



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ARQUITECTURA

CONCRETO NANOTECNOLÓGICO
RESISTENCIA MECÁNICA DE CEMENTOS
REFORZADOS CON PARTÍCULAS
SUBMICROMÉTRICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA

P R E S E N T A :

ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ



México, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍA

Concreto Nanotecnológico
**Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados
con Partículas Submicrométricas**

Alberto Muciño Vélez

México, D.F. 2010





INSTITUTO DE FÍSICA DE LA UNAM

El trabajo de investigación asociado a la Tesis de Maestría cuyo título fue "**Concreto Nanotecnológico**, Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas Submicrométricas", fue realizado en los Laboratorios del Instituto de Física de la UNAM, bajo la dirección del Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza y el Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz.

JURADO

Director de Tesis:

Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Sinodales:

Mtro. en Arq. Francisco Reyna Gómez

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Mtro. en Dis. Arq. Jan Van Rosmalen Jansen

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza

Instituto de Física de la UNAM

Dra. Lucia Graciela Díaz Barriga Arceo

Instituto Politécnico Nacional y Facultad de Ingeniería de la UNAM.

CONTENIDO

Introducción	4
Hacia la creación de nuevos materiales que se utilizan principalmente en la construcción.	
I. Hipótesis	6
II. Objetivos Generales	6
III. Objetivos Particulares	6
IV. Marco histórico del Cemento	7
V. Efectos sobre el Medio Ambiente (Fabricación del Cemento)	8
VI. Efectos Globales de Contaminación	9
Capítulo I	
1.1 Estado del Arte (Nanotecnología)	11
1.1.1 Alcances y Limitaciones	11
1.1.2 El Cemento Nanotecnológico y la Arquitectura	13
1.2 Generalidades sobre Materiales de Construcción (Relacionados con el Cemento)	12
1.2.1 Propiedades del Material de Construcción (Cemento)	14
1.2.2 ¿Qué se entiende por concreto u hormigón? Mortero	15
1.2.3 Usos del mortero	16
1.3 Materiales que constituyen al concreto	16
1.3.1 Cemento	16
1.3.2 Proceso de fabricación del cemento	17
1.3.3 Cemento Portland	19
1.3.4 Agua para formación del Cemento	20
Capítulo II	
La evolución de un Nuevo Material en beneficio de la Arquitectura	
2.1. Enfoque Científico de la Nanotecnología	22
2.2 Nanociencia y Nanotecnología (Una Aproximación)	23
2.3 Medios para la Fabricación de Nanoestructuras	24
2.4 La Nanotecnología en el Concreto	25

Capítulo III

Creación del Material: Cemento Nanotecnológico

3.1. Datos Generales	27
3.2. Material: Cemento Portland	27
Generalidades	27
Historia	27
Fabricación	28
Extracción y triturado de la materia prima	28
Mezclado y reducción de la materia prima hasta una finura similar a la de la harina	28
Cocción de la harina y transformación en clinker	29
Molienda del clinker con yeso y aditivos	29
3.3 Composición Química del Cemento Portland	29
Hidratación del Cemento	31
El Agua en la hidratación	31
3.4 Microestructura durante el proceso de hidratación	32
Fase inicial	32
Fase intermedia	32
Fase final	32
3.5 Microestructura del cemento hidratado	33
Porosidad capilar e intersticial	34
Resistencia intrínseca del gel	34
3.6 Microestructura del cemento hidratado	35
Influencia de la temperatura de curado en el proceso de hidratación	35

Capítulo IV

Metodología Experimental

4.1 Material y Método	37
4.1.1 Preparación de la Muestra	37
4.1.2 Materiales	39
Cemento	39
Fosfato Tricalcico (TCP)	39
Agua Desionizada	40
Nanotubos de Titanio	41
4.2 Análisis	42

Capítulo V

Resultados Preliminares

<u>5.1 Pruebas Mecánicas</u>	<u>44</u>
<u>5.2 Micrografías</u>	<u>44</u>
Micrografías a Cemento Simple	<u>46</u>
Micrografías de Cemento-Agua (Cemento Básico)	<u>46</u>
Micrografías Cemento-TCP 5% en Polvo	<u>47</u>
Difractogramas a Polvos Empleados	<u>47</u>
Pruebas de Compresión a Distintos Tiempos de Endurecimiento	<u>55</u>

Capítulo VI

Discusión de Resultados

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Anexo I

Artículo The Chemistry and Physics of Nano-Cement

Anexo II

Elaboración de Pruebas Desecadas

Anexo III

Comentario sobre las Implicaciones Medioambientales de los Nuevos

Materiales Nanotecnológicos

INTRODUCCIÓN

Hacia la creación de nuevos materiales que se utilizan principalmente en la construcción.

Los estilos y tendencias acontecidos en la historia de la arquitectura, las formas arquitectónicas construidas resultantes, son producto de dos factores fundamentales: su habitabilidad (fin causal) y el espacio (materia prima arquitectónica), los cuales no podrían materializarse sin la utilización de un proceso especificado llamado Composición-Espacio-Edificatoria.^[1] En la historia de la humanidad, el fin causal siempre fue el mismo, hasta la revolución industrial cuando cambio principalmente la forma de interpretación del espacio y su procedimiento específico de creación. Por ejemplo, las viviendas alcanzaron mayor salubridad al reemplazarse la madera y la paja por materiales mas duraderos y, aun mas, al producirse la separación entre vivienda y trabajo.

La revolución industrial modificó la técnica constructiva, de un modo menos agresivo que en otros sectores; como lo fue la llegada de materiales tradicionales como la piedra, el ladrillo, la madera, que eran trabajados de manera mas racional y distribuidos más libremente; pero con la llegada de esta se unieron nuevos materiales como la fundición, el vidrio y, más tarde el concreto; he aquí un progreso de la ciencia ya que permite poner en practica de modo más conveniente los materiales para mejorar sus propiedades físicas así como su aplicación en las instalaciones de las obras, más estos nunca han cambiado siguen siendo los mismos hasta la fecha ya que son la materia prima v solo han llevado a cabo una transformación.

“En los antecedentes de la arquitectura, los procedimientos constructivos no han variado y sin embargo los materiales de construcción lo han hecho y han determinado en su mayoría las características formales y funcionales resultantes de cada edificio. Los sistemas constructivos descubiertos y los materiales disponibles en cada región y época influyeron en las soluciones ofrecidas en cada tendencia o estilo. Por ejemplo los griegos hicieron del mármol blanco su material predilecto y crearon procesos constructivos para su explotación.”^[2]

1. VILLAGRAN GARCIA, José, *Teoría de la arquitectura*, 3a. ed., México, inba-sep, Cuadernos de Arquitectura y Conservación del Patrimonio Artístico, número extraordinario, 1983.

2. OCAMPO RUIZ, Ernesto, *Artículo Nanotecnología y Arquitectura*, Revista del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Febrero 1998. <http://www.imcyc.com/revista/1998/febrero/nanfeb98.htm>.

Es verdad que hoy en día los grandes materiales utilizados que se han desarrollado y descubierto en los últimos doscientos años, han sido ya explotados al máximo mediante la creación de innumerables procesos estructurales que fueron inventados por sus constructores y han permitido generar las formas singulares en sus acabados que distinguen a la arquitectura del Siglo XX.

En recientes fechas la ciencia se ha visto expandida por las grandes investigaciones relacionadas con la llamada nanociencia y nanotecnología, conceptos que se pueden traducir como un gran avance tecnológico en una gran variedad de actividades que causan gran impacto en la sociedad. Una de ellas y la cual es el motor principal de esta tesis es el estudio de los materiales relacionados con la construcción.

En los últimos años se ha estudiado las características generales de un elemento de gran importancia en la construcción como lo es el concreto. De aquí el principal objetivo de incorporar nanoestructuras o microestructuras que puedan modificar sus propiedades mecánicas de resistencia, rugosidad, plasticidad y autocompactación.

Esta investigación se centrará en un tema aún no abordado en las investigaciones de campo realizadas hasta ahora, principalmente en la disciplina de arquitectura, que es la creación de un material a través de la influencia de estructuras micro o nano, que afecten al actual, la cual se desarrollará a través de un ensayo en el laboratorio del cual se desprenderán una serie de análisis (tanto físicos como químicos), con los que se estudiará el comportamiento de probetas fabricadas con este tipo de estructuras, sometiénolas a condiciones que definirán el futuro de esta investigación.

La importancia de este trabajo es que llevando a cabo este ensayo y correcto análisis que se desprenderán de él, se podrá concluir de los efectos físicos y químicos, superficiales y microestructurales, en el concreto a través de la implementación de elementos a su materia prima, el cemento; determinando si la incorporación de las microestructuras favorece o no sus propiedades.

De esta forma el presente trabajo de investigación está centrado principalmente en llevar un análisis extenso y dar a conocer nuevas tecnologías en relación a la llamada Nanociencia (Nanotecnología) en aspectos tales como la generación y estructuración de materiales o modificación de existentes. La investigación también implica desarrollos prácticos que ejemplifiquen las mejoras esperadas. Esto implica como ya se ha mencionado la construcción de probetas de cemento, que a través de una serie de análisis demostrarán el beneficio de la utilización de la tecnología a escala nano, y así obtener un comportamiento más óptimo en contraste con las tecnologías tradicionalmente utilizadas.

Todo lo anterior está plenamente justificado en términos científico-tecnológicos, ya que implica dar perspectivas y poner en conocimiento esta nueva tecnología y principalmente la ejecución de esta investigación en el campo de la Arquitectura, además de efectuar experimentos que demuestren de forma concreta los beneficios que conlleva esta investigación.

Cabe aclarar que no basta solo con efectuar sólo diseños estructurales eficientes con todas las precauciones necesarias, o utilizar software de última generación, sino tenemos un conocimiento lo mas basto posible de los comportamientos y potencialidades de los materiales. Lo anterior implica que si no somos capaces de utilizar los desarrollos tecnológicos en ciencia de materiales a nuestro favor, no sabremos optimizar y hacer más eficaz nuestra labor como arquitectos.

I. HIPÓTESIS

Mediante la modificación de la estructura organizativa del cemento, se puede encontrar un elemento que mejore sus propiedades como la fuerza, la durabilidad, la disponibilidad de masas aunando un bajo costo en los campos de trabajo que depende de este material.

II. OBJETIVOS GENERALES

Mediante la modificación de la microestructura del cemento, se puede encontrar un material que mejore las propiedades del actual.

A partir de la anterior proponer la fabricación de productos nuevos aplicados a la arquitectura.

También proponer nuevas técnicas de síntesis de productos de cemento relacionados con la construcción.

III. OBJETIVOS PARTICULARES

Fabricar cementos mediante la adición de nanopartículas de Dióxido de Titanio (TiO₂) y Fosfato Tricálcico(TCP).

De los resultados proponer un material que mejore algunas propiedades del cemento convencional.

IV. MARCO HISTÓRICO DEL CEMENTO

La materia indispensable del concreto es el cemento, un material de construcción que se ubica como uno de los más viejos, remontándose incluso a los egipcios que usaron el yeso calcinado para dar al ladrillo o a las estructuras de piedra una capa lisa; posteriormente hubo una aplicación similar en la época griega quienes calcinaron la piedra caliza para elementos decorativos observando una gran dureza en este pero sin duda su inclusión más preponderante fue en el imperio romano que utilizaron con frecuencia el agregado quebrado del ladrillo embutido en una mezcla de la masilla de la cal con polvo del ladrillo o la ceniza volcánica, con lo cual más tarde construyeron una variedad amplia de estructuras que incorporaron a la piedra y al concreto, llevando a cabo obras como los caminos, acueductos, templos y palacios.

No fue hasta el Siglo XVIII cuando se observó una construcción a base de concreto, en 1774 John Smeaton había encontrado que combinar la cal viva con otros materiales creaba un material extremadamente duro que se podría utilizar para unir juntos con otros materiales; fue la primera desde aquellas aplicaciones que hubo en la roma antigua, "John Smeaton, uno de los grandes ingenieros de ese siglo, logró un triunfo al construir el faro de Eddystone en Inglaterra. Los faros anteriores en este punto habían sido destruidos por las tormentas y el sitio estaba expuesto a la extrema fuerza del mar. Pero Smeaton utilizó un sistema en la construcción de su cantería que la limita junta en un todo extremadamente tenaz. Él bloqueó las piedras unas en otras y para las fundaciones y el material de junta utilizó una mezcla de la cal viva, arcilla, arena y escoria de hierro machacada." [3]

En la actualidad edificios, calles, avenidas, carreteras, presas, canales, fábricas, talleres y casas están dentro de las construcciones que más se observan, ya que son parte del hacer cotidiano, pero alguna vez nos hemos preguntado ¿La edificación de estas obras tendrá algún daño que repercuta en el medio ambiente?, y si es así ¿Existen soluciones al cemento como componente primario de forma preventiva y en algunos casos correctivas que nos permitan no dañar nuestro medio ambiente? La realidad es que no se ha pensado en estos aspectos.

³. Citado de Espacio, *Tiempo y Arquitectura*: el crecimiento de una nueva tradición, por Sigfried Giedion, Harvard University Press, 1954. Aguafuerte del informe de Smeaton sobre el faro, una narrativa del edificio y una descripción de la construcción del faro de Eddystone.

La nanotecnología, es un proceso de estudio, diseño, síntesis, manipulación y aplicación de la materia en una millonésima parte a través del procesamiento molecular de los átomos, y estas aplicaciones en los materiales a través de un control minucioso nos proporcionarían propiedades totalmente nuevas. La demanda del cemento está directamente atada al uso de concreto en la construcción y por tal motivo su consumo es muy alto, de ahí el hecho de buscar alternativas en la ciencia, que nos otorgue beneficios así como proporcionar un menor daño al medio ambiente utilizando la tecnología como un medio para llegar a un fin común a través de la nanotecnología.

Al lograr que el cemento por medio de la descomposición molecular, (en este caso la modificación del clínker, elemento primordial de este), se pueda llevar a cabo una manipulación químicamente, logrando poder sustituirlo posiblemente por otro, pero de características como la durabilidad y la disponibilidad de masas, iguales o mejores y añadiendo a esto un bajo costo, es como encontramos la gran aportación que nos ofrece dicha evolución de la ciencia.

Estas son las razones fundamentales de mi investigación; dado que el tiempo es irre recuperable y los daños al medio ambiente son cada vez más frecuentes, como arquitecto asumo un gran compromiso de buscar y proponer un material más eficiente logrando aplicar la tecnología para un mejor ambiente habitable, siempre y cuando no dañe al medio ambiente.

EFFECTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE (FABRICACIÓN DEL CEMENTO)

Mientras los principales líderes de gobierno discuten las posibilidades para reducir las emisiones mundiales de dióxido de carbono [4], algunos científicos e ingenieros buscan métodos más eficaces, por ejemplo orientando su trabajo a la nanoestructura del concreto[5], en el mundo el material más extensamente usado. La industria de la construcción confía enormemente en datos empíricos, pero la realidad es que la física y la estructura del cemento no han sido lo suficientemente investigadas, para llevarlo a un mejor rendimiento de la mano de las tecnologías presentes, tratando de fortalecer o contribuir el mejoramiento de un medio ambiente confortable para las personas que lo habitan.

4. Gas incoloro, inodoro e incombustible que se encuentra en baja concentración en el aire que respiramos (en torno a un 0,03% en volumen). El dióxido de carbono se genera cuando se quema cualquier sustancia que contiene carbono. También es un producto de la respiración, la fermentación y la fotosíntesis. <http://www.greenfacts.org/es/glosario/def/dioxido-carbono.htm>, Página Consultada el 23 de Octubre de 2007.

5. Estudio de la escala nanométrica de las partículas del cemento la cual, al ser modificada se obtienen características mejores como la resistencia y la durabilidad del material. FRANZ-JOSEF ULM, Profesor de Ingeniería Civil y Medioambiental Y GEORGIOS CONSTANTINIDES, investigador en Ciencia e Ingeniería de los materiales, Diario de la Mecánica y Física de Sólidos, Instituto Tecnológico de Massachussets. MIT es considerada como la mejor universidad de ciencia e ingeniería del mundo.

Existe un mayor problema ya que se fabrican mundialmente 2.35 millones de toneladas de concreto al año, lo cual indica que las industrias cementeras van en ascenso, "principalmente en México, con un incremento del 11.1 por ciento respecto al 2005"^[6]; en México encontramos una de las industrias más fuertes en el ámbito competitivo mundial en la producción del cemento y de no cambiar el proceso que conlleva la realización del concreto el daño puede ser irreversible, la reducción de emisiones de dióxido de carbono en el mundo durante la fabricación del cemento en hasta un 10 por ciento, lo cual sería una gran contribución de esta industria en cuestión del medio ambiente, ya que fabricar una tonelada de clínker, materia prima del cemento, supone emitir casi una tonelada de CO₂.^[7]



Figura 1. Extraída con fines didácticos, Expulsión de Emisiones para la fabricación del Cemento.
<http://arquitecturaenconstruccion.blogspot.com/2007/10/concreto-contaminante.html>

Las investigaciones actuales también muestra que el estudio de materiales muy comunes en la escala de nano tiene un gran potencial ya que no se hubiesen concebido sin una clave que se denomina "la identificación del código geogenómico de materiales"^[8], "el cianotipo del comportamiento nanomecánico de un material"^[9], tal y como cuando se quiere descubrir genéticamente un posible ADN, pero aquí descifrado en un material. Actualmente se mira a un elemento químico como el magnesio como un posible reemplazo para el calcio en el polvo del cemento, ya que el magnesio es un metal común de la tierra, como el calcio, pero este es un desecho que la gente debe pagar para eliminar.

EFFECTOS GLOBALES DE CONTAMINACIÓN

La práctica totalidad de la radiación solar pertenece al espectro visible y, de hecho, la de longitud de onda comprendida entre 320 y 700 nm alcanza la superficie terrestre. Ésta emite hacia el exterior radiación de onda en el infrarrojo, parte de la cual es absorbida por determinados gases presentes en la atmósfera, (Ver Figura 1) fundamentalmente el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua. Como consecuencia, se genera un calentamiento de la Superficie Terrestre.

⁶. Copyright © Grupo Reforma Servicio Informativo, Fecha de Publicación: 30-Enero-2007, Recopilación con fines didácticos.

⁷. Coordinadora Central Salinas - El cemento evoluciona con el CO₂,
<http://www.ccsa.org.es/modules.php?name=News&file=article&sid=1857>.

⁸. Partículas de los materiales que se organizan de manera similar a la de una cadena de ADN, que esta condensada con una gran densidad reflejada en objetos esféricos, su estructura resulta similar a un montón de naranjas formando una pirámide.

⁹. Analizar por capas la estructura y mecánica de materiales por medio de uso electrónicos los cuales descomponen por elementos químicos cada uno de sus elementos, FRANZ-JOSEF ULM, Profesor de Ingeniería Civil y Medioambiental Y GEORGIOS CONSTANTINIDES, investigador en Ciencia e Ingeniería de los materiales, Diario de la Mecánica y Física de Sólidos, Instituto Tecnológico de Massachussets. MIT es considerada como la mejor universidad de ciencia e ingeniería del mundo.

Este efecto invernadero natural, se ha visto potenciado a partir de la Revolución Industrial con la emisión de diversos gases, tanto presentes en la atmósfera, principalmente el dióxido de carbono, metano y dióxido de nitrógeno, como otros ajenos a ella, clorofluorocarbonos (CFCs), hidroclorofluorocarbonos (HCFCs), ozono troposférico, hexafluoruro de azufre y otros. Hay que señalar que también el vapor de agua conlleva un efecto invernadero. Los diferentes gases contribuyen de manera distinta al incremento de efecto invernadero (Tabla 1).

Gas	Incremento de concentración (%) desde aprox. 1750	Contribución al calentamiento terrestre (%)
CO2	30 %	64 %
CH4	145 %	20 %
N2O	15 %	<1 %
HFC	-	64 %
PFC	-	10 %
SF6	-	<1 %

Tabla I. Porcentaje de Emisiones de los diferentes gases emitidos a la atmósfera los cuales producen el efecto invernadero. Extraída con fines didácticos, http://calidadelaire.navarra.es/calidadaire/efectosglobales_efectoinvernadero.cfm

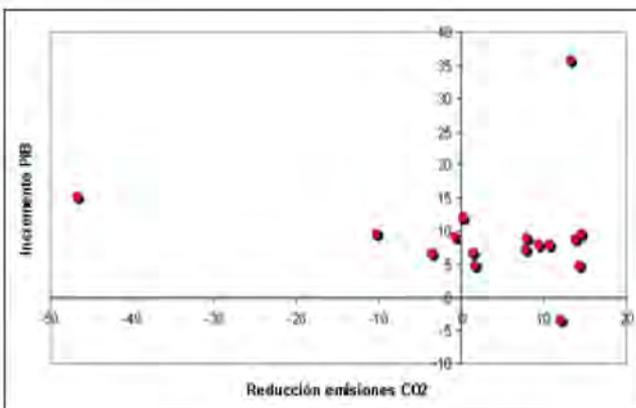


Figura II. Extraída con fines didácticos, Gráfica donde se muestra como el desarrollo económico está relacionado con las emisiones. http://calidadelaire.navarra.es/calidadaire/efectosglobales_efectoinvernadero.cfm

En la Unión Europea, los principales sectores emisores de dióxido de carbono son el energético (32%), el transporte (24%) y la industria (23%). En cuanto a las emisiones de metano, el principal sector emisor es la agricultura y ganadería (42%), en especial por la emisión de este gas por rumiantes y por la gestión del estiércol; también constituyen un importante foco emisor las pérdidas de gas natural (17%). En cuanto a monóxido de dinitrógeno, la principal emisión se debe a la fertilización agrícola (46%), la industria (26%) y el transporte (7%) y la producción energética (7%).^[10]

El aporte a la atmósfera de gases ajenos a su composición ha tenido lugar a partir de mediados del siglo XX y lo mismo ha ocurrido con la presencia del ozono troposférico, prácticamente ausente de esta capa de la atmósfera en el pasado.

