- S.K. Agarwal. Cement and Concrete Research. Vol. 36 (2006); pp. 17-19.
- Roy, K.H., Improving Concrete Durability with Cementitious Materials., Concrete International, Vol. 23, 2009, pp. 47-51.
- ACI Committee 201., Quid to durable concrete., American Concrete Institute, Report of ACI Committee, Detroit, 2005, pp.37.
- Bentz, D. P., Clifton, J. R., Ferraris, C. F., Transport properties and Durability of concrete: Literature Review and Research., 2007.