Las emisiones per cápita de estos gases están correlacionados con el producto interior bruto, por lo que en el futuro inmediato, la propia actividad industrial en los países desarrollados, así como el previsible desarrollo de los llamados países emergentes hacen prever un incremento de la concentración de los gases mencionados, con el consecuente incremento del efecto invernadero que originan (Ver Figura II).

¹⁰. Paráfrasis llevada a cabo, para realizar comparación de resultados, con fines didácticos http://calidadelaire.navarra.es/calidadaire/efectosglobales_efectoinvernadero.cfm

CAPÍTULO I

1.1 ESTADO DEL ARTE (NANOTECNOLOGÍA)

El presente trabajo de investigación tiene el objetivo de recopilar el material que sea suficiente y necesario para llevar a un buen término el presente documento, se iniciará con una fase de exploración, la cual consiste en un minucioso análisis de la literatura existente, comenzando por la recopilación de bibliografía relacionada al concreto, cemento, la nanociencia y la nanotecnología, su grado de desarrollo, los nanomateriales, profundizando en los materiales que han modificado sus propiedades mecánicas y posteriormente el análisis del Fosfato Tricálcico, material base de esta investigación.

Se analizará información respecto de los factores principales en el estudio de adiciones al cemento para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Una vez llevado a cabo este paso se definirá el tipo de artículo a seguir como guía y seguir el proceso de experimentación, así mismo el tipo de ensayo, procedimientos y análisis a realizar en el laboratorio, para los cuales es necesario realizar una planificación de estos de acuerdo a los objetivos que se quiere alcanzar en esta investigación, ya que por medio de estos ensayos se expondrá el cemento por medio de probetas con micromoléculas de Fósforo y se analizarán los efectos producidos en él.

Se procederá a la preparación de probetas que serán utilizadas en el ensayo y con los análisis acordes con la investigación. Se realizará un ensayo de desecado el cual consiste en introducir las probetas de cemento en una cámara de vacío con el fin de eliminar en lo más posible las burbujas de aire que pudieran existir.

Previamente se incluirá el Fosfato Tricálcico a diferentes concentraciones en peso a las muestras, se realizarán pruebas de compresión y flexión de tres puntos, para determinar su resistencia a la fractura como función del tiempo y de la concentración del aditivo. En este trabajo no estudiaremos el proceso de fraguado con detalle.

Adicionalmente se procederá a analizar la estructura de las probetas por medio de microscopía realizando un análisis morfológico y otro químico por energía dispersiva de rayos X, también se determinarán las fases cristalinas existentes por Difracción de Rayos X.

1.1.1 ALCANCES Y LIMITACIONES

Es de gran relevancia destacar que una investigación de este tipo, aunque trata de llevarse a cabo lo más completa posible, no está exenta de pasar por alto algunos desarrollos, técnicas o materiales por lo amplio del campo de estudio, por lo tanto es inevitables que ciertos temas o campos de investigación no estén presentes.

Así que en este trabajo abordaremos el caso de los cementos Nanoestructurados, en particular el comportamiento mecánico de Materiales Nanoestructurados. A groso modo, exploraremos el efecto que la adición de partículas de dimensiones en el rango de 10^{-9} - 10^{-8} m., tiene en el comportamiento mecánico de probetas cilíndricas de cemento. (Figura 1.1)

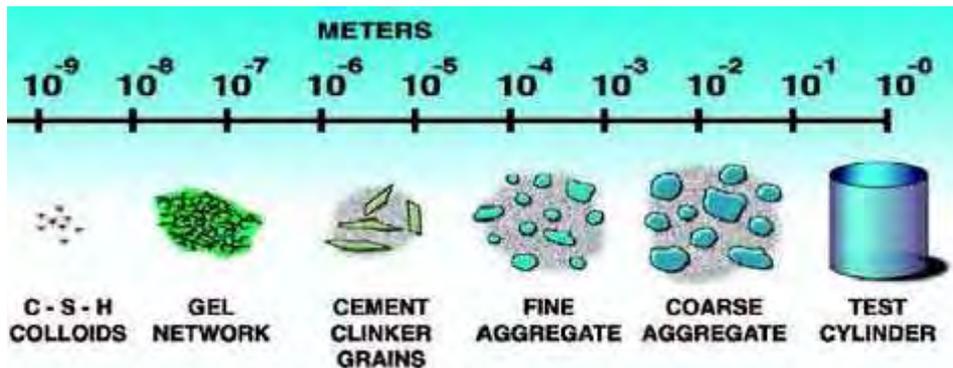


Figura 1.1 La Nanociencia se refiere a la microestructura de materiales de dimensiones entre 1 a 100 nm (10^{-10} a 10^{-7} m.) y a la manipulación de esa microestructura para producir propiedades deseadas a nivel macroscópico. El cemento Pórtland y el concreto en sí son materiales nanoestructurales, cuya constitución a nanoescala consiste en un gel compuesto de partículas coloides de hidratos de silicio y calcio entre 1 y 100 nm. La Nanotecnología se refiere a los dispositivos que tienen tamaños del orden del 1 a 1000 nm. (Fuente: "Small Science Hill bring big changes to roads", Tom Kuennen, 2004)

Debemos precisar que obtener cementos de alta resistencia mecánica no garantiza que sea resistente a otros agentes destructivos como la corrosión inducida por el ambiente, para garantizar el uso de un buen material se tendría que hacer estudios de otro o en otras direcciones.

1.1.2 EL CEMENTO NANOTECNOLÓGICO Y LA ARQUITECTURA

Sería conveniente que los Arquitectos busquen el generar nuestra su propia tecnología alrededor de su tema de trabajo, por lo tanto es necesario interactuar con otras disciplinas para ello. Al vincularse con ingenieros y especialistas en Ciencia e Ingeniería de Materiales, es posible generar nuevos productos relacionados con la construcción. Eso redundaría en el uso más eficiente de los materiales insumos involucrados en los procesos constructivos que a su vez permitiría el ahorro de la energía gastada en el proceso constructivo, y de funcionamiento de los edificios.

El presente trabajo que se desarrolla es una experiencia que me acerca a entender el proceso de desarrollo de nuevos materiales para cumplir con los objetivos delineados en el párrafo anterior.

1.2 GENERALIDADES SOBRE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (RELACIONADOS CON EL CEMENTO).

Desde sus comienzos, el ser humano ha modificado su entorno para adaptarlo a sus necesidades. Para ello ha hecho uso de todo tipo de materiales naturales que, con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología, se han ido trasformando en distintos productos, mediante procesos de manufactura de creciente sofisticación. Los materiales naturales sin procesar (arcilla, arena, mármol) se suelen denominar materias primas, mientras que los productos elaborados a partir de ellas (ladrillo, vidrio, baldosa) se denominan *materiales de construcción*. No obstante, en los procesos constructivos, muchas materias primas se siguen utilizando con poco o ningún tratamiento previo. En estos casos, estas materias primas se consideran también materiales de construcción propiamente dichos. Por este motivo, es posible encontrar un mismo material englobado en distintas categorías: por ejemplo, la arena puede encontrarse como material de construcción (lechos o camas de arena bajo algunos tipos de pavimento), o como parte integrante de otros materiales de construcción (como los morteros), o como materia prima para la elaboración de un material de construcción distinto (el vidrio, o la fibra de vidrio).

Los primeros materiales empleados por el hombre fueron el barro, la piedra, y fibras vegetales como madera o paja. Los primeros *materiales manufacturados* por el hombre probablemente hayan sido los ladrillos de barro (adobe), que se remontan hasta el 13.000 a.C.; mientras que los primeros ladrillos de arcilla cocida que se conocen datan del 4.000 a. C.^[11]

¹¹. W. Bender; F. Handle (1982). CLAY TANGOS WITH FIRE. Brick and Tile Making. Bauverlag GmbH.
http://es.wikipedia.org/wiki/Material_de_construcci%C3%B3n

1.2.1 PROPIEDADES DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN (CEMENTO)

La historia del Cemento constituye un capítulo fundamental de la historia de la construcción. Cuando el hombre optó por levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir dichos mampuestos para poder conformar estructuras estables. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal, pero se deterioraban rápidamente ante las inclemencias atmosféricas. Se idearon diversas soluciones, mezclando agua con rocas y minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradasen fácilmente. Así, en el Antiguo Egipto se utilizaron diversas pastas obtenidas con mezclas de yesos y calizas disueltas en agua, para poder unir sólidamente los sillares de piedra; como las que aún perduran entre los bloques calizos del revestimiento de la Gran Pirámide de Giza.

En la Antigua Grecia, hacia el año 500 a. C., se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer hormigón de la historia, usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini. Los antiguos romanos emplearon cenizas volcánicas que contienen sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal daban como resultado el denominado cemento puzolánico (obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio). Añadiendo en su masa jarras cerámicas o materiales de baja densidad (piedra pómx) obtuvieron el primer hormigón aligerado.

Los cementos son productos que amasados con agua fraguan y endurecen formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergidos en agua. Hay varios tipos de cementos. Las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales, que se expresa en forma de sus óxidos, y que según cuales sean formaran compuestos resultantes distintos en las reacciones de hidratación.



Figura 1.2. Extraída con fines didácticos, Clinker de cemento antes de su molienda.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Hormig%C3%B3n>

Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el *Portland Cement*, obtenido de caliza arcillosa y carbón calcinados a alta temperatura –denominado así por su color gris verdoso oscuro, muy similar a la piedra de la isla de Portland. Isaac Johnson obtiene en 1845 el prototipo del cemento moderno elaborado de una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura, hasta la formación del clinker (Ver Figura 1.2); el proceso de industrialización y la introducción de hornos rotatorios propiciaron su uso para gran variedad de aplicaciones, hacia finales del siglo XIX.

Cada tipo de cemento está indicado para unos usos determinados; también las condiciones ambientales determinan el tipo y clase del cemento afectando a la durabilidad de los cementos. Los tipos y denominaciones de los cementos y sus componentes están normalizados y sujetos a estrictas condiciones. Por ejemplo, la norma española establece los siguientes tipos: cementos comunes, los resistentes a los sulfatos, los resistentes al agua de mar, los de bajo calor de hidratación, los cementos blancos, los de usos especiales y los de aluminato de calcio. Los cementos comunes son el grupo más importante y dentro de ellos el portland es el habitual. En España sólo pueden utilizarse los cementos legalmente comercializados en la Unión Europea y están sujetos a lo previsto en leyes específicas.

Además del tipo de cemento, el segundo factor que determina la calidad del cemento, es su clase o resistencia a compresión a 28 días. Esta se determina en un mortero normalizado y expresa la resistencia mínima, la cual debe ser siempre superada en la fabricación del cemento. No es lo mismo, ni debe confundirse la resistencia del cemento con la del concreto, pues la del cemento corresponde a componentes normalizados y la del concreto dependerá de todos y cada uno de sus componentes. Pero si el concreto está bien dosificado a mayor resistencia del cemento corresponde mayor resistencia del concreto.

1.2.2 ¿QUÉ SE ENTIENDE POR CONCRETO U HORMIGÓN? ^[12]

El concreto u hormigón es el resultado de la mezcla de uno o más conglomerantes, que pueden ser de tipo calcáreo, bituminoso, etc., áridos fino o grueso (grava, gravilla y arena), agua, aire, posibles aditivos (colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, etc.) y adiciones. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla, obteniéndose al final del proceso un material con consistencia pétreo.

MORTERO

Cuando se habla de mortero, se está haciendo referencia a un tipo de concreto fabricado específicamente con árido fino (arena) de tamaño máximo igual o inferior a 5mm o que pasa por una abertura nominal de 5 mm. y es retenido en el 0.080 mm. Con tolerancias establecidas en la ASTM, junto a los demás componentes mencionados anteriormente. Dependiendo del tipo de conglomerante que se utilice los morteros se clasifican en:

- **Mortero de cemento:** se compone de una mezcla en la que el conglomerante es cemento. Su principal ventaja respecto a otros tipos de argamasa es su gran resistencia y la rapidez con la que se seca y endurece. Sin embargo, como es poco flexible, es fácil que se resquebraje.

12. Extracción Literal de la Tesis Titulada "DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS NANOMOLÉCULAS DE SÍLICE EN EL CONCRETO FRENTE A UN FACTOR QUE AFECTA SU DURABILIDAD", PAZ AGUILAR MUNDACA REBECA, VALDIVIA – CHILE, 2007.

- **Mortero de cal:** el conglomerante en el que se amasa este producto es cal, tiene la gran ventaja de que es fácil de aplicar, y es flexible y untuoso. No obstante, es menos resistente e impermeable que el mortero de cemento.

- **Mortero mixto:** donde el conglomerante esta compuesto por cemento y cal, que aúna las cualidades de los dos anteriores. Si en la masa se pone más cemento que cal será más resistente y si la cantidad de cal es mayor será más flexible.

1.2.3 USOS DEL MORTERO

- 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.

1.3 MATERIALES QUE CONSTITUYEN AL CONCRETO ^[13]

1.3.1 CEMENTO

El cemento se presenta en forma de polvo finísimo, de color gris, que mezclado con agua forma una pasta que endurece tanto bajo el agua como el aire. Por endurecer bajo el agua y por necesitar agua para su fraguado se le define como un aglomerante hidráulico.

¹³. Ídem Pie de Pág. 12

1.3.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

El componente principal del cemento es el clinker, el cual está compuesto por materias primas: calizos y arcillosos. Como materiales calizos: contienen principalmente carbonato cálcico, pueden usarse calizas, margas, conchas marinas, etc. Como materiales arcillosos: contienen principalmente óxidos de silicio o sílice de aluminio o alúmina, y de hierro, con una cierta cantidad de agua libre y de agua de cristalización, arcillas, pizarras, esquistos, escoria de alto horno, etc.

Algunos de estos materiales, por ejemplo las margas y la escoria, son a su vez calcáreos y arcillosos. Además hay impurezas, tales como carbonato de magnesio que lleva a veces la caliza y otros elementos Na, K, P, etc., estos en pequeñas cantidades. La parte esencial de la fabricación del cemento es la calcinación, que consiste proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio de las materias antes mencionadas, previa reducción y dosificación de estas. Lo primero, consiste en la reducción de estos a granos muy finos, con el fin de aumentar su superficie específica, de manera que puedan tener lugar en el horno las reacciones buscadas. Este proceso de reducción de tamaño de las materias primas se puede hacer básicamente por dos procedimientos diferentes, que son el de vía seca y el de vía húmeda.

- **Proceso de vía seca:** la reducción de tamaño se hace por una serie de chancadoras y Molinos en los que se trituran y desmenuzan los materiales en seco. Si inicialmente las materias primas no están lo bastante secas, deben someterse a un pre-secamiento.
- **Proceso de vía húmeda:** se deslían los materiales en agua formando una suspensión que se espesa y eventualmente se le disminuye el contenido de agua por filtros al vacío antes de entrar en el horno. Esta vía necesita menos gastos de energía mecánica en la reducción de tamaño, pero mayores gastos térmicos, ya que es necesario evaporar en el horno una cantidad de agua mayor.

El emplear una vía u otra depende del tipo de materias primas. El segundo proceso previo consiste en la dosificación necesaria para que las materias primas calcáreas y arcillosas estén en la proporción necesaria para obtener el clinker de la composición requerida. Mediante el tratamiento térmico, la mezcla cruda finamente molida de los materiales naturales no hidráulicos, calcita, cuarzo, arcillas y feldespatos, es transformada en una mezcla íntima de cuatro minerales principales hidráulicamente activos que se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla 2. Compuestos mineralógicos principales del clinker

Denominación	Mineral	Formula Química	Abreviaturas
Silicato Tricálcico	Alita	3 Ca O . SiO ₂	C₃S
Silicato Dicálcico	Belita	2 Ca O . SiO ₂	C₂S
Aluminato Tricálcico	Alumina	3 Ca O . Al ₂ O ₃	C₃A
Ferro-Aluminato Tetracálcico	Ferrita	4 Ca O . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C₄AF

Tabla 2. GALVEZ, D.; V. ROCCO. 2007. Tecnología del hormigón. Chile. (Disponible en: ico.ucentral.cl/educon/cursos/icos405/archivos/archivo1_16_03_07.ppt).

El tratamiento térmico de calentamiento y enfriamiento responsable para esta transformación se denomina clínquerización. En el proceso de formación de clínker ocurre una serie de complejas reacciones en un rango amplio de temperaturas y durante el mismo coexisten frecuentemente mezclas complejas de productos reactantes intermedios y finales. Aún después de alcanzada la temperatura máxima de aproximadamente 1.450°C, debe transcurrir un cierto tiempo antes que se produzca

Tabla 3. Secuencia de reacciones en un horno rotatorio.

Rango de	Temperatura (°C) Tipo de reacción
Calentamiento :	20 – 100 Evaporación de H ₂ O libre
100°C – 300°C Perdida del agua físicamente absorbida	400-900 Remoción de H ₂ O estructural (grupos H ₂ O y OH) de los
Minerales de arcilla	>500 Cambio de estructura en los minerales de sílice
600°C – 900°C Disociación de los carbonatos	>800 Formación de belita, productos intermedios
>1250°C Formación de alita	>1.260 Formación de fase líquida (caldo de aluminato y ferrita)
Aprox. 1450 °C	Se completa la reacción y recristalización de alita y belita
Enfriamiento:	
1300°C	1.240 Cristalización de fase líquida

Tabla 3. GALVEZ, D.; V. ROCCO. 2007. Tecnología del hormigón. Chile. (Disponible en: ico.uceval.cl/educon/cursos/icos405/archivos/archivo1_16_03_07.ppt).

Es importante el balance térmico del horno para obtener el mejor aprovechamiento del calor. Para ello, el aire para la combustión se pasa por el clínker caliente con lo que se consigue la doble finalidad de aprovechar el calor y enfriar el clínker. En la parte inicial del horno se ponen dispositivos para favorecer la transmisión térmica de los gases a la mezcla cruda. Además, los gases de escape se aprovechan incluso para calentar las materias primas antes de entrar en el horno. El clínker sale formando bolitas de 3 a 29 mm. de diámetro y es necesario pulverizarlo.

1.3.3 CEMENTO PORTLAND

Una vez ya formado el clinker este se pulveriza mediante molinos de bola hasta convertirlo en polvo finísimo, adicionándole en esta etapa yeso CaSO_4 (yeso o anhidrita) de alrededor de un 5% de su peso. Así el producto obtenido se denomina Cemento Pórtland, que es el tipo de cemento más utilizado como una especie de ligante para la preparación de concreto. Es importante destacar que si no se le adicionara yeso al clinker, el cemento, tendría un fraguado muy rápido, de esta manera el yeso se utiliza como regulador del fraguado. Los cementos Pórtland son de composición variable, pero comprendida entre ciertos límites. El análisis químico de un cemento se expresa por sus óxidos. Sus proporciones en los cementos Pórtland corrientes suelen ser las que se indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Proporción de Óxidos en cementos Pórtland.		
		Media %
CaO	59-67	64
SiO₂	17-25	21
Al₂O₃	5-9	6.5
Fe₂O	1-5	2.5
MgO	1-4	2.5
SO₃	1-3	2.1
Perdida por calcinación	0.6 - 2	1.3
Residuo insoluble	0.008 - 0.02	0.01

Tabla 4. GALVEZ, D.; V. ROCCO. 2007. Tecnología del hormigón. Chile. (Disponible en: ico.ucentral.cl/educon/cursos/icos405/archivos/archivo1_16_03_07.ppt. Consultado el 14 junio de Mayo de 2008).

En la tabla anterior se encuentran los componentes principales de que hemos hablado: cal, sílice, alúmina, óxido de hierro. Estos componentes constituyen, en la composición media, el 94% del total. La magnesia (óxido de magnesio) no es un componente favorable, pero proviene de impurezas de algunas calizas. El SO_3 es del yeso que se añadió al clinker. Además de los óxidos citados, hay otros como Mn_2O_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , etc., en proporciones menores.

Como ya se ha visto, estos óxidos que da el análisis químico no se hallan libres, sino combinados en virtud de las reacciones producidas en el horno. Los cuatro óxidos principales forman los compuestos C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF . De la composición expresada por los óxidos y teniendo en cuenta sus pesos moleculares, se puede deducir la composición potencial de los cuatro minerales que constituyen principalmente el cemento Pórtland. Desde luego, estas proporciones son diferentes en cada cemento particularmente.

Tabla 5. Composición media de los minerales principales en cementos Portland corrientes

Mineral	%
C ₃ S (Silicato Tricálcico)	48
C ₂ S (Silicato Dicálcico)	28
C ₃ A (Aluminato Tricálcico)	12
C ₄ AF (Aluminaferrita Tetracálcica)	8

Tabla 5. GALVEZ, D.; V. ROCCO. 2007. Tecnología del hormigón. Chile. (Disponible en: ico.ucentral.cl/educon/cursos/icos405/archivos/archivo1_16_03_07.ppt. Consultado el 14 junio de Mayo de 2008).

Estos cuatro compuestos son identificables al microscopio como cuatro fases diferentes. Tienen distintas propiedades y de su proporción dependen por tanto las características principales de un cemento Portland. Los cuatro compuestos podrían considerarse aisladamente como cuatro cementos diferentes, pues todos ellos tienen la virtud de fraguar y endurecerse; pero esto lo hacen a distintas velocidades y alcanzando diferentes valores de resistencia.

1.3.4 AGUA PARA FORMACIÓN DEL CEMENTO

El agua desempeña dos roles en su calidad de componente del concreto, el primero es que participa en el proceso de hidratación del cemento, la cual no puede tener lugar sin su presencia y luego otorga la trabajabilidad necesaria del concreto siendo determinante para definir su fluidez. En consecuencia, es un componente fundamental del concreto, ya que su presencia condiciona tanto el desarrollo de las propiedades en estado fresco, como en la etapa de endurecimiento (porosidad, retracción y resistencia).

Condiciones de calidad

Para su incorporación en el concreto, el agua debe presentar ciertas características de calidad, y pueden resumirse en la forma siguiente:

- El uso de agua potable está permitido sin necesidad de verificar su calidad.
- El agua de mar solo puede usarse en la preparación de hormigones de resistencia especificada inferior a 150 kg/cm².
- El agua contenida de azúcares, en forma de sacarosa o glucosa, no puede ser empleada para la preparación de hormigones.

Las aguas de origen desconocido deben ser sometidas a análisis químico, debiendo atenderse su composición a los límites señalados en la norma respectiva. Generalmente se investiga lo siguiente:

- a)** Origen: No son recomendables las aguas procedentes de desagües, relaves de minas, de alta montaña, de mar, residuales de industrias de azúcar o similares, de aceite, de ácidos, álcalis o cualquier agua que tenga olor o sabor desagradables.

- b)** Contenidos en suspensión: No son recomendables las aguas que arrastran abundante material en suspensión, como pueden ser las aguas de canales o de pozo. Si no contienen exceso de sales disueltas, podrán emplearse si se adopta algún sistema de decantación que permita obtener agua sin turbidez.

- c)** Contenidos disueltos: No son recomendables las aguas con gusto salobre o azucarado. Cuando se desconozca o se tenga dudas sobre aguas que tengan contenidos peligrosos de sales disueltas, deberá recurrirse a análisis en laboratorios especializados.

En resumen, el agua debe estar libre de sales, impurezas, sólidos en suspensión y materias orgánicas.

El fraguado y el endurecimiento del cemento se basan en la reacción de los compuestos anhidros del cemento con el agua. En el hormigón, el agente conglomerante no es el cemento en sí, sino la mezcla de cemento y agua. Las reacciones de hidratación ya empiezan a ocurrir durante el almacenamiento de clinker, durante la molienda del clinker con yeso y durante el almacenamiento del cemento.

Esta hidratación incipiente puede inclusive cambiar las características físicas del cemento. La hidratación a gran escala y con cambios significativos en las características físicas se lleva a cabo durante la reacción del cemento con el agua en la mezcla del hormigón.

CAPITULO II

La evolución de un Nuevo Material en beneficio de la Arquitectura

2.1. ENFOQUE CIENTÍFICO DE LA NANOTECNOLOGÍA



Figura 2.1. Extraída con fines didácticos, Nanotecnología, una nueva visión al mundo de descubrimientos tecnológicos, ciencia que ha tenido grandes aportaciones recientemente. <http://images.google.com/imgres?imgurl=>, consultada 25 de Junio de 2008.

La aplicación de las llamadas técnicas nanoscópicas (SPM), básicamente las microscopías de efecto túnel (STM) y de fuerzas atómicas (AFM), al estudio de la superficie de materiales sólidos, en

especial metales, semiconductores, superconductores, polímeros, aislantes, materiales biológicos soportados sobre distintos sustratos, etc., ha conducido a un enorme avance en el conocimiento y en las posibilidades de manipulación de las estructuras superficiales a escala atómica. El enorme desarrollo en este tipo de estudios junto con la gran cantidad de campos en donde aparecen posibles aplicaciones de alto interés tecnológico, ha dado lugar a lo que se conoce desde hace algunos años como Nanociencia y Nanotecnología. Es así que de los términos Nanociencia y Nanotecnología (N&N) surgen nuevas disciplinas con amplio interés científico-tecnológico, tales como la bionanotecnología, la nanomedicina y la nanoelectrónica, entre otras.

Desde un punto de vista general, la Nanociencia comprende, al menos, dos aspectos. Por una parte, el estudio de las propiedades termodinámicas, estructurales y dinámicas de las interfases de los sólidos, que incluye posibles sustancias absorbidas en las superficies de los mismos, incluyendo reacciones químicas localizadas en la interfase, etc.

Por otro lado, la posibilidad de modificar o reestructurar superficies generando patrones de tamaño nanométrico para que tengan determinadas propiedades o funciones. Uno de los puntos fundamentales de la Nanotecnología, en el cual se han centrado mayores esfuerzos, es el campo de la nanofabricación, definida como la técnica o procedimiento capaz de producir estructuras con, al menos, una longitud característica inferior a los 100 nm. Bajo este concepto se han desarrollado dos enfoques: el enfoque "descendente" ("top down approach") en el cual se intenta reproducir en escala nanométrica lo que hasta ahora se producía en escala micrométrica, y el enfoque "ascendente" ("bottom-up approach") en el cual se generan estructuras complejas supramoleculares a partir de la autoorganización de moléculas más sencillas. Cabe consignar que el término "nano" se aplica en muchos casos a la escala del submicrómetro (mesoescala) y aún a la del micrómetro. En este punto nosotros preferimos aclarar las escalas involucradas en cada caso (nos referiremos a Nano/Microtecnología).^[14]

¹⁴. NANOESTRUCTURA Y DINAMICA DE SUPERFICIES, Dr. Roberto C. Salvarezza, Estudio de las relaciones estructura-función en biomacromoléculas, Dr. Marcelo R. Ceolín, www.inifta.unlp.edu.ar/investia/nano.htm - 30k -, Consultado 08 de Octubre de 2008.

2.2 NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA (UNA APROXIMACIÓN)

La Nanociencia es un área emergente de la ciencia, revolucionaria en diversos ámbitos (biología, medicina, ingeniería, construcción, etc.), que se ocupa del estudio de los materiales de muy pequeñas dimensiones. No puede denominarse química, física o biología dado que los científicos de este campo están estudiando un campo dimensional muy pequeño para una mejor comprensión del mundo que nos rodea. La nanociencia se define como una ciencia que se ocupa del estudio de fenómenos y manipulación de materiales a escala atómica cuyo tamaño es desde cientos a décimas de nanómetros.^[15]

El término de Nanotecnología deambula entre varios autores pero a quien se le adjudico dicho término a través de sus investigaciones fue el físico Richard Feynman, quien exploró las diversas posibilidades de manipular o modificar un material en la escala atómica y molecular, así haciendo posible más adelante el examinar y controlar el material a escalas hoy llamadas nanométricas.

Fue así como se definió a la nanotecnología como "el diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala". [idem 15]

Para comprender el potencial de esta tecnología es clave saber que las propiedades físicas y químicas de la materia cambian a escala nanométrica, lo cual se denomina efecto cuántico. La conductividad eléctrica, el color, la resistencia, la elasticidad, la reactividad, entre otras propiedades, se comportan de manera diferente que en los mismos elementos a mayor escala. Por lo tanto, científicos utilizan la nanotecnología para crear materiales, aparatos y sistemas novedosos y poco costosos con propiedades únicas. [16]

El significado del prefijo "nano" es una dimensión: 10 elevado a -9.

- Esto es: 1 nanómetro = 0,000000001 metros.
- Es decir, un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, o millonésima parte de un milímetro.
- También: 1 milímetro = 1.000.000 nanómetros (nm.).

En concreto la nanociencia y la nanotecnología van de la mano ya que una se encarga de estudiar las diversas aplicaciones del material y la otra se encarga de desarrollar y aplicar estas, pero las dos están encaminada a los estudios de los fenómenos ocurridos en la nanoescala, que involucra a esta investigación, relacionada con el área de materiales, ya que se estudiarán directamente las propiedades y el comportamiento de los materiales nanométricos o nanomateriales.

¹⁵. Extracción Literal de la Tesis Titulada "DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS NANOMOLÉCULAS DE SÍLICE EN EL CONCRETO FRENTE A UN FACTOR QUE AFECTA SU DURABILIDAD", PAZ AGUILAR MUNDACA REBECA, VALDIVIA – CHILE, 2007. Consultado el 8 de Febrero de 2009.

¹⁶. EURORESIDENTES. 2006. Nanotecnología. España. (Disponible en: <http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnología/Nanotecnología.htm>. Consultado el: 20 de Marzo de 2009.

2.3 MEDIOS PARA LA FABRICACIÓN DE NANOSTRUCTURAS

¿Qué es un material nanoestructurado?



Figura 2.2. Artículo genciencia, estructura de moléculas a través de la Nanotecnología. Página de Internet, www.genciencia.com

Los materiales convencionales tienen un tamaño de grano que va desde los micrómetros a cientos de milímetros y contiene cientos de billones de átomos cada uno. Con un tamaño de grano nanométrico tan sólo contiene 900 átomos cada uno. Como el tamaño del grano es pequeño, hay un significativo incremento en la fracción de intercaras y fronteras de grano por volumen. Dicho de otra forma, los granos nanoestructurados son entre mil y cien veces más pequeños que los de un material común, y además, dentro del mismo volumen poseen el 0.001 por ciento de átomos. Esta característica influye en las propiedades físico-químicas del material. Usando una variedad de métodos de síntesis, es posible producir materiales nanoestructurados en forma de películas delgadas, envolturas de materiales, en polvos y prácticamente con cualquier forma.

- Una clase general de estos materiales son aquellos con una microestructura modulada de cero a tres dimensiones con un tamaño de escala menor de 100 nm.
- Materiales con átomos agrupados ordenadamente en agrupaciones de tamaño nanométrico, los cuales son la base para construir estructuras mayores de este tipo de materiales.
- Cualquier material con una dimensión menor de 1-100nm.

Richard W. Siegel es uno de los pioneros mundiales en la investigación, fabricación y promoción de los materiales nanoestructurados. En el año 1985 comenzó su experimentación en el campo de la nanoestructuración dentro de las instalaciones del Laboratorio Nacional de Argonne. Debido al éxito que obtuvo en su trabajo, decidió explotar comercialmente sus descubrimientos con la creación de una empresa que llamó Nanophase Technologies Corporation, la cual es actualmente líder mundial en el campo de la industrialización y comercialización de materiales nanoestructurados.

Clases de materiales nanoestructurados: Hay cientos de tipos diferentes de materiales nanoestructurados. Esa gama va desde agrupaciones de átomos cero dimensional a una estructura ordenada en tres dimensiones. Cada una de estas clases tiene una dimensión en torno a un tamaño de nanómetros. Las agrupaciones de átomos son definidos como una formación cero dimensional. Cualquier material formado por multitud de capas, con cada capa de un grosor en el rango de los nanómetros se clasifica como una estructura con una dimensión. Los materiales formados por una única capa que contiene un grano en su estructura extra fino (de diámetro en torno al nanómetro) se le denomina estructura con dos dimensiones. La última clase es la consistente en la estructura tres dimensional que son microestructuras o materiales en nanofase.

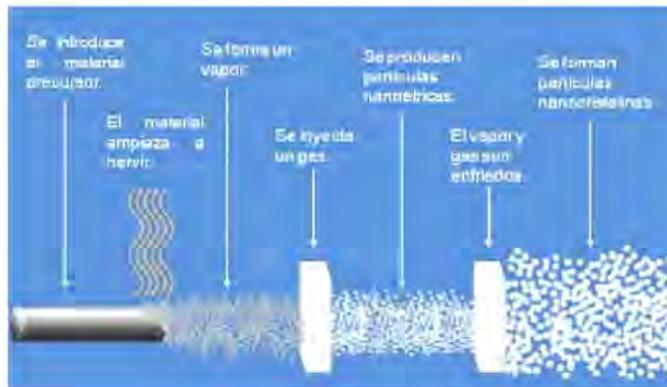


Figura 2.3 Síntesis Química en sus diferentes fases para la creación de Nanoestructuras. Extraída de la Página de Internet, <http://blogs.creamoselfuturo.com/nanotecnologia/2007/06/>

Ejemplos:

Síntesis química: Ambos, metales y cerámicas pueden ser producidos usando una variedad de enfoque químico en la forma de sol gel (es una ruta química que permite fabricar materiales amorfos y policristalinos de forma relativamente sencilla) o descomposición térmica (Ver Figura 2.3). Estos métodos proveen de grandes cantidades de aglomeraciones de tamaño nanométrico a bajo coste. El proceso químico también permite un control efectivo de la estequiometría del producto final. Sin embargo, el precursor químico puede dejar residuos que contaminen la superficie de la partícula, lo que puede llevar a dar problemas en la compactación y sinterización. Por otra parte, los polvos producidos por medio de técnicas químicas en ambiente húmedo a menudo tienen dificultades con aglomerarse.

2.4 LA NANOTECNOLOGÍA EN EL CONCRETO

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

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

BONDADES DEL CONCRETO

El concreto es el material elegido para la construcción de muchos de los componentes estructurales críticos en las instalaciones de tecnología avanzada. Múltiples áreas muy sensibles a la vibración se ubicaban sobre losas en contacto directo con el suelo y con peraltes mucho más gruesos de lo normal (200 a 600 mm). Los espacios de los salones limpios que requieren de cimentación con frecuencia son colocados en sistemas peraltados de losas aligeradas de 700 a 1200 mm de peralte, dependiendo del espaciamiento de las columnas. Los laboratorios generales se ubican en los niveles superiores de estos edificios -con la intención de satisfacer las necesidades de los constructores para proporcionar mayores claros-, que están diseñados ya sea con losas en una sola dirección o marcos compuestos de acero y concreto, aunque los peraltes son más altos y los claros son mucho más cortos que los de las estructuras convencionales.^[17]

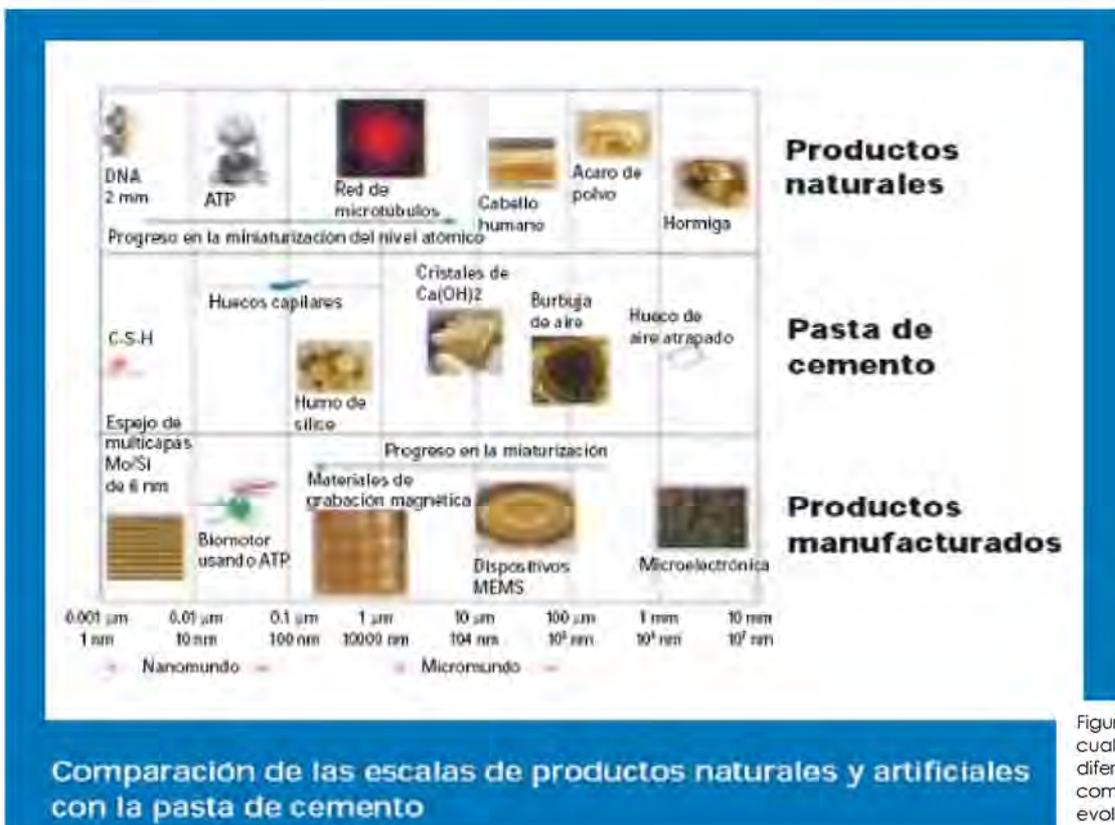


Figura 2.4 Esquema en el cual se puede observar los diferentes materiales y como estos han evolucionado.

En el tema de carreteras se está investigando las nuevas propiedades que los nanomateriales pueden conferir a los nuevos materiales. Estas nanopartículas podrían aportar soluciones a problemas como es conseguir una gran estabilidad del material para que no se degrade al sol, la dispersión homogénea para pintura de asfalto, etc. Hay actualmente problemas con los pigmentos utilizados para obtener tinturas rojas, ya que muchas veces éstas reaccionan con el concreto cambiando su tonalidad hacia el rosa. En este sentido, hay líneas de investigación sobre pigmentos o colorantes orgánicos depositados sobre arcillas y otros tipos de soportes para poder conseguir que no se degraden. (Ver Figura 2.4)

¹⁷. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto <http://www.imcyc.com/cyt/junio05/TECNOLOGIA%20.pdf>.

CAPÍTULO III

Creación del Material: Cemento Nanotecnológico

3.1. DATOS GENERALES

Para la creación y estudio de este material fue necesario la colaboración de otras dependencias especializadas precisamente en el manejo de estos elementos, a lo cual se acudió al Instituto de Física, en el Departamento de Estado Sólido, con la asesoría técnica del Dr. Eligio Orozco Mendoza, para llevar a cabo estos experimentos y poder comprobar mis hipótesis de forma científica.

El uso de nanopartículas en el desarrollo de materiales ha tenido gran popularidad y auge, lo importante a destacar es que las aplicaciones en las cuales puede desarrollarse son muy amplias, he aquí un claro ejemplo, la elaboración de un nuevo material para encontrar nuevas propiedades y por medio de este constituir los diversos campos de aplicación de la ciencia.

Este experimento se centra en la elaboración de diferentes tipos de cemento, uno con método artesanal, posteriormente uno de alta resistencia y finalmente uno con la agregación de nanopartículas para posteriormente comparar sus propiedades y reunir conclusiones muy importantes. Las actividades que se llevaron a cabo fue la preparación de las probetas, el registro de temperatura, forma y peso para llevar el registro preciso de estos elementos. Posteriormente se observaron las muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y Difracción de Rayos X (DRX) y se llevaron a cabo estas pruebas para estudiar la morfología y la estructura de los diferentes tipos de cemento a analizar.

3.2. MATERIAL: CEMENTO PORTLAND^[18]

GENERALIDADES

El **Cemento Portland Normal** es el producto que se obtiene de la molienda del clinker y yeso como regulador de fraguado, que sirve como ligante hidráulico, o sea una sustancia que mezclada con el agua, está en condiciones de endurecer ya sea en el aire, como debajo del agua. La piedra de cemento en vía de formación presenta resistencias elevadas y no se disuelve en el agua.

HISTORIA

Los romanos utilizaban en la antigüedad una mezcla hidráulica compuesta de calcáneos arcillosos con agregado de puzolana o bien harina de laterita. Con los agregados apropiados, ellos estaban en condición de producir el Opus Caementitium o "cemento romano", precursor de nuestro hormigón y que dio origen al término cemento. En 1824, el inglés J. Aspin, elaboro y patentó un producto similar al cemento, obtenido mediante la cocción de una mezcla de calcáneos y arcilla finamente molida. Este ligante permitía confeccionar un hormigón similar al obtenido con la piedra Portland (calcáreo muy resistente de la isla de Portland) comúnmente utilizado en Inglaterra para la construcción. De aquí la denominación "cemento Portland".

18. Ing. Ernesto F. Bravo e Ing. Antonio E. Cornejo. Proceso de Hidratación Del Cemento.
http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento_Fabricacion.pdf

FABRICACIÓN

La fabricación del cemento Pórtland consiste en la preparación de una mezcla de materias primas con granulometría definida, sometida a cocción hasta el umbral del punto de fusión y finalmente molido a polvo fino y reactivo: el cemento. Globalmente se pueden distinguir cuatro etapas en la fabricación del cemento:

EXTRACCIÓN Y TRITURADO DE LA MATERIA PRIMA:



Imagen 3.1 Extracción de la materia prima.

Para producir una tonelada de cemento es necesario utilizar por lo menos una tonelada y media de materia prima –calcáreos y arcillas que liberan agua y dióxido de carbono durante la cocción-. La piedra bruta es pretriturada en la cantera hasta el tamaño de un puño.

MEZGLADO Y REDUCCIÓN DE LA MATERIA PRIMA HASTA UNA FINURA SIMILAR A LA DE LA HARINA:



Imagen 3.2 Mezcla de la materia prima.

Esta etapa prevé el mezclado de las diversas materias primas en las proporciones correspondiente a la composición química óptima. El material que se encuentra en el molino a bolas o vertical es simultáneamente secado y triturado en fino polvo. A la salida se obtiene la harina cruda que será mezclada en los silos de homogeneización hasta la obtención de una composición uniforme.

COCCIÓN DE LA HARINA Y TRANSFORMACIÓN EN CLINKER:



Imagen 3.3 Cocción del Clinker.

El proceso de cocción a una temperatura de aproximadamente 1.450 °C es la operación principal en la fabricación del cemento. Antes de entrar en el horno rotativo, la harina pasa a través de un cambiador térmico y se calienta a casi 1.000 °C. A la salida del horno el material presenta bajo la forma de clinker incandescente que será rápidamente enfriado al aire. Los combustibles utilizados son: carbón, petróleo, gas natural y, cada vez más frecuentemente material recuperado como solventes, aceites usados o neumáticos viejos.

MOLIENDA DEL CLINKER CON YESO Y ADITIVOS:



Imagen 3.4 Molienda del Clinker con diversos aditivos.

Para obtener el material reactivo deseado, el clinker es molido en la unidad de molienda con una pequeña cantidad de yeso (regulador del fraguado). Según el tipo de cemento se agregan al clinker, durante la molienda, compuestos minerales (calcáreos, puzolana, escoria de alto horno, cenizas volante) para formar los llamados cementos con adiciones.

3.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND

Las materia primas utilizadas en la fabricación del cemento portland consiste principalmente en cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar. Sin embargo, el equilibrio no se mantiene durante el enfriamiento afectará el grado de cristalización y la cantidad de material amorfo presente en el clinker enfriado. Las propiedades de este material amorfo, conocido como vidrio, difieren en gran medida de los compuestos cristalinos de una composición química nominal similar. Otra complicación surge debido a la interacción de la parte líquida del clinker con los compuestos cristalinos ya presentes.^[19]

Se suelen considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento; se enumeran a continuación en la tabla 1.1, junto con sus símbolos de abreviación. Esta notación abreviada, utilizada por los químicos del cemento, describe cada óxido con una letra, a saber: CaO = C; SiO₂ = S; Al₂O₃ = A, y Fe₂O₃ = F. análogamente, el H₂O del cemento hidratado, se indica por una H, y SO₃ por S.^[20]

En realidad los silicatos que se encuentran en el cemento no son compuestos puros, pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen efectos importantes en los arreglos atómicos, las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de los silicatos.

Tabla 6. Compuestos principales del Cemento Portland

Nombre del Compuesto	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato Tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrita Tetracálcica	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tabla 6. Los cálculos de composición potencial Del cemento portland se basan em El trabajo de R.H. Bogue y otros, y a menudo se denominan "composición Bogue". [20]

¹⁹. NEVILLE M. Adam, *Tecnología del Concreto*, 1ra. ed., México, 1999, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Extraído de Capítulo 1, Cemento Portland.

²⁰. R.H Bogue, "Chemistry of Cement", New York, Reinhold, 1995.

Las cantidades reales de los diferentes tipos de compuestos varían de manera considerable de un cemento a otro y sin duda es posible obtener distintos tipos de cemento agregando en forma proporcional de los materiales originales. Hace algún tiempo se hizo en Estados Unidos un intento de controlar las propiedades del cemento requeridos para diferentes finalidades, especificando los límites de los cuatro compuestos principales, calculados a partir del análisis de los óxidos.

Este procedimiento eliminaría muchas pruebas físicas que actualmente deben realizarse, pero por desgracia, la mezcla de compuestos calculada no es lo suficientemente precisa, o no considera todas las propiedades principales del cemento, por lo cual no puede servir como sustituto de las pruebas directas de las propiedades requeridas. Sin embargo las pruebas de rayos X, hechas posteriormente a las pruebas de cemento en sus diferentes composiciones, contienen un análisis de cada una de estas muestras.

Tabla 7. Límites de composición aproximados para cemento portland

Óxido	Contenido, porcentaje
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6.0
MgO	0.5 - 4.0
Na ₂ O	0.3 - 1.2
SO ₃	2.0 - 3.5

Es posible obtener una idea general de la composición del cemento en la tabla 7, la cual indica los límites de la mezcla en los diferentes óxidos de los cementos portland. La tabla 8 proporciona las composiciones de óxidos para un cemento normal de los años setenta, así como la mezcla de compuestos^[21] obtenida por cálculo mediante las

Tabla 8. Óxidos y compuestos de un cemento portland normal de 1960^[21]

Típica composición de óxido	Porcentaje	Composición; normal calculada de los compuestos de óxido (usando fórmulas de la pagina 22)	Porcentaje
CaO	63	C ₃ S	10.8
SiO ₂	20	C ₂ S	54.1
Al ₂ O ₃	6	C ₃ A	16.6
Fe ₂ O ₃	3	C ₄ AF	9.1
MgO	1.5	Compuestos menores	---
SO ₃	2		
K ₂ O			
Na ₂ O	1		
Otros	1		
Pérdida por ignición	2		
Residuo insoluble	0.5		

²¹. IDEM Nota Pie de Pág. 19

HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Los cementos fraguan y endurecen al ser mezclados con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua. La hidratación del cemento es una reacción altamente exotérmica.

Luego del proceso de sinterización que le da origen, los constituyentes básicos del cemento son: silicato tricálcico C3S, silicato dicálcico C2S, aluminato tricálcico C3A y ferroaluminato tetracálcico C4FA.

Estos minerales, en contacto con el agua reaccionan dando los siguientes productos hidratados: Los silicatos cálcicos se transforman básicamente en silicatos cálcicos hidratados CSH e hidróxido de calcio CH, el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico forman Aft (etringuita) y Afm (monosulfato).

Durante el proceso de fraguado se produce un cambio de un sistema de copos hacia un sistema de esqueleto viscoelástico capaz de resistir tensiones.

Los cuatro componentes principales del cemento se diferencian no solamente por el calor liberado en el proceso de hidratación, sino también por la velocidad a la cual se produce la reacción de hidratación, siendo diferente en cada uno de ellos pero no del todo desacoplado. Se han realizado intentos para modelar el proceso de hidratación teniendo en cuenta las interacciones que ocurren entre los diferentes compuestos, pero aún no se han logrado resultados cualitativamente razonables.

EL AGUA EN LA HIDRATACIÓN

Durante el proceso hidratación el agua puede encontrarse en diferentes estados:

- Agua químicamente ligada: es aquella que forma parte del sólido generado o sea la que se combina con el cemento para producir una nueva fase diferente del agua y del cemento.
- Agua físicamente ligada: es aquella que se encuentra adsorbida a la superficie de la partícula de gel y ocupa los poros del gel.
- Agua libre: resto de agua que se encuentra en la pasta saturada y ocupa los poros capilares.

Neville^[22] propone otra división arbitraria sobre el agua en la mezcla. A los fines prácticos se pueden considerar dos categorías:

- Agua evaporable: Es el agua que puede ser extraída de la mezcla a una cierta presión de vapor. Está constituida por el agua físicamente ligada y el agua libre.
- Agua no evaporable: Es el agua que no puede ser extraída de la mezcla a una cierta presión de vapor. Se trata en general del agua químicamente ligada y su cantidad aumenta a medida que avanza la reacción de hidratación.

22. IDEM Nota Pie de Pág. 19

La cantidad de agua no evaporable es aprox. un 18% del peso del material no hidratado y cerca de 23% en un cemento completamente hidratado.

3.4 MICROESTRUCTURA DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN ^[23]

Se presenta a continuación una descripción esquemática del proceso de formación de la estructura de una pasta cementicia:

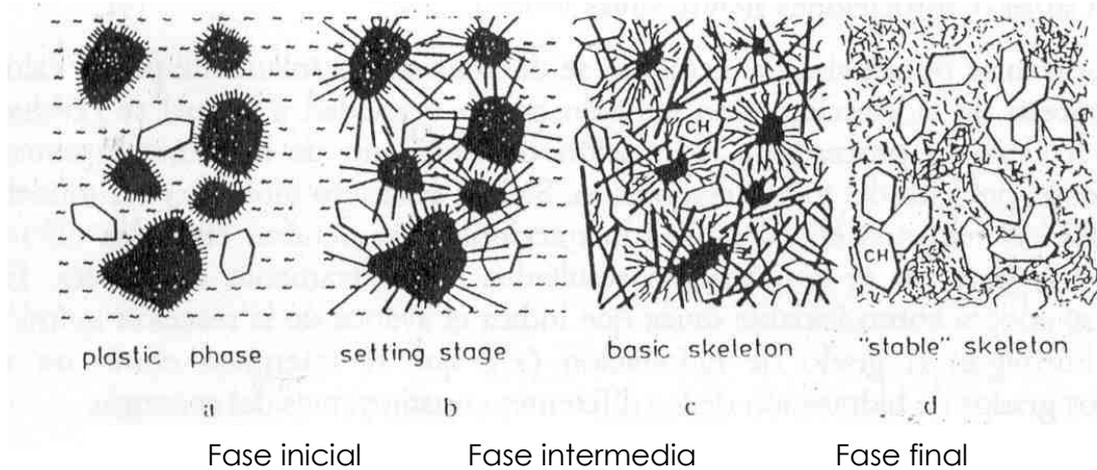


Figura 3.5 Formación de los productos de hidratación

FASE INICIAL

A los 10 minutos de mezclados el cemento con el agua ya puede observarse, con la ayuda de un microscopio electrónico, la aparición de geles alrededor de los granos de cemento no hidratado, junto con pequeñas láminas delgadas de silicato de calcio hidratado CSH. Aproximadamente a la hora, el gel adquiere un espesor de 1 mm y bastoncillos cortos, (aguja o varilla) de Aft se nuclean en la superficie del mismo. En este momento de la reacción todavía no existen fuerzas que ligan las partículas unas con otras.

FASE INTERMEDIA

Esta fase se caracteriza por la hidratación del 30-40% del silicato tricálcico C3S y por el comienzo de la fase de endurecimiento de la pasta. Entre las 3-5 hs. se puede verificar la aparición de una cierta cohesión en la pasta. Los productos que se forman fuera de la frontera original del grano se denominan productos externos, mientras que los que se forman dentro de la misma son los denominados productos internos. Durante las 5-10 hs. iniciales, la reacción del silicato tricálcico C3S genera productos externos de SCH que forman una cubierta sobre la red de bastoncillo de Aft que se ha generado.

FASE FINAL

A las 24 hs. de comenzada la reacción, el C3S sigue reaccionando y generando productos internos. A medida que los granos completamente hidratados se van superponiendo entre sí, la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta aumentan. En esta fase la mayoría de los granos pequeños del cemento ya han hidratado completamente.

23. IDEM Nota Pie de Pág. 18

Después de 2 días el espacio ocupado originalmente por el agua es ocupado por los productos de la hidratación. Los productos externos se vuelven fibrosos y más densos. En esta etapa se encuentran fibras de CSH de 1 mm de longitud con un diámetro de 0.01 mm. También se encuentran partículas de CSH en forma de láminas con tamaños del mismo orden de magnitud. El esqueleto básico se forma entre los 7 y los 28 días.

Acker ^[19] define las tres etapas del proceso de hidratación de la siguiente manera :

- a** - Fase de suspensión: Granos de sólido aislados dentro de una fase líquida.
- b** -Fase de fraguado: Los hidratos establecen conexiones mecánicas entre los granos de cemento apareciendo un esqueleto sólido y una red capilar.
- c** -Fase de endurecimiento: Se caracteriza por el llenado de los espacios capilares por la masa sólida de hidratos.

3.5 MICROESTRUCTURA DEL CEMENTO HIDRATADO POROSIDAD CAPILAR E INTERSTICIAL ^[24]

- Poros capilares: Representan todo aquel volumen que no ha sido llenado por los productos de la hidratación y que se reduce a medida que avanza la reacción. La porosidad capilar de la pasta de cemento depende de la relación agua-cemento (a/c) y del grado de hidratación conseguido. Para relaciones a/c mayores que 0.38, el volumen de gel no es suficiente para llenar todo el espacio disponible, por lo que quedarán espacios capilares una vez finalizada la reacción. Los poros capilares forman una red interconectada que es responsable de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida y de su vulnerabilidad al congelamiento.
- Poros intersticiales: Son espacios intersticiales interconectados entre las partículas de gel (hidratos de los diferentes componentes). Los poros intersticiales son mucho más pequeños que los poros capilares y pueden contener gran cantidad de agua evaporable. Ocupan aproximadamente un 28% del volumen total de gel, independientemente de la relación a/c y del grado de avance de la reacción. En la Figura 3.6, se muestra un esquema simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada. Los puntos negros representan las partículas de gel. Los espacios intersticiales constituyen la porosidad propia del gel. Los espacios marcados con "C" son los espacios o poros capilares.

24. IDEM Nota Pie de Pág. 18

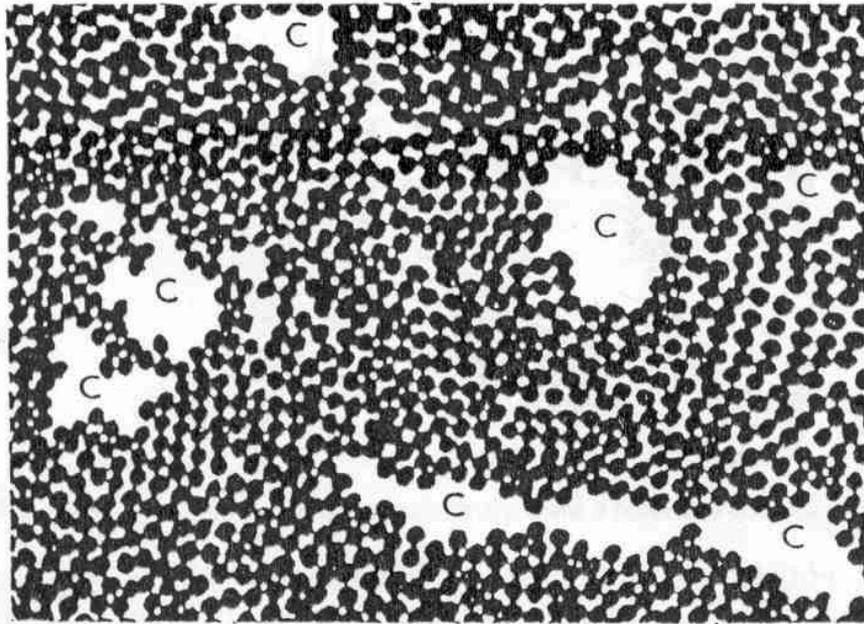


Figura 3.6 Modelo simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada.

RESISTENCIA INTRÍNSECA DEL GEL

En la actualidad no se conocen con precisión las fuerzas que dan cohesión a los geles entre sí pero se cree que se deben a dos tipos de fuerzas: las primeras relacionadas con una atracción física entre superficies sólidas (fuerzas de Van der Waals) y las segundas debidas a ligamentos químicos.

Existen además coincidencias entre algunos investigadores en cuanto a la existencia de fuerzas de conexión entre los hidratos. En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestra la situación supuesta para un grano de cemento en un cierto momento durante el proceso de hidratación. En ellas se pueden observar los productos internos y externos. Dentro de estos últimos se encuentran encajadas partículas de menor tamaño que son las que proporcionan en gran medida la resistencia de la pasta de cemento.

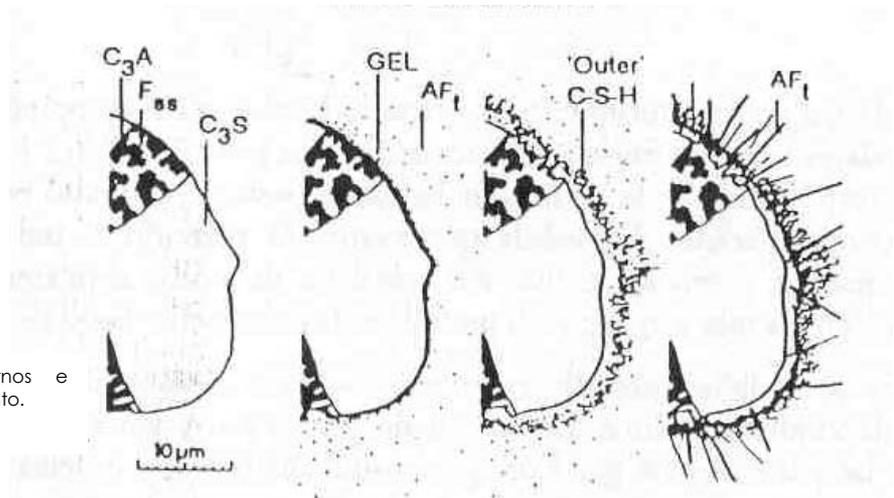


Figura 3.7 Productos externos e internos de un grano de cemento.

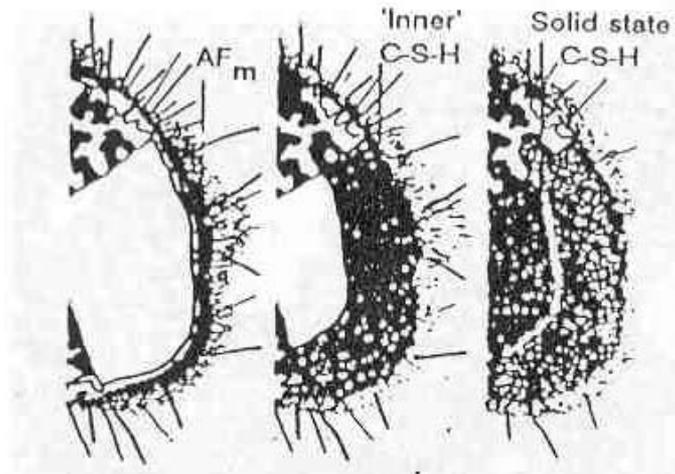


Figura 3.8 Productos externos e internos de un grano de cemento.

3.5 MICROESTRUCTURA DEL CEMENTO HIDRATADO^[25]

Los primeros estudios realizados sobre las características mecánicas del hormigón relacionaban la resistencia de una pasta de cemento con su relación agua/cemento. En la actualidad se sabe que la resistencia de una pasta es función de la microestructura que se desarrolla durante el proceso de hidratación. La resistencia de una mezcla con una determinada relación a/c depende del grado de hidratación, de las características químicas y físicas del cemento, de la temperatura a la que se hidrata, el contenido de aire en la mezcla, etc. Es por esta razón que se considera necesario relacionar el desarrollo o evolución de la microestructura de la pasta de cemento con sus propiedades mecánicas, y en particular con su resistencia a la compresión.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN EL PROCESO DE HIDRATACIÓN

La velocidad a la cual se desarrolla la resistencia a compresión de una pasta de cemento es función de la velocidad con la que hidratan sus cuatro componentes fundamentales. En una pasta de cemento, a temperaturas normales de curado (10-25 °C), el porcentaje de alita que se hidrata a los 28 días es cercano al 100%. La belita, en cambio, es más lenta de reaccionar, y es la principal responsable de la hidratación una vez superados los 28 días. El aumento de temperatura tiene un efecto acelerador del proceso de hidratación de la alita, que es más marcado que en el caso de la belita.

Diferentes autores han documentado la existencia de una ligera tendencia a la disminución de la resistencia a compresión a largo plazo cuando aumenta la temperatura de curado, además de la posibilidad de que se produzca microfisuración.

Verbeck y Helmut [] opinan que a bajas temperaturas los productos de hidratación tienen suficiente tiempo para ser transportados (proceso de difusión) a través del esqueleto o matriz de la pasta de cemento y así depositarse uniformemente. Cuando se cura a altas temperaturas la velocidad de reacción (al ser termoactivada) es mucho más rápida que la velocidad de difusión. Por lo tanto los productos de hidratación se depositan cerca de los granos de cemento, dejando espacios intersticiales desocupados. De esta manera, a pesar de ser el esqueleto sólido más denso y fuerte en el caso de curado a altas temperaturas la resistencia está controlada por los poros intersticiales que quedan entre los granos de cemento.

25. IDEM Nota Pie de Pág. 18

CAPÍTULO IV Metodología Experimental

En este capítulo se describe el proceso experimental, por lo tanto se tomo el procedimiento del artículo titulado **The Chemistry and Physics of Nano-Cement, por el Dr. C.P. Huang llevado a cabo en Maile Aiu Loyola Marymount University, y con fecha de publicación del 11 de Agosto de 2006 (Ver artículo completo en Anexo 1).**

Como mencionamos, el trabajo se centra en la síntesis de componentes de Cemento Portland Tipo I (Uso común en México de este tipo de cemento), con nanopartículas incorporadas para determinar sus propiedades mecánicas. Además se hicieron otro tipo de análisis físicoquímicos para caracterizar su composición y microestructura.

El comportamiento mecánico se determino a partir de pruebas de compresión y de flexión en tres puntos. Todo el trabajo experimental se realizó en el Instituto de Física de la UNAM; la secuencia de actividades fue la siguiente:

- Fabricación de probetas con cemento básico.
- Fabricación de los cementos con adición de las nanopartículas.
- Fabricación de probetas para pruebas mecánicas.
- Realización de pruebas de Compresión y Flexión en Tres Puntos.
- Caracterización de la microestructura con y sin nanopartículas, por microscopía electrónica de barrido SEM.
- Composición química por microanálisis, EDS y determinación de las fases cristalinas presentes por difracción de Rayos X, DRX.

¹⁸. Ing. Ernesto F. Bravo e Ing. Antonio E. Cornejo. Proceso de Hidratación Del Cemento.
http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento_Fabricacion.pdf



4.1 MATERIAL Y MÉTODO

4.4.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Se elaboraron 12 moldes de tubo de P.V.C. de 1.25 cm. de diámetro por 2.5 cm. de altura la proporción de agua cemento fue obtenida del artículo escrito por **Dr. C.P. Huang**^[26] la cual menciona que por cada 6.27 gr. de cemento se deben utilizar 15 ml. de agua por cada molde. Estas muestras se realizan con el fin de llevar a cabo pruebas de Compresión, por medio de la Máquina de Pruebas Universal SHIMADZU, Mod. AG-100 KNG. (Ver Figura 4.1)

El cemento utilizado fue de marca comercial llamada Cementos Cruz Azul, Tipo Portland II. También se elaboraron moldes de dimensiones 1.25 cm. de diámetro por 6.00 cm. de longitud, con el fin de realizar cortes, obteniendo paralelepípedos rectangulares y sacar estas muestras para llevar a cabo Pruebas de Flexión de Tres Puntos. (Ver Figuras 4.2, 4.3 y 4.4).



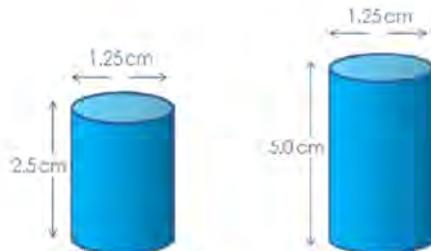
Figura 4.1 Máquina Shimadzu, Mod. AG-100 KNG. En la que se llevaron a cabo las pruebas de Compresión y Flexión en Tres Puntos, la cual se encuentra en el Instituto de Física Departamento de Estado Sólido.



Figuras 4.2 y 4.3 Selección y preparación de material para el vaciado de los moldes.

26. *The Chemistry and Physics of Nano-Cement*, por el Dr. C.P. Huang llevado a cabo en Maile Aiu Loyola Marymount University, y con fecha de publicación del 11 de Agosto de 2006 (Ver artículo completo en Anexo 1).

Moldes de Fabricación del Cemento para Pruebas a Compresión



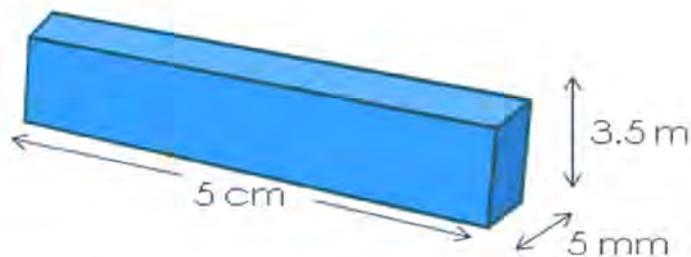
Hechas de Tubo de P.V.C.
Proporción de Agua/Cemento: 0,45



Figura 4.4 Selección de material para el vaciado de los moldes.

Se diseñaron y fabricaron estos moldes con el fin de llevar a cabo Pruebas de Resistencia a la Fractura en Compresión y a la Flexión tratando de simular el comportamiento que se tienen en elementos estructurales según sea el caso ya sea en Columnas (Compresión) y en vigas (Flexión).

Moldes de Fabricación del Cemento para Pruebas a Flexión de Tres Puntos



Hechas de Tubo de P.V.C.
Proporción de Agua/Cemento: 0,45
Posteriormente se cortaron mediante un disco de diamante para la obtención de paralelepípedos rectangulares.

4.1.2 MATERIALES



Figura 4.5 Saco de Cemento Utilizado para llevar a cabo muestras de laboratorio. Extraída de: http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo_II.htm

Cemento

Se utilizó Cemento Portland de la Marca Cruz Azul, ya que en el estudio del mercado se encontró que este es uno de los más comunes y el que en la mayor de las ocasiones se llevan los trabajos de sitio y con el cual se pueden llevar a cabo mezclas pequeñas.

El Cemento Cruz Azul Tipo II Modificado CPO 30-R (Composición no reportada, posteriormente se mostrara el Análisis de Rayos X) satisface ampliamente las especificaciones de la Norma Mexicana NMX C-414-ONNCCE y de la Norma Norteamericana ASTM C-150. El Cemento Cruz Azul Tipo II Modificado CPO 30 R pasa por un estricto control de calidad y puede ser empleado en todo tipo de obras, desde la autoconstrucción hasta aquellas donde se requiere de ingeniería y arquitectura. Se utiliza ampliamente en la industria de los prefabricados y premezclados. Así como en la construcción de puentes, aeropuertos, edificios y conjuntos habitacionales, entre otros. Por su composición química, el Cemento Cruz Azul Tipo II Modificado CPO 30 R genera menor calor de hidratación que sus similares, con lo que se disminuye notablemente la formación de fisuras y lo hace resistente al ataque moderado de agentes agresivos del agua y del suelo, principalmente de sulfatos y salitre.^[27]



Figura 4.6 Bote de Fosfato Tricalcico, beta-fosfato de calcio $\beta\text{-Ca}(\text{PO}_4)_2$ de Fluka. Archivo Personal de Alberto Muciño Vélez.

Fosfato Tricalcico (TCP)

También se utilizó el beta-fosfato de calcio $\beta\text{-Ca}(\text{PO}_4)_2$ de Fluka, pureza $\geq 96\%$ para obtener el cambio de fases. Se tomó como referencia la Tesis Titulada **Síntesis y Estudio de Propiedades Físicas de Cerámicas Bioeutéticas** para la aplicación de este material. La autora explica la aplicación de cerámicas basadas en fosfato de calcio y silicato de calcio, como posibles sustitutos de los huesos, ya que “una de las fases del Fosfato Tricalcico se disuelve al estar en contacto entre el hueso propiciando la formación de hidroxapatita, este sistema presenta porosidad en el medio fisiológico, lo cual es deseable en los implantes, para que el tejido óseo crezca dentro de la estructura porosa”^[28]. A esto P.N. De Aza^[29] y colaboradores, han bautizado a este material como Cerámica Bioeutética.

27. Cementos Cruz Azul, descripción de cemento Portland. http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo_II.html.

28. Extracción Literal de la Tesis Titulada “Síntesis y Estudio de Propiedades Físicas de Cerámicas Bioeutéticas”, Erendira Martínez Acevedo., México – D.F., 2007.

29. P.N. De Aza, A. H. De Aza, S. De Aza, 2005, Crystalline Bioceramic Materials, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol.44, No.3, Pág. 135-145.



Agua Desionizada

El agua desionizada es aquella de la cual se han eliminado cationes como los de sodio, calcio, hierro, cobre etc., y aniones como el carbonato, fluoruro, cloruro, etc. mediante un proceso de intercambio iónico. Empleamos este tipo de agua para eliminar el efecto que pudieran tener otros iones en el proceso de hidratación de las muestras a estudiar.

Figura 4.7 Agua Desionizado utilizada durante la preparación de las muestras.



Figura 4.8 Maquina donde se efectuó la molienda de TCP con una duración de 12 Hrs.

Para la obtención de partículas submicrométricas(nanométricas), en el caso del TCP se siguió un procedimiento de molienda en seco (Ver Figura 4.8 y 4.9). Las partículas así obtenidas, se mezclaron directamente con el polvo de cemento o se preparó una suspensión con el agua desionizada para agregar posteriormente el Cemento Portland.



Figura 4.9 Recipiente en cual en su interior se encuentran TCP y balines, antes de llevar a cabo la molienda.

Nanotubos de Titanio

Como parte de esta investigación, también se incorporaron Nanotubos de Oxido de Titanio que amablemente nos proporciono La Dra. Lucía Díaz Barriga, quien es Investigadora del Instituto de Metalurgia del Instituto Politécnico Nacional (Ver Figura 4.10). En este caso, los nanotubos de mezclaron directamente con el polvo de cemento.

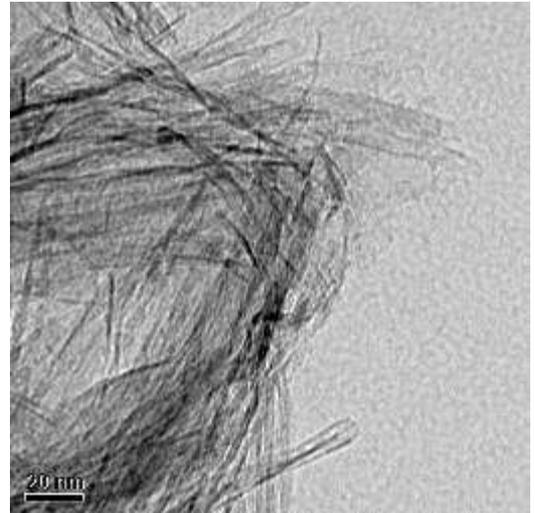


Figura 4.10 Nanotubos de Titanio en estado Simple. Foto tomada por el microscopio de barrido del Instituto de Física.

Fosfato Tricalcico

Recientemente existe un campo el cual ha despertado gran interés dentro del ámbito de los biomateriales, en este caso para la regeneración ósea y es el de los cementos de fosfato de calcio. Ya que se ha podido llevar una biocompatibilidad con el ser humano; de ahí pensar en su integración al cemento que se lleva a las construcciones ya que se piensa que al incluir estas partículas en el cemento puede cambiar notoriamente sus propiedades. Esta tesis se desarrolla y plantea un cemento basado en la adición de Fosfato Tricalcico y a partir de los resultados plantear las conclusiones obtenidas.

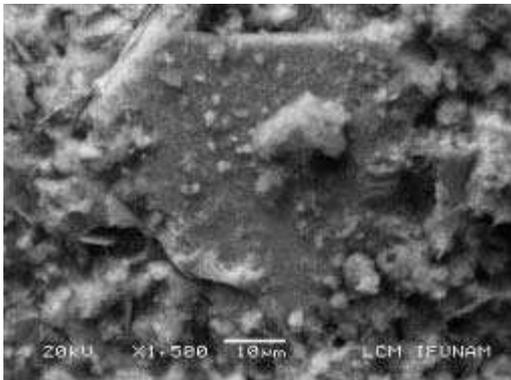


Figura 4.11 TCP en estado Simple. Foto tomada por el microscopio de barrido del Instituto de Física. Tomada el 20 de Abril de 2009.

El fraguado del cemento se produce a partir de la disolución de las partículas de fosfato tricálcico y la precipitación de hidroxiapatita deficiente en calcio de baja cristalinidad. Tanto el porcentaje de reacción como la resistencia a la compresión del cemento aumentan con el tiempo de reacción, alcanzando posteriormente un nivel de saturación. Existe una relación entre la resistencia mecánica del cemento y el porcentaje de fosfato tricálcico que ha reaccionado. Los estudios microestructurales muestran que la resistencia a la compresión se puede atribuir al entrelazamiento entre los cristales que precipitan. "A partir de los estudios de difracción de rayos X y microestructurales es posible identificar los mecanismos de reacción que controlan el proceso en distintas etapas". [30]

30. Tesis de Doctorado. Desarrollo y Caracterización de un Cemento Óseo Basado en Fosfato Tricálcico-a para Aplicaciones Quirúrgicas, Ginebra Molins María Pau, Universidad Politécnica de Cataluña, 1996-España http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0219109-115710//TMPGM1de7.pdf

4.2 ANÁLISIS

Como mencionamos, las técnicas que se utilizaron fueron; Difracción de Rayos X (XRD), Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), con el objetivo de identificar las fases presentes de microestructura.

En particular la técnica de XRD, proporciona información sobre la composición química y estructura cristalina de un material. Cada sólido cristalino posee un patrón característico de difracción que puede emplearse para su identificación.

El tipo de muestras empleadas en este estudio aparecen en la siguiente tabla:

Lote de Muestras a Analizar					
	Prueba de Compresión	Prueba de Flexión de 3 Puntos	Microscopia Electrónica de Barrido	Composición Química por DRX	Composición Química por EDX
Cemento Básico	×	×	×	×	×
Cemento Desecado	×	×	×	×	×
Cemento con Nanopartículas de TiO ₂	×	×	×	×	×
Cemento con Partículas de TCP	×	×	×	×	×

Las características son las siguientes:

- Cemento Básico, es aquel que sólo es la mezcla de cemento agua con la proporción descrita anteriormente (Ver pág. 38) con tiempo de fraguado a medio ambiente.
- Cemento Desecado, (ver Anexo II) es la mezcla de cemento agua pero su tiempo de fraguado fue intervenido, ya que estas muestras se introdujeron a una campana de vacío para reducir el aire que se encuentra en las muestras para eliminar burbujas.
- Cemento con Nanopartículas de TiO₂, esta se compone de la mezcla de cemento y la adición de Nanotubos de Oxido de Titanio en proporción de 500 partes por millón (PPM) de la masa en cemento y posteriormente en agua.
- Cemento con Partículas de TCP, (5% con respecto a su masa), después de que el TCP pase por una molienda de 12 Hrs para generara nanopartículas; posteriormente se agrego agua en la proporción adecuada.

En este trabajo no investigaremos el proceso de fraguado de las muestras antes mencionadas, centraremos nuestra atención en el proceso de endurecimiento el cual caracterizaremos a partir de pruebas de resistencia a la fractura

Después del fraguado y un desecado parcial a temperatura ambiente (7 días), se desmontaron las muestras del molde y se midió el diámetro y la longitud de cada una de ellas. Ver Figura 4.12



Figura 4.12 Selección de material para el vaciado de los moldes.

El mismo procedimiento se siguió en las probetas con adición de nanofibras de oxido de titanio y de nanopartículas de TCP, a continuación mostramos los resultados que se obtuvieron.



Figura 5.1 Prueba de Compresión realizada en la Máquina de Pruebas Universal SHIMADZU



Figura 5.2 Prueba a Flexión en Tres Puntos realizada en la Máquina de Pruebas Universal SHIMADZU

CAPÍTULO V Resultados Preliminares

5.1 PRUEBAS MECÁNICAS

En las Figuras 5.1 y 5.2 aparecen los dispositivos para las pruebas a Compresión y Flexión en Tres Puntos y en las siguientes tablas mostramos los valores de la carga máxima a la fractura en compresión y en flexión. El esfuerzo máximo a la ruptura en compresión se calculo a partir del cociente de la carga máxima a la fractura dividido al área inicial de las probetas. El esfuerzo máximo a la ruptura en flexión se calculo a partir del cociente de la carga máxima a la ruptura en flexión entre el área inicial de la sección rectangular de las probetas. Este procedimiento es válido para materiales frágiles dado que sufren poca deformación antes de fracturarse [31]. En cada caso se hicieron tres pruebas en diferentes probetas y se reporto el promedio de estas.

Pruebas a Compresión

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m2 de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m2)
Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	2699.14 N	0.253	10.668 MPas/m²
Cemento Desechado (Pruebas a Compresión)	3029.26 N	0.249	12.165 MPas/m²
Cemento TiO2 en 500 PPM Partículas en Polvo (Pruebas a Compresión)	2420.36 N	0.250	9.681 MPas/m²
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Polvo (Pruebas a Compresión)	3048.57 N	0.255	11.955 MPas/m²

Pruebas a Flexión en Tres Puntos

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m2 de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m2)
Cemento Básico (Pruebas a Flexión)	7.50 N	0.0173	0.43 MPas/m²
Cemento Desechado (Pruebas a Flexión)	5.93 N	0.0154	0.38 MPas/m²
Cemento TiO2 en 500 PPM Partículas en Polvo (Pruebas a Flexión)	5.93 N	0.0157	0.37 MPas/m²
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Polvo (Pruebas a Flexión)	9.04 N	0.0185	0.48 MPas/m²

31. Richard W. Hertzberg. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 1980. E.D. Wiley



Figura 5.3 Colocación de las muestras en la Máquina Universal SHIMADZU.

En esta primera etapa los experimentos se hicieron para definir el rumbo de la investigación (Ver Figuras 5.3 y 5.4) en las pruebas de compresión el valor más alto de resistencia a la fractura se obtuvo en las muestras desecadas, el resultado es interesante pero sólo desde un punto de vista académico ya que el proceso es económicamente inaceptable para construir las vigas y columnas de un edificio. En segundo término las muestras con adición de TCP resulto ser más resistente tanto en flexión como en compresión. Estudiaremos estos casos con más detalle porque el procedimiento de fabricación de las probetas es el convencional. En las muestras probadas en flexión el caso de máxima resistencia fue para las muestras con TCP.



Figura 5.4 Probetas utilizadas para realizar pruebas de compresión.

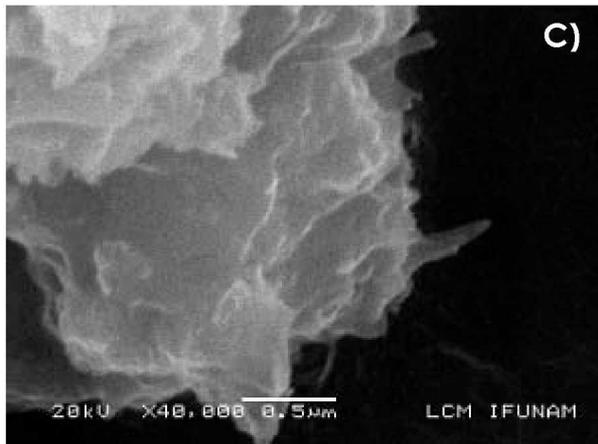
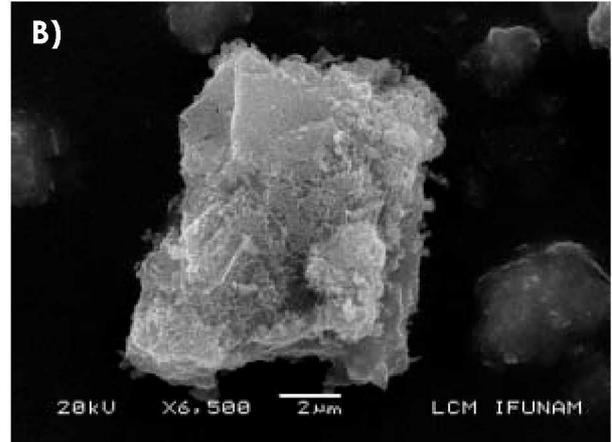
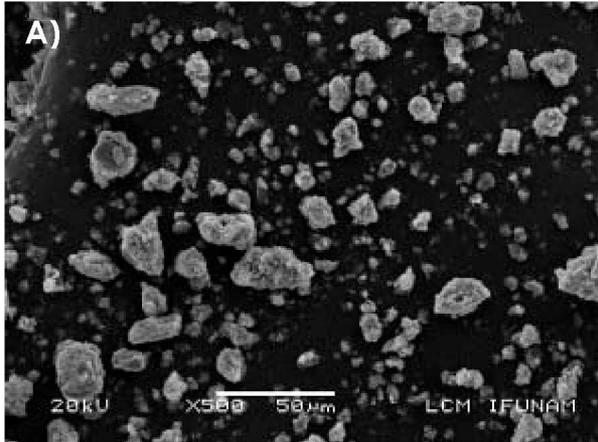


Figura 5.5 Microscopio de Barrido JEOL, en sesión de micrografías para cemento.

5.2 MICROGRAFÍAS

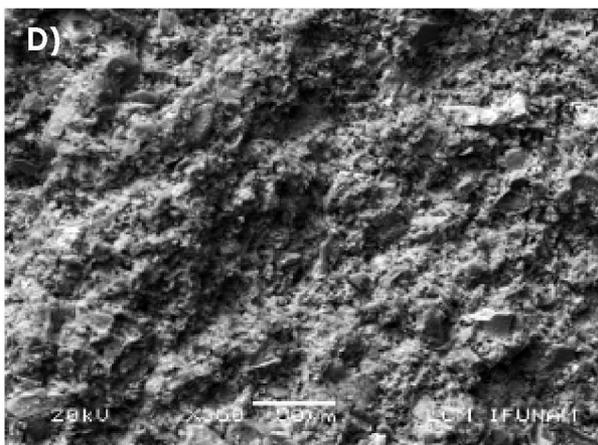
Se tomaron micrografías en un Microscopio de Barrido Marca JEOL LV-5600. (Ver Figura 5.5) Las imágenes de interés para esta investigación las presentaremos en la sección de Resultados. Como ilustración en la imágenes A, B y C presentamos micrografías del cemento empleado en polvo.

Micrografías de Cemento Simple en Polvo



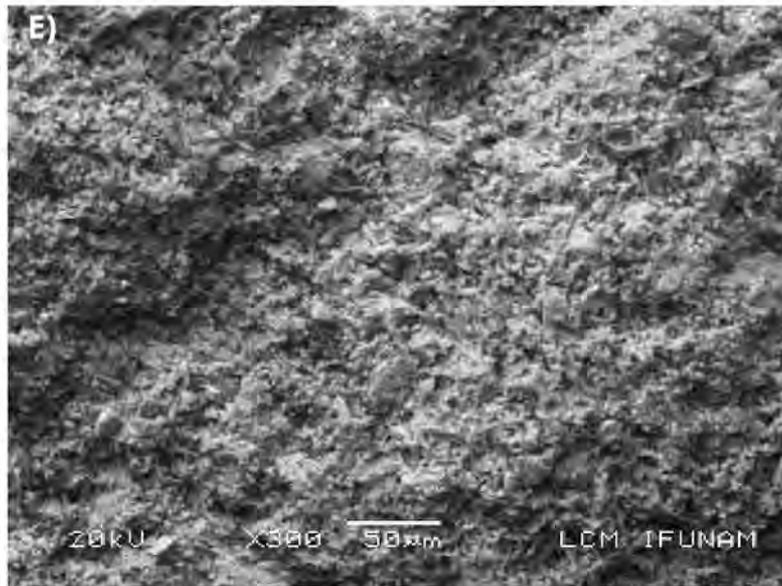
El cemento Portland que usamos está constituido por partículas de diferentes tamaños y formas irregulares (Imagen A, B, C).

Micrografías de Cemento-Agua (Cemento Básico)



La imagen D (X350) fue tomada en la zona de fractura de una probeta de Cemento Básico endurecida durante 7 días (Ver Imagen 29). La superficie de fractura corresponde al de una muestra frágil.

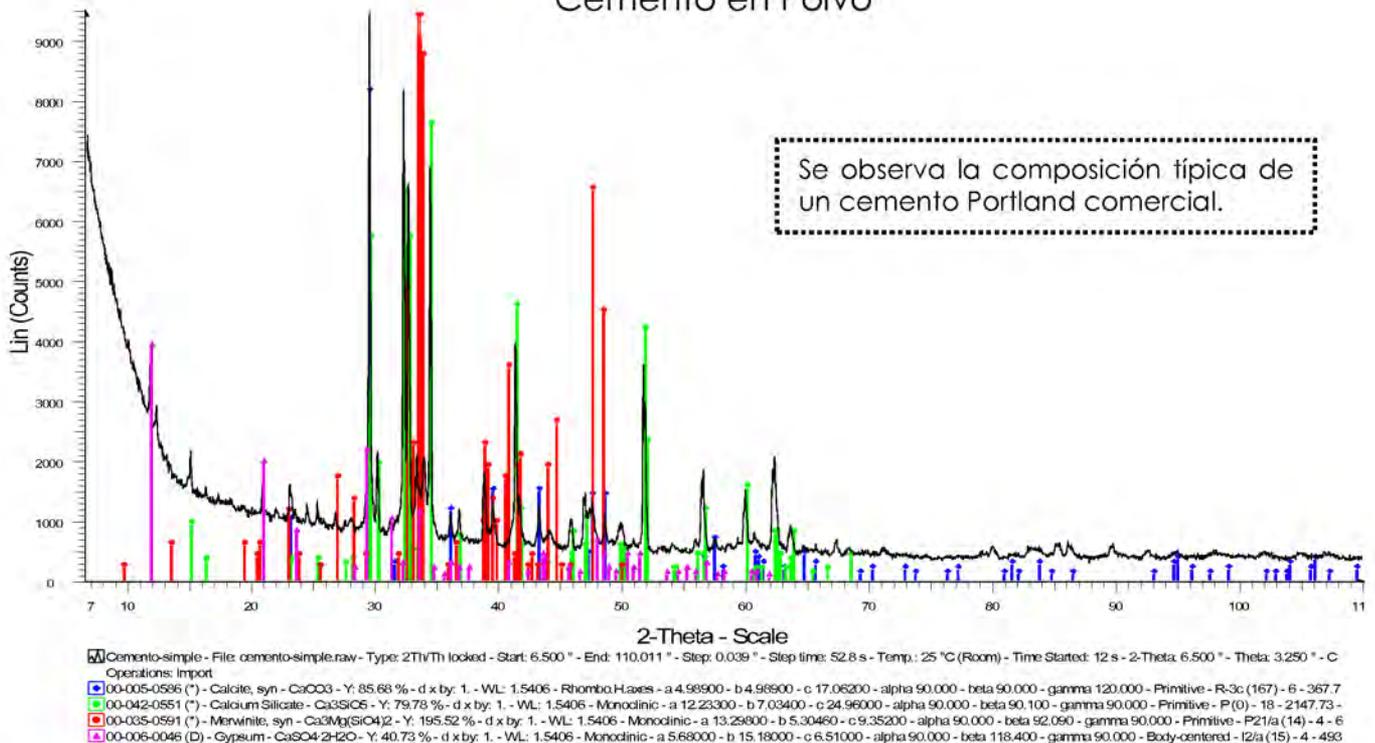
Micrografías de Cemento-TCP 5% en Polvo



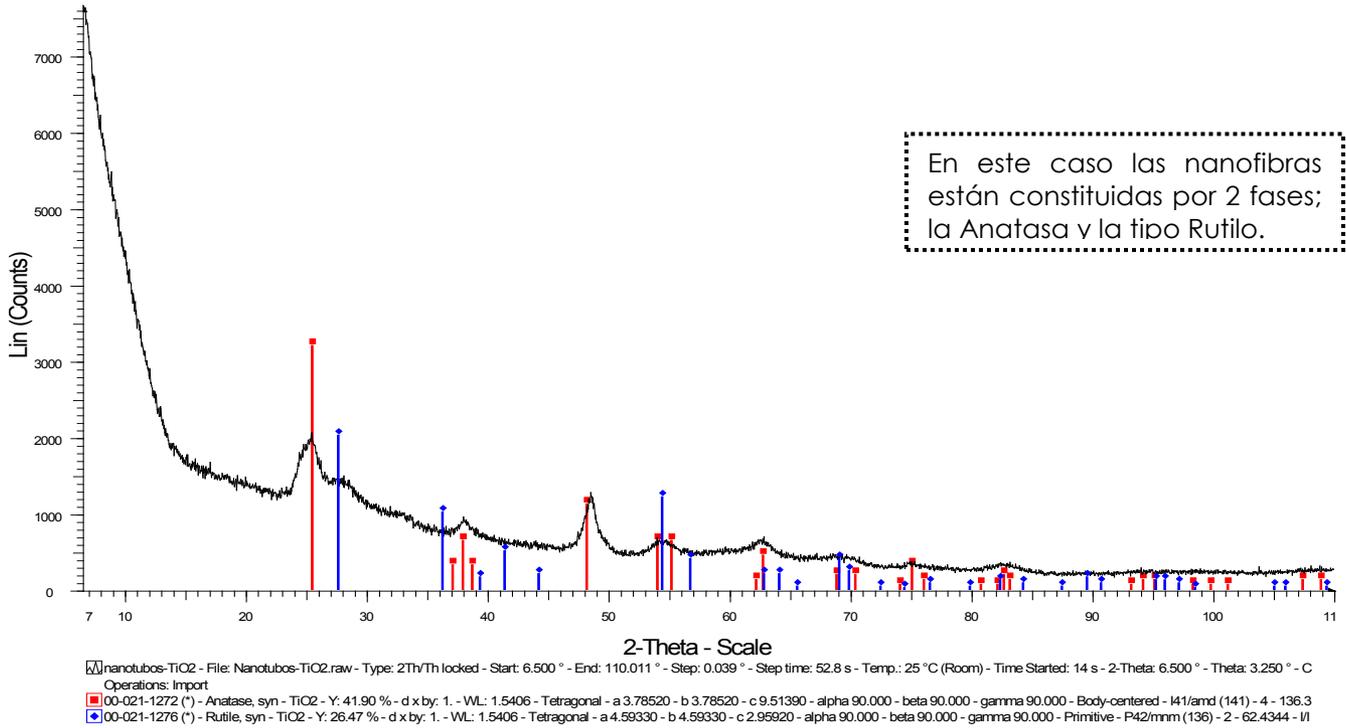
En este caso (Imagen E), para esta amplificación no se aprecian diferencias notables con las probetas de Cemento Básico. Posteriormente haremos un análisis más detallado a partir de observaciones de SEM a mayores amplificaciones.

DIFRACTOGRAMAS DE LOS POLVOS EMPLEADOS EN ESTA PRIMERA ETAPA

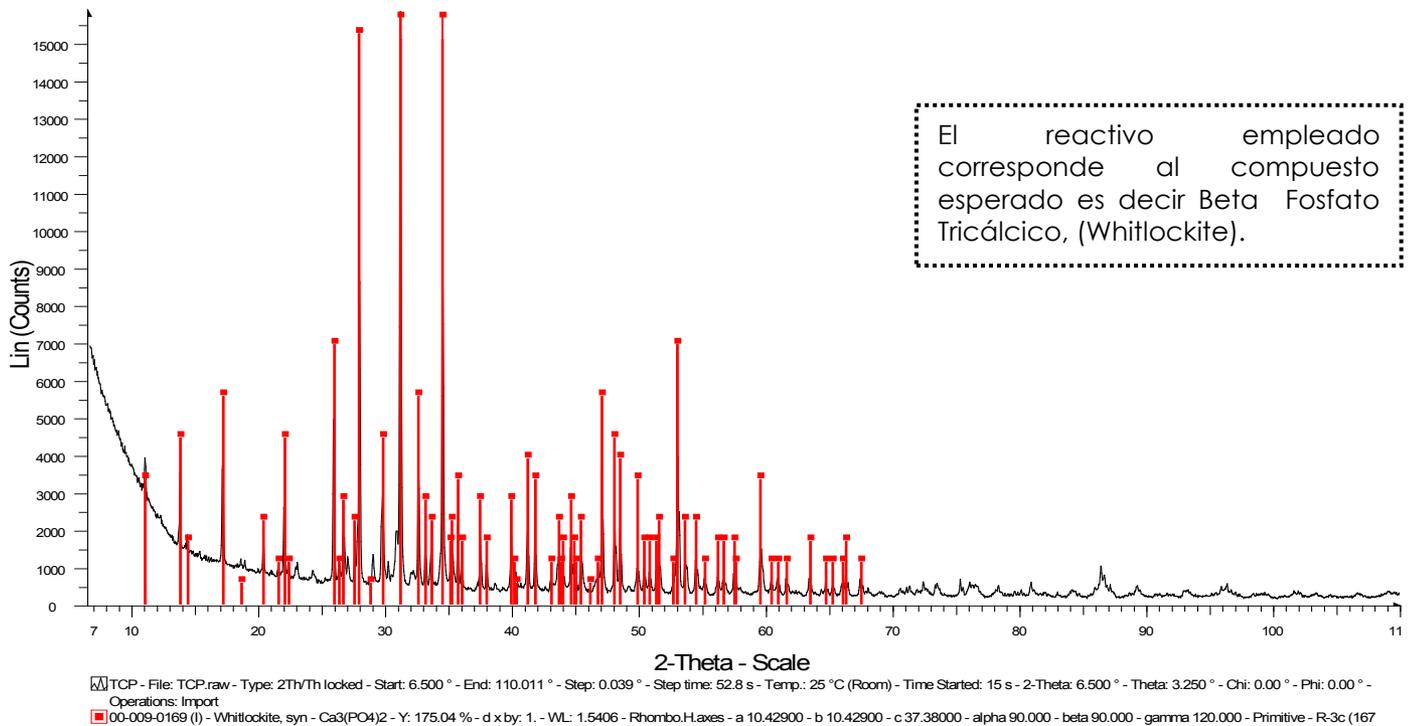
Cemento en Polvo



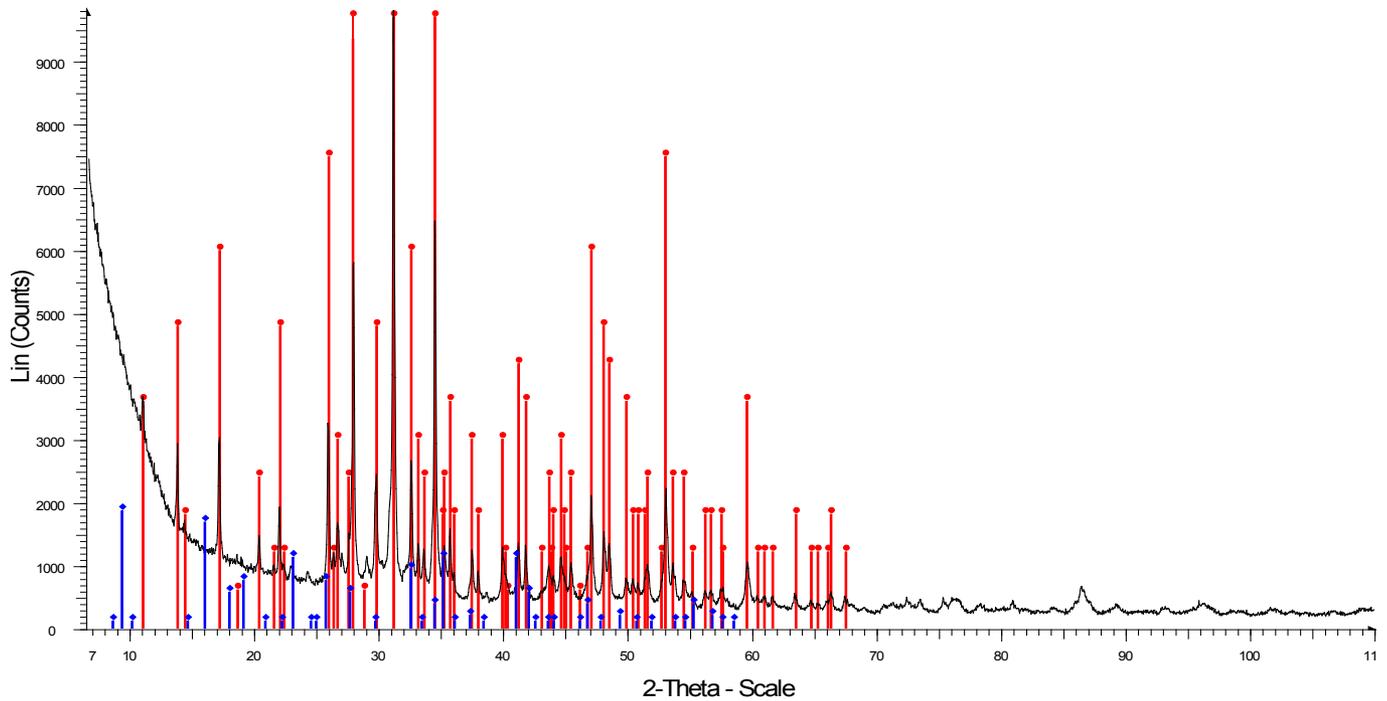
nanotubos-TiO₂



TCP

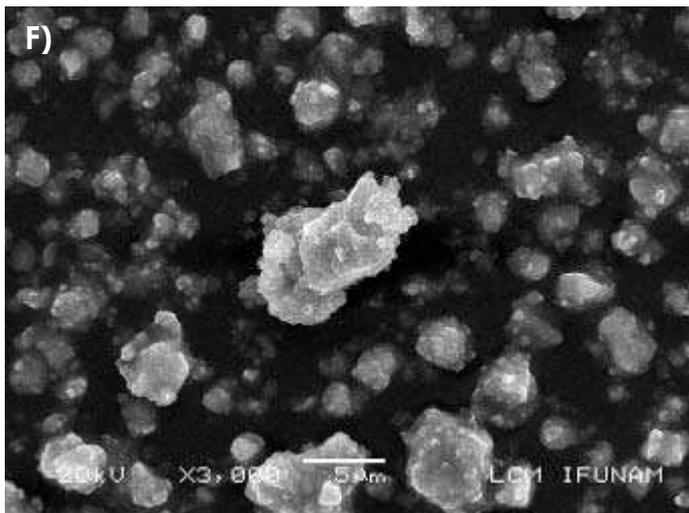


TCP-molienda-12hrs



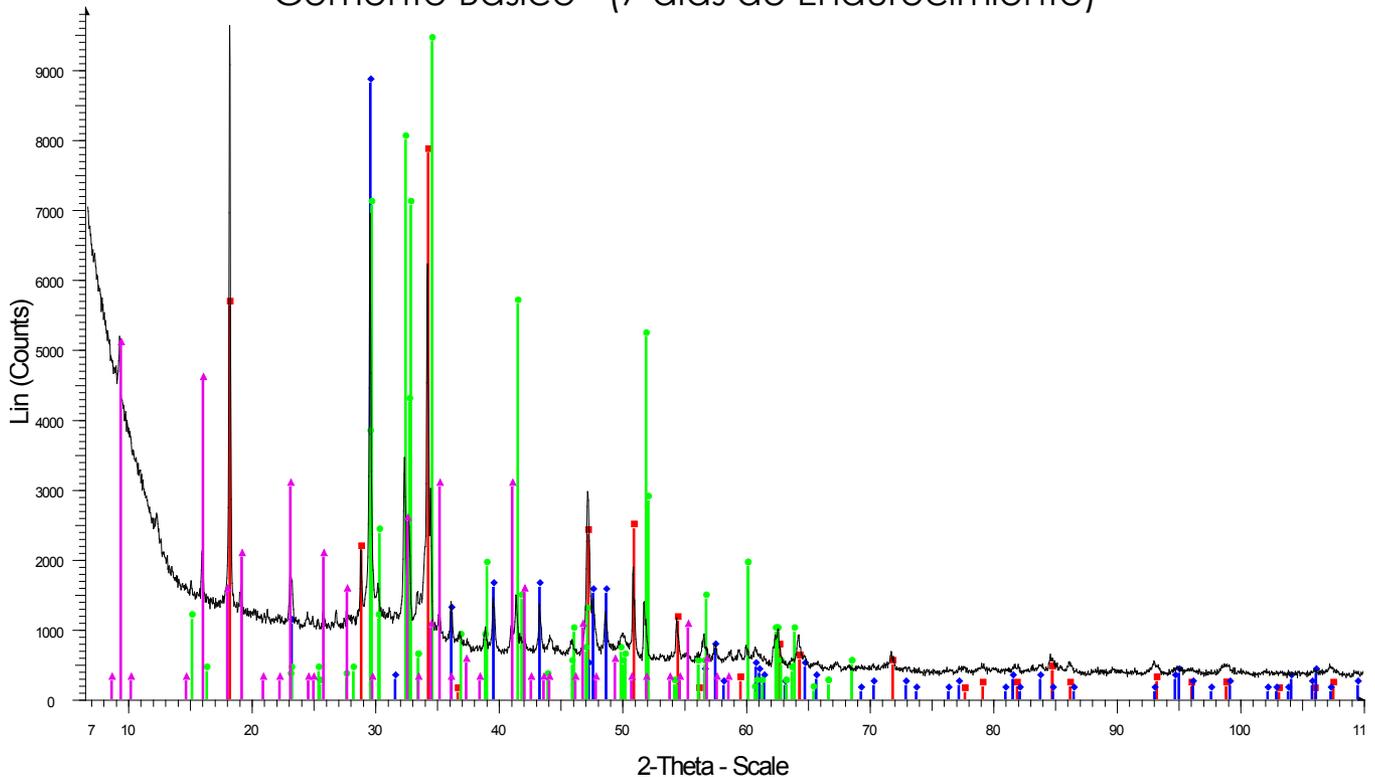
TCP-molienda-12hrs - File: TCP-Molienda-12hrs.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 6.500 ° - End: 110.011 ° - Step: 0.039 ° - Step time: 52.8 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 12 s - 2-Theta: 6.500 ° - Theta: 3. Operations: Import

■ 00-009-0169 (I) - Whitlockite, syn - Ca₃(PO₄)₂ - Y: 305.15 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 10.42900 - b 10.42900 - c 37.38000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-3c (167)
■ 00-013-0350 (D) - Ettringite - Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)12·26H₂O - Y: 18.85 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 22.32000 - b 22.32000 - c 21.33000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P63

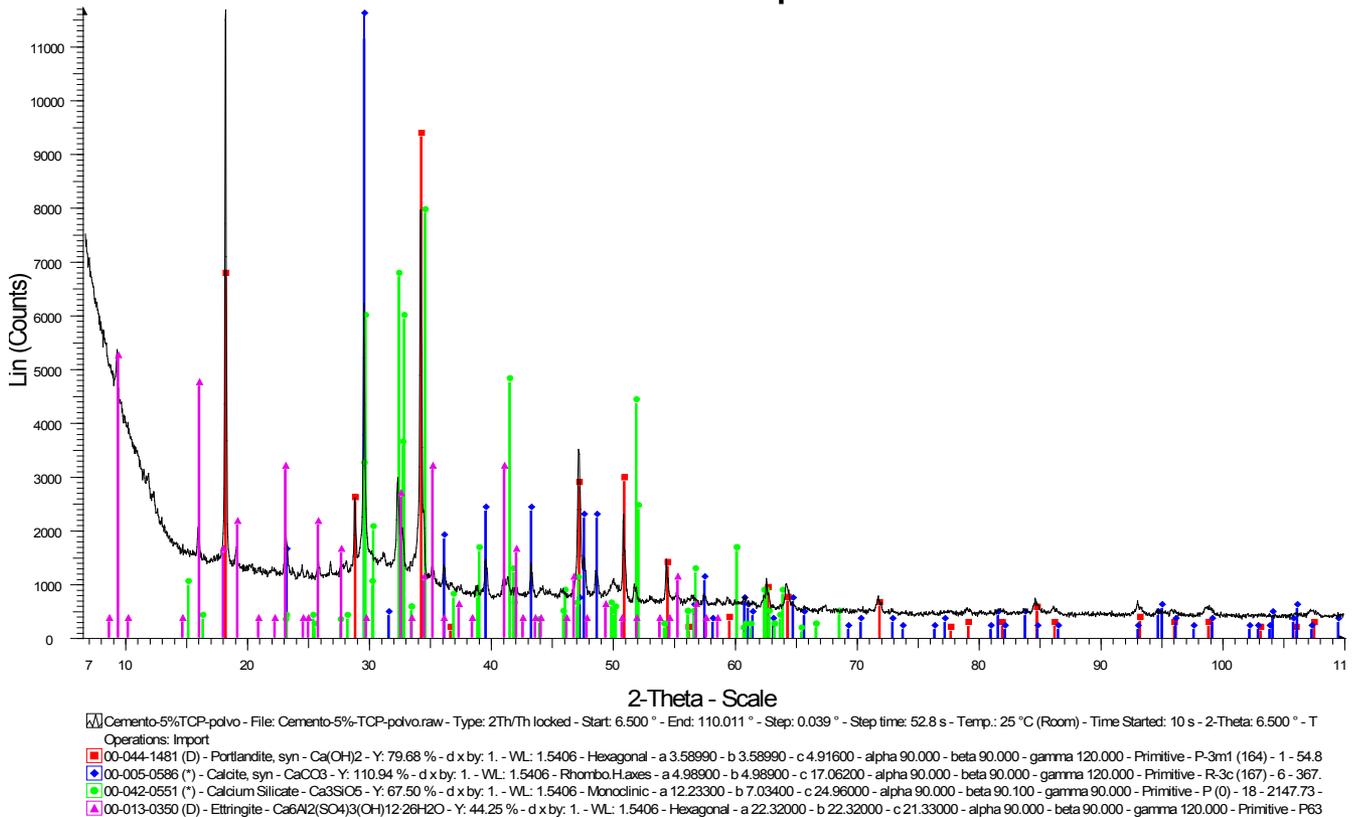


La molienda durante 12 Hrs., no amorfiza completamente al TCP, como se puede ver en el difractograma anterior, sin embargo, suponemos que tenemos una mezcla de partículas submicrométricas cristalinas y amorfas. En la imagen F aparecen cúmulos de partículas submicrométricas de TCP aglomeradas por el oro de recubrimiento, empleado para tener mejor definición de las partículas.

Cemento Básico (7 días de Endurecimiento)



Cemento-5%TCP-polvo (7 Días de Endurecimiento)



El difractograma del cemento con nanofibras de oxido de titanio, esencialmente es similar al cemento simple. El TiO₂ no se detecta por difracción de rayos X debido a la poca cantidad de nanofibras agregadas (500 PPM).

A los resultados anteriores agregaremos los que obtuvimos preparando las muestras siguiendo el procedimiento propuesto en la tesis **“Revisión, Análisis y Aplicación de la Nanotecnología en la Generación y Mejora de Materiales Constructivos. Estudio de Morteros de Cemento con Adiciones de Nanosílice**, de Luis Enrique Carcamo Pérez”, en la cual el aditivo se agrega en forma de suspensión, en su caso partículas de oxido de silicio en agua desionizada.

El método de fabricación de las probetas para medir la resistencia a la fractura fue como se describió anteriormente. El tiempo de envejecimiento también fue de 7 días. A continuación presentamos los valores que obtuvimos a partir de pruebas de compresión y de flexión en tres puntos.

Pruebas a Compresión

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m2 de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m2)
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	4146.12 N	0.244	16.992 MPas/m²
Cemento TiO₂ en 500 PPM Partículas en H₂O (Pruebas a Compresión)	487.60 N	0.249	9.990 MPas/m²

Pruebas de Flexión en Tres Puntos

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m2 de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m2)
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Flexión)	13.80 N	0.0187	0.73 MPas/m²
Cemento TiO2 en 500 PPM Partículas en H₂O (Pruebas a Flexión)	10.10 N	0.0184	0.54 MPas/m²

Es claro que el TCP induce mayor resistencia a la fractura que el TiO₂ en forma de nanofibras.

Finalmente enfocamos nuestra investigación en el estudio del efecto del TCP en la resistencia a la fractura, como función de la concentración. Las pruebas se hicieron en muestras endurecidas durante 7 días, en este caso sólo se hicieron pruebas de compresión y la pasta de cemento con TCP se preparo siguiendo el procedimiento de la tesis de L.E. Carcamo (Ver arriba).

La tabla siguiente reúne los resultados para concentraciones de TCP que van de 0.5% a 15% en peso con respecto al cemento.

Pruebas a Compresión

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m2 de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m2)
Cemento TCP en 0.5% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	3882.63 N	0.275	14.118 MPas/m²
Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	4360.33 N	0.243	17.943 MPas/m²
Cemento TCP en 10% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	3434.85 N	0.243	14.135 MPas/m²
Cemento TCP en 15% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	3640.25 N	0.241	15.104 MPas/m²

Para concluir esta parte a continuación presentamos un compendio de los valores de resistencia a la fractura que se obtuvieron para pruebas de compresión y flexión en tres puntos en todas las muestras que estudiamos.

Pruebas a Compresión

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m2 de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m2)
Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	2699.14 N	0.253	10.668 MPas/m²
Cemento Desechado (Pruebas a Compresión)	3029.26 N	0.249	12.165 MPas/m²
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Polvo (Pruebas a Compresión)	3048.57 N	0.255	11.955 MPas/m²
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	4146.12 N	0.244	16.992 MPas/m²
Cemento TiO2 en 500 PPM Partículas en Polvo (Pruebas a Compresión)	2420.36 N	0.250	9.681 MPas/m²
Cemento TiO2 en 500 PPM Partículas en H₂O (Pruebas a Compresión)	2487.60 N	0.249	9.990 MPas/m²
Cemento TCP en 500 PPM Partículas en H₂O (Pruebas a Compresión)	2102.70 N	0.245	8.582 MPas/m²
Cemento TCP en 0.5 % de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	3882.63 N	0.275	14.118 MPas/m²
Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	4360.33 N	0.243	17.943 MPas/m²
Cemento TCP en 10% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	3434.85 N	0.243	14.135 MPas/m²
Cemento TCP en 15% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Compresión)	3640.25 N	0.241	15.104 MPas/m²

Pruebas a Flexión de Tres Puntos

	Promedio de 3 Muestras	Promedio Área m ² de 3 Muestras	Carga (N) /Área (m ²)
Cemento Básico (Pruebas a Flexión)	7.50 N	0.0173	0.43 MPas/m²
Cemento Desechado (Pruebas a Flexión)	5.93 N	0.0154	0.38 MPas/m²
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Polvo (Pruebas a Flexión)	9.04 N	0.0185	0.48 MPas/m²
Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Flexión)	13.80 N	0.0187	0.73 MPas/m²
Cemento TiO₂ en 500 PPM Partículas en Polvo (Pruebas a Flexión)	5.93 N	0.0157	0.37 MPas/m²
Cemento TiO₂ en 500 PPM Partículas en H₂O (Pruebas a Flexión)	10.10 N	0.0184	0.54 MPas/m²
Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en Agua (Pruebas a Flexión)	10.20 N	0.0174	0.58 MPas/m²

Como mencionamos anteriormente investigamos el tiempo del efecto de fraguado en la resistencia a la fractura para algunas de las muestras que fabricamos, en este caso nos referimos al Cemento Básico y a las muestras de Cemento Básico con TCP al 1% y 5%, por ser estos casos los que mostraron mayor resistencia a la flexión y a la compresión.

En la siguiente tabla aparecen los resultados para tiempos de fraguado que van desde 5 días hasta 37 días ya que la literatura sugiere que para caracterizar los cementos las pruebas de compresión deben realizarse dentro de estos intervalos de tiempo. (De acuerdo a el libro NEVILLE M. Adam, *Tecnología del Concreto*, 1ra. ed., México, 1999, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Cemento Portland.)

En la sección de discusión de resultados presentaremos una serie de gráficas que nos permitirán ver con mayor claridad el efecto de la concentración de TCP y del tiempo de fraguado en el comportamiento mecánico del Cemento Portland.

Pruebas de Compresión a Distintos Tiempos de Endurecimiento

		Promedio	Área m ²	Carga (N) /Área (m ²)
5 Días de Endurecimiento	Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	2698.94 N	0.253	10.66 MPas
	Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	3830.66 N	0.242	15.82 MPas
	Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	3176.94 N	0.242	13.12 MPas
7 Días de Endurecimiento	Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	2837.20 N	0.242	11.72 MPas
	Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	4360.33 N	0.243	17.94 MPas
	Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	4146.12 N	0.244	16.99 MPas
10 Días de Endurecimiento	Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	3999.22 N	0.240	16.66 MPas
	Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	4822.86 N	0.248	19.44 MPas
	Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	4606.80 N	0.244	18.88 MPas
		Promedio	Área m ²	Carga (N) /Área (m ²)
14 Días de Endurecimiento	Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	4413.50 N	0.240	18.38 MPas
	Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	4983.40 N	0.243	20.50 MPas
	Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	4706.54 N	0.238	19.77 MPas
28 Días de Endurecimiento	Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	5536.76 N	0.242	22.87 MPas
	Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	6342.84 N	0.241	26.31 MPas
	Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	6078.74 N	0.241	25.22 MPas
37 Días de Endurecimiento	Cemento Básico (Pruebas a Compresión)	5849.76 N	0.241	24.27 MPas
	Cemento TCP en 1% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	6403.75 N	0.237	27.02 MPas
	Cemento TCP en 5% de su masa Partículas Agregadas en H ₂ O (Pruebas a Compresión)	6267.66 N	0.235	26.67 MPas

CAPÍTULO VI Discusión de Resultados

Los resultados que presentamos en el capítulo anterior se refieren al proceso de endurecimiento, provocado por los productos de la hidrólisis del cemento que se empiezan a formar desde la etapa de fraguado y que evolucionan con el tiempo (Figura 5.1). La norma (Norma Mexicana NMX C-414-ONNCCE y de la Norma Norteamericana ASTM C-150) sugiere que el proceso de endurecimiento prácticamente se completa después de 30 días, generalmente se toma como referencia 28 días, entonces se hacen pruebas de resistencia a la fractura para verificar el nivel de endurecimiento de la pasta de cemento (De acuerdo al procedimiento de la tesis de L.E. Carcamo). [32]

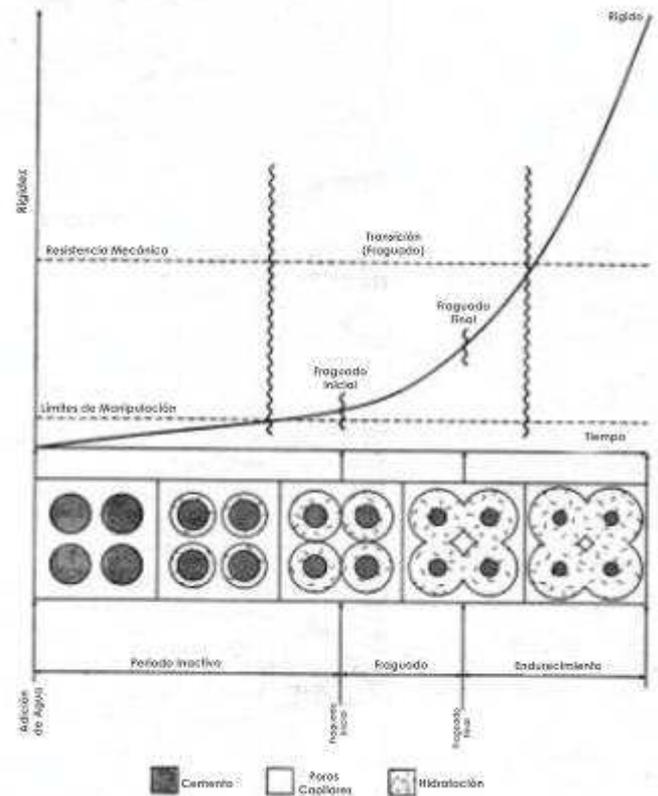


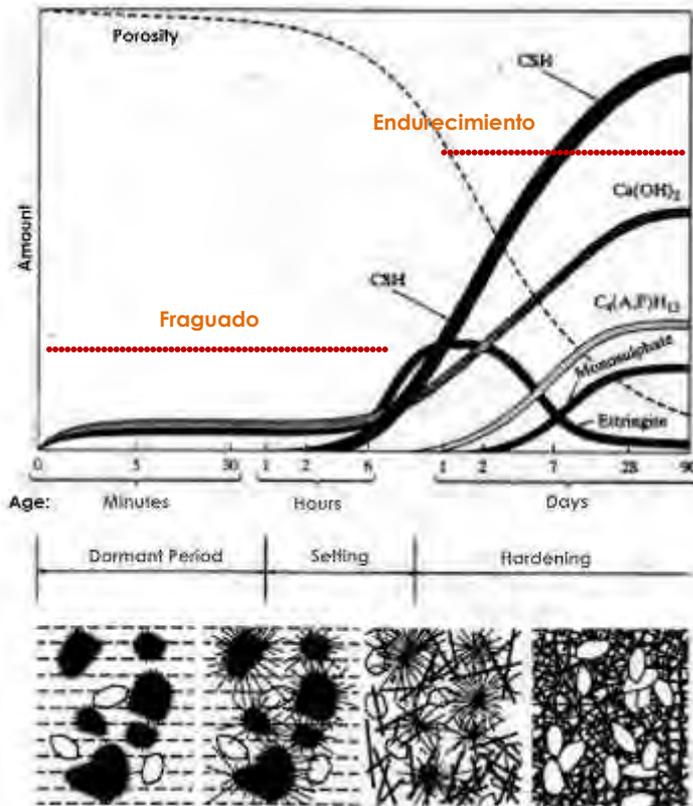
Figura 5.1 Descripción esquemática del proceso de hidratación de la pasta de cemento. [32]

También es práctica común, empezar a medir el endurecimiento del cemento a partir del séptimo día de la fabricación de la pasta (De acuerdo a el libro NEVILLE M. Adam, *Tecnología del Concreto*, 1ra. ed., México, 1999, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Cemento Portland), se sabe ahora que esta práctica está vinculada con la evolución de ciertos procesos microscópicos que suceden en el cemento, es decir, con la interacción de las microestructuras que se forman a partir de los compuestos hidrolizados y en nuestro caso, suponemos que interaccionan sinérgicamente con el fosfato tricálcico (TCP) que usamos como aditivo.

Por ejemplo, se sabe que el TCP en agua desionizada se transforma en Apatita-TCP [33], este es compuesto nuevo que en su estructura cristalina incluye moléculas de agua que pueden interactuar con los iones H^{-1} ó OH^{-1} . La aportación que estas interacciones podrían dar al proceso de endurecimiento del Cemento Básico, es un problema de investigación correspondiente al área de Ciencia e Ingeniería de Materiales; por lo tanto, no abordaremos esa temática en esta tesis.

³²“Revisión, Análisis y Aplicación de la Nanotecnología en la Generación y Mejora de Materiales Constructivos. Estudio de Morteros de Cemento con Adiciones de Nanosilice”, LUIS ENRIQUE CARCAMO PÉREZ, Valdivia-Chile, 2006.

³³. Yubaol., Zhang X., Groot K. “Hidrólisis and phase transition of TCP”. *Biomaterials* 18, (1997) 737-741



En la Figura 5.2, se describe esquemáticamente cómo evolucionan los compuestos hidrolizados que promueven el endurecimiento del cemento, en ella se incluye la etapa de nucleación (setting-fraguado) y de crecimiento (hardening-endurecimiento) de esas estructuras.

Figura 5.2 Descripción esquemática de los productos de reacción y la microestructura que se desarrolla durante la hidratación. [34]

Empezaremos nuestra discusión alrededor de los resultados referentes al endurecimiento correspondiente a siete días de envejecimiento de las probetas de Cemento Pórtland y Cemento Pórtland con TCP 1% en peso, este último corresponde a la mezcla que generó mayor resistencia mecánica a la fractura en compresión (Ver Tabla, Pag.53).

Los difractogramas correspondientes a estas muestras, indican la presencia de los compuestos del cemento utilizado (Portland tipo II) y de algunos productos de la hidrólisis de esos compuestos (la Portlandita- $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la Calcita- CaCO_3 , el Silicato de Calcio- Ca_3SiO_5 y la Estringita- Ca_6CO_3 , Difractograma Cemento-TCP5% Pag.50).

Como primera aproximación, seguimos un procedimiento de ajuste inicial de las curvas al banco de difractogramas de compuestos conocidos de la SICr (Sociedad Internacional de Cristalografía)[35]. Para un análisis más detallado, se tendría que recurrir a otros métodos de ajuste como el de Rietveld[36,37], que permite conocer con más detalle las proporciones de todas las fases cristalinas presentes. Este tipo de análisis rebasa los alcances del presente trabajo.

34. Microestructura del Cemento. Introducción, Extraída de Página de Internet. <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Microestructura%20del%20cemento.pdf>

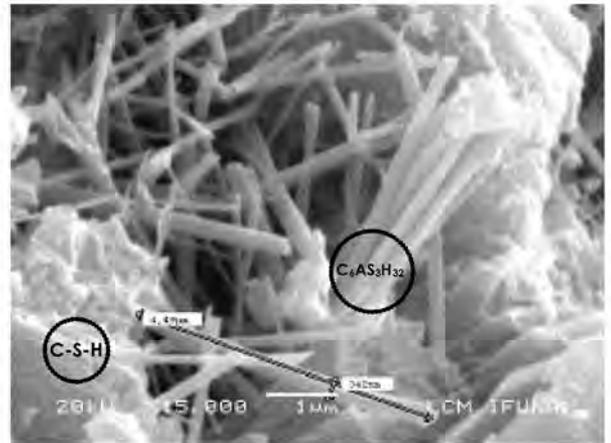
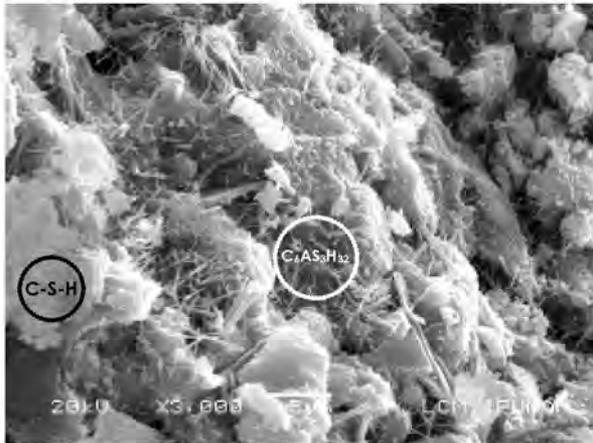
35. Wondratschek, H. & Neubüser, J. (1967) Determination of the symmetry elements of a space group from the 'general positions' listed in the international tables for X-ray crystallography, Vol.I. *Acta.Cryst.* **23**, 349-352.

36. Rietveld, H.M. (1969) A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J.Appl.Cryst.* **2**, 65-71.

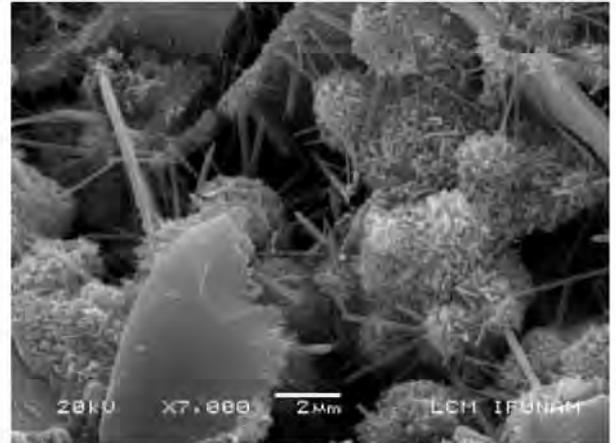
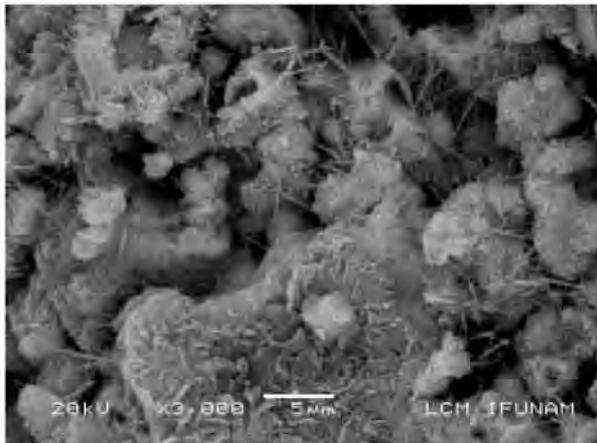
37. Estefanescu, D., Methodologies for Modeling of Solidification Microstructure and Their Capabilities, *ISIJ International*, Vol 35, Nº 6, pp. 637-650, (1995).

Sin embargo, el nivel de nuestros análisis nos permite afirmar que las estructuras esperadas, tanto químicamente como cristalográficamente se generan en las muestras que ensayamos mecánicamente. Las siguientes micrografías tomadas por MEB lo confirman.

Micrografías de Cemento Básico (7 Días de Endurecimiento)



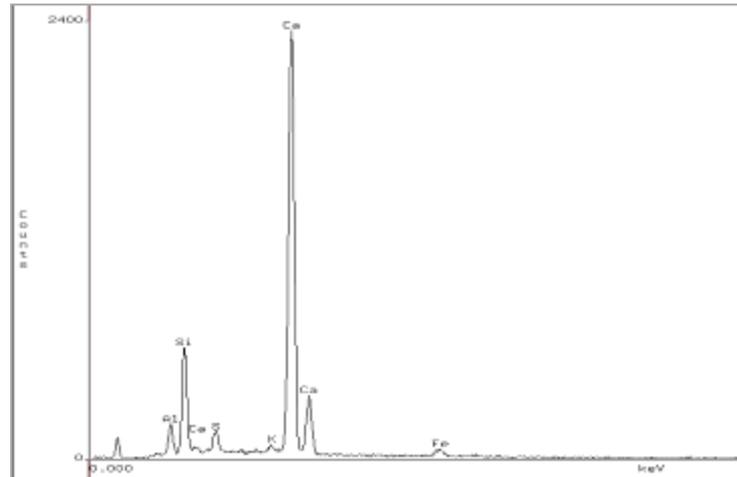
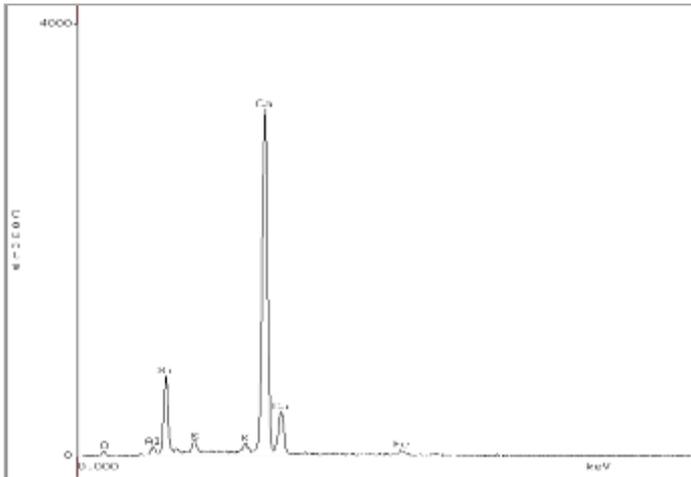
Micrografías de Cemento-TCP en 1 % de su Masa en H₂O (7 Días de Endurecimiento)



Tanto en Cemento Básico como en Cemento-TCP 1% en peso, se pueden ver las típicas estructuras relacionada con los productos de la hidrolización de los compuestos del Cemento Portland. Resaltan las que corresponden a la Estringita ($C_6AS_3H_{32}$, agujas, fibras o varillas) y a la de los silicatos de calcio (C_3S , C_2S) hidratados (CSH), que recubren las partículas y que aportan la mayor contribución al endurecimiento del cemento.

EDS de Cemento Básico (7 Días de Endurecimiento)

EDS de Cemento-TCP en 1 % de su Masa en H₂O (7 Días de Endurecimiento)



Los resultados del microanálisis practicado a las estructuras más notables de las micrografías (recubrimiento y fibras), indican la presencia de los elementos asociados a los compuestos hidrolizados. Dado que el microanálisis se hizo en muestras recubiertas con oro con el fin de obtener imágenes nítidas, fue imposible confirmar la presencia del fósforo en el Cemento-TCP 1% en peso, ya que la señal de este elemento coincide con la del oro, por lo tanto sería necesario hacer una investigación más detallada con otras técnica de análisis, por ejemplo; microdifracción de rayos X, micro-raman, microscopía de transmisión de alta resolución y otras, para averiguar acerca de composición de las estructuras que generan el endurecimiento en la pasta de Cemento Portland. Insistimos, sería un tema del área de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Sin embargo, como mencionamos en la sección de resultados, a partir de las modestas pruebas mecánicas, practicadas en las probetas de cemento que fabricamos, pudimos detectar los efectos de la concentración en peso del TCP en el endurecimiento y su evolución con el tiempo.

En la Figura 5.3, graficamos la variación del esfuerzo máximo a la fractura como función del porcentaje en peso del TCP agregado a la pasta de cemento, en muestras endurecidas durante siete días. Ahí se ve que el esfuerzo máximo crece con la concentración de TCP hasta alcanzar un valor de saturación alrededor del 1%.

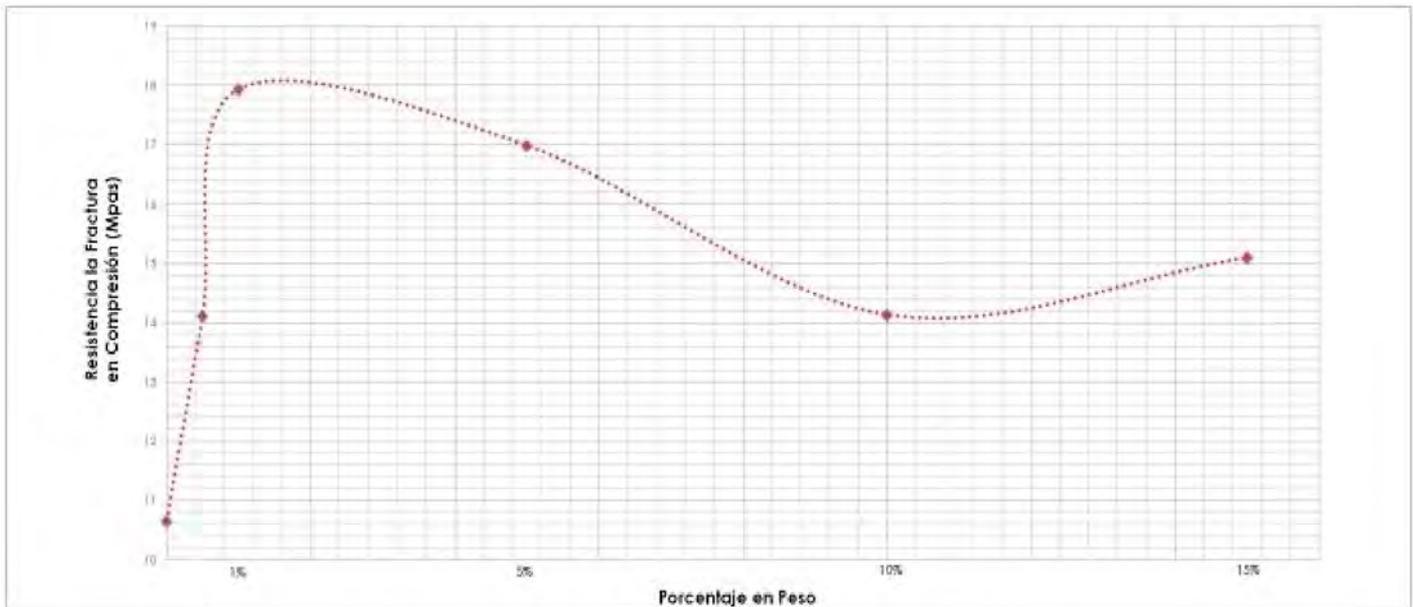


Figura 5.3 Efecto de la concentración del TCP (% en Peso) en la Resistencia a la Fractura en Compresión.

A partir de este resultado, decidimos investigar el proceso de endurecimiento de las muestras para dos concentraciones de TCP, 1% y 5% en peso. La Figura 5.4, muestra los resultados que obtuvimos, en ella se incluyeron los valores de endurecimiento de muestras de Cemento Básico, para un período de 7 a 39 días.

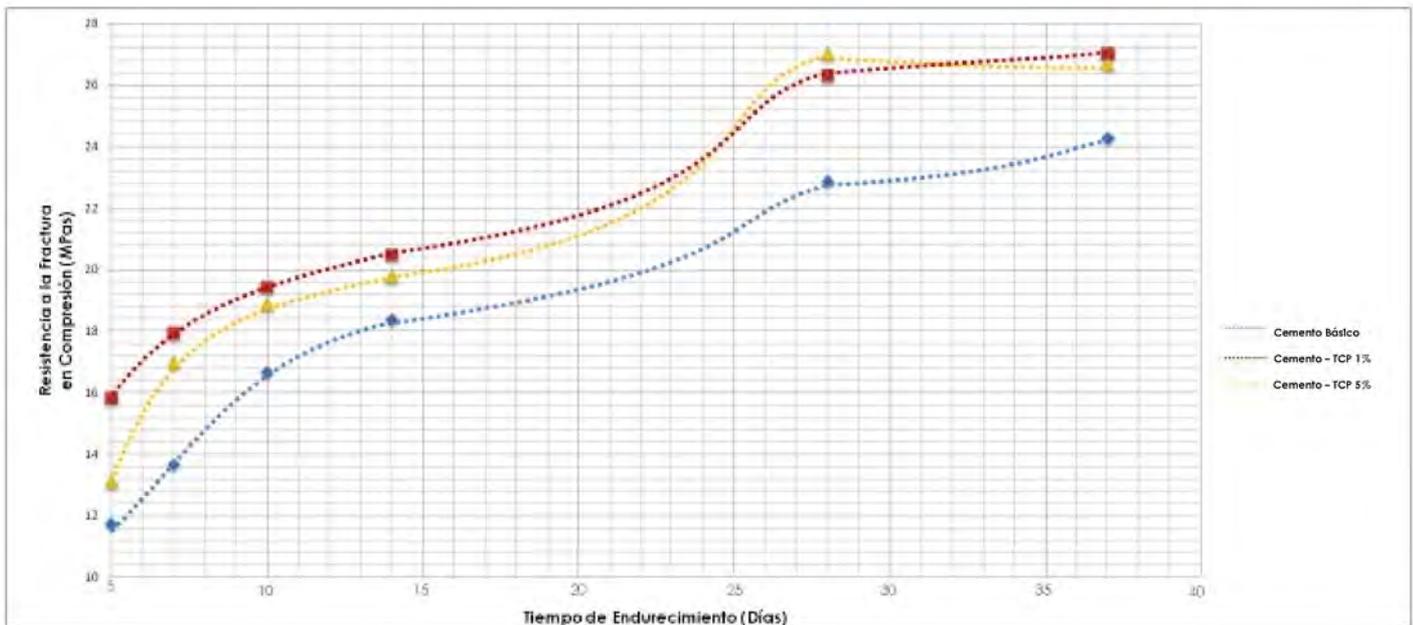


Figura 5.4 Gráfica de proceso de endurecimiento de las muestras Cemento Básico, Cemento-TCP 1% y Cemento TCP 5%.

Esquemáticamente, el efecto del endurecimiento de cada uno de los productos de la hidrólisis aparece representado en la Figura 5.5, en primera aproximación, se puede suponer una contribución aditiva (linealmente independiente) de esos productos en la dureza del cemento, así que al sumarlos, se tendría una curva tipo S, (Ver Figura 5.6).

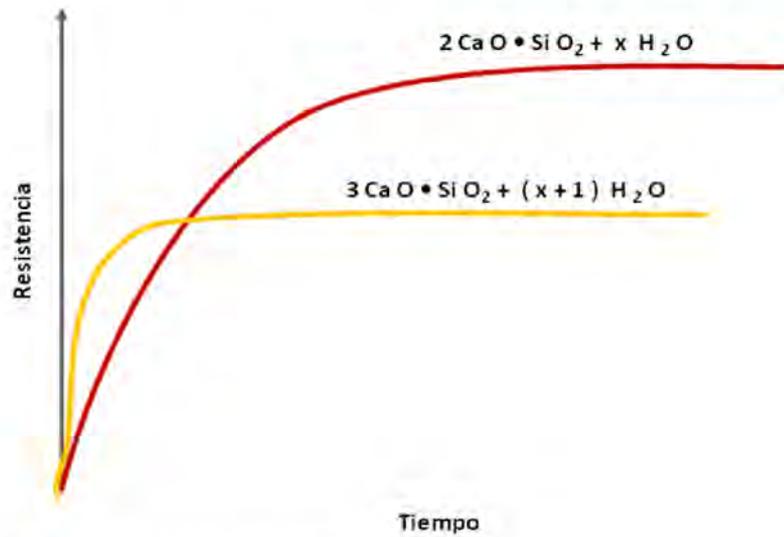


Figura 5.5 Elementos producto de la hidrólisis.

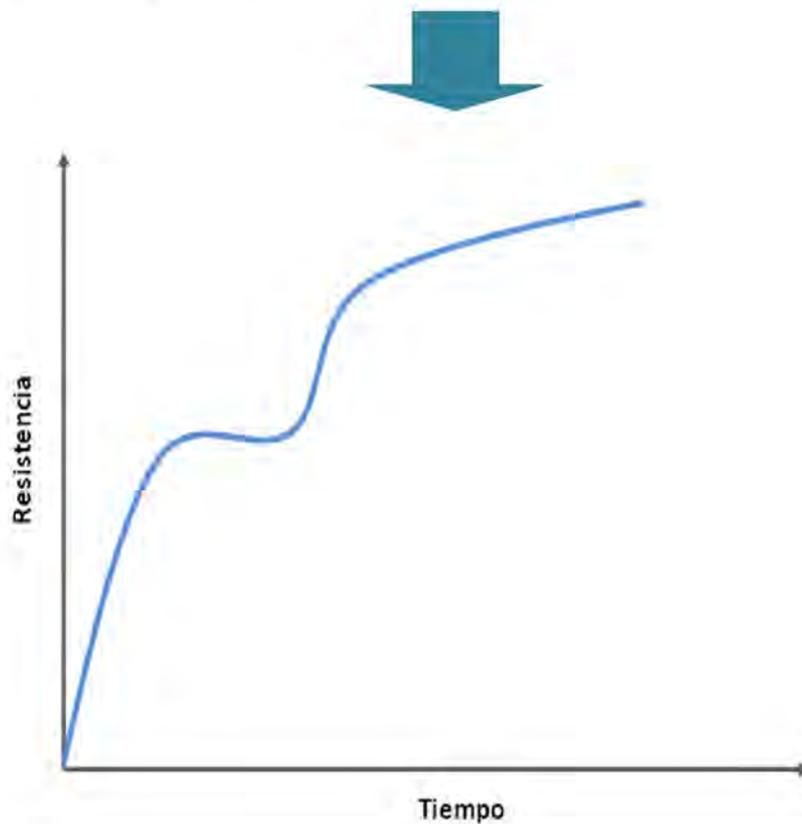


Figura 5.6 Suma de los productos de la dureza del Cemento.

Nosotros obtenemos también una curva tipo S (Figura 5.4) que en general, evoluciona de la misma forma en el Cemento Básico y en el Cemento-TCP. Como vimos (ver Figura 5.3, grafica del efecto de la concentración), desde el principio (siete días), se ve el efecto del TCP en el incremento en el esfuerzo máximo a la fractura, sin embargo, pareciera que conforme transcurre el tiempo la diferencia en el endurecimiento entre el Cemento Básico y el Cemento-TCP va disminuyendo (5.16 MPa para los primeros 5 días de endurecimiento y 2.93 a los 37 días). En términos de porcentaje de endurecimiento con respecto al Cemento Básico en la siguiente gráfica se puede ilustrar este efecto. (Ver Figura 5.7).

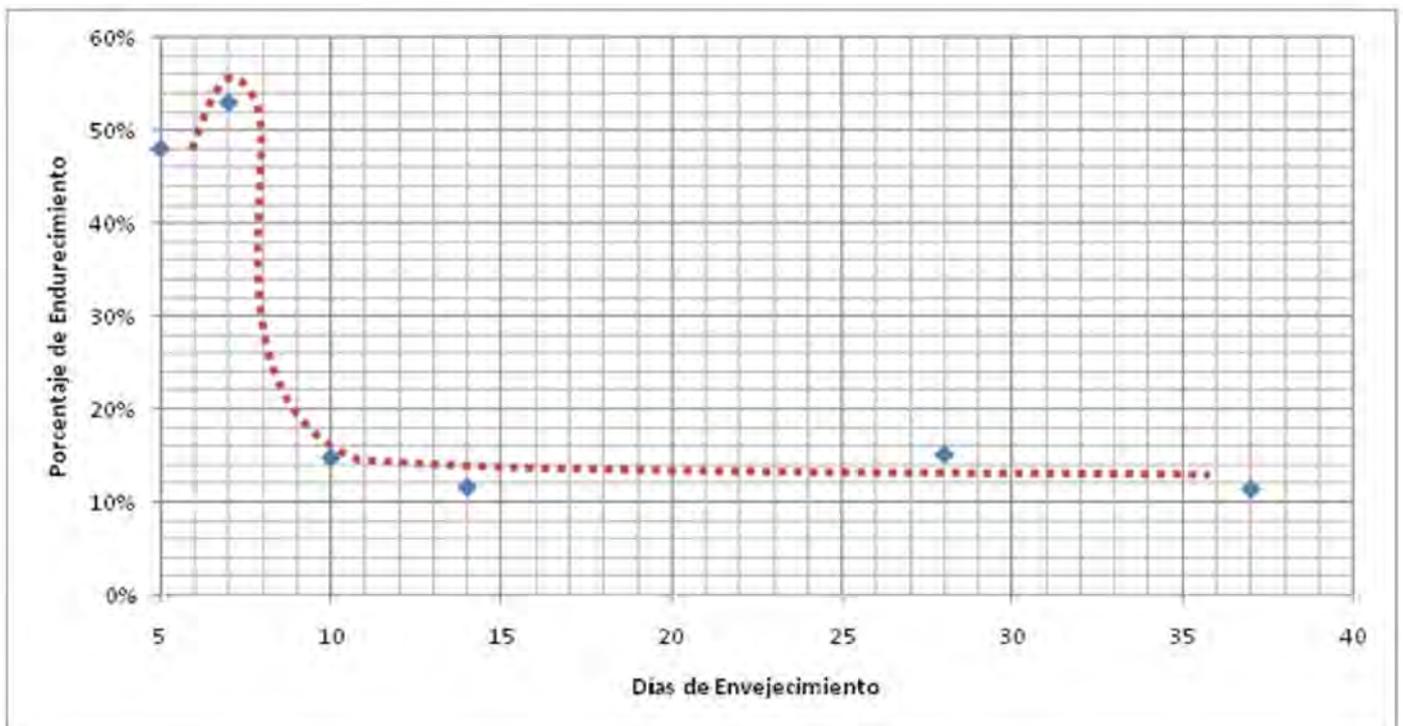


Figura 5.7 Endurecimiento entre Cemento Básico y TCP.

El porcentaje mayor de endurecimiento se tiene en la zona inicial del envejecimiento. Este comportamiento está relacionado posiblemente con estructuras que se forman desde la etapa de fraguado pero que evolucionan rápidamente hasta saturar el proceso de envejecimiento alrededor de los 10 días.

Sería necesario un estudio más detallado de la etapa de fraguado y los primeros estadios del endurecimiento para entender los micromecanismos que controlan el comportamiento del Cemento -TCP. En la medida que se entiendan estos procesos se podría buscar la manera de mantener estables las estructuras que provocan estos niveles notables de endurecimiento. Una vez más este sería un tema del área de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Tenemos dos propuestas para este efecto, uno químico y otro físico.

- Que durante el proceso de fraguado, al reaccionar el TCP con otros productos de la hidrólisis, se generen estructuras que endurezcan al cemento hasta un cierto valor y que después, éstos productos sigan la evolución normal del Cemento Básico.
- O bien, que las nanopartículas de TCP no reaccionen y que se vayan incorporando en las zonas porosas del cemento desde el principio dando lugar a un incremento inicial de la dureza – al generarse poros más pequeños por la oclusión de las partículas (Ver Figura 5.2, Pag.57) y que posteriormente la pasta de Cemento con TCP siga la evolución normal.

Aunque por la facilidad con que el TCP reacciona con silicatos en medios acuosos nos inclinamos por la primera.

Estas hipótesis podrían confirmarse a partir de estudios más detallados en las etapas iniciales del endurecimiento (primeros días) y finales del fraguado, aplicando técnicas como las que mencionamos antes. Queda esto para una investigación posterior.

Finalizaremos esta sección mostrando algunas imágenes de la microestructura que se genera después de 28 días de envejecimiento tanto en Cemento Básico como en Cemento-TCP 1% en peso.

Es claro que durante el envejecimiento se generan estructuras que aumentan la resistencia mecánica del Cemento Portland. En la siguiente imagen presentamos detalles de la superficie de fractura de una probeta de Cemento Básico (envejecida 28 días) en la que se aprecian las estructuras que envuelven a las partículas de C3S o C2S, a partir de las cuales crecen las fibras ya mencionadas.

Marcados en la micrografía se ven los huecos generados por las partículas que se desprendieron durante la fractura.

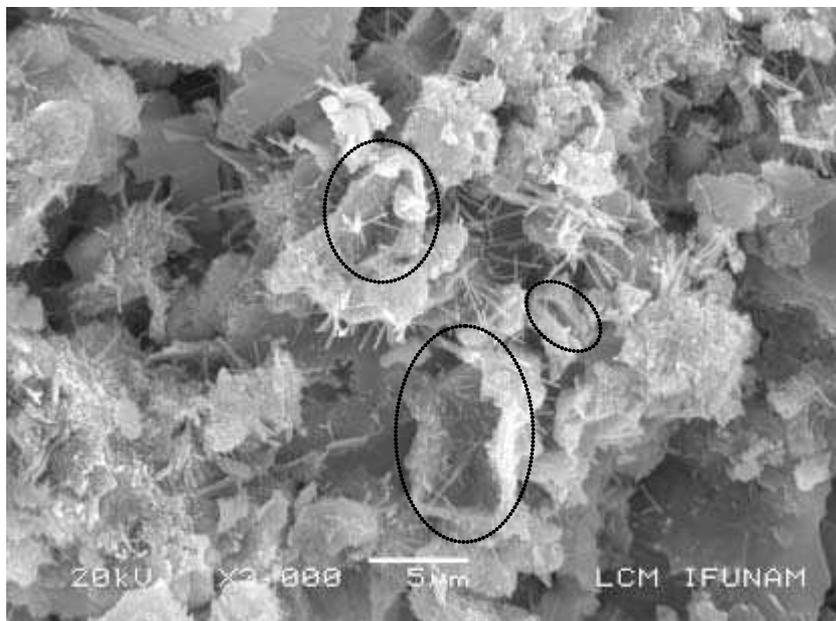


Figura 5.8 Micrografía de Cemento Básico a 28 días de envejecimiento.

La siguiente figura corresponde a una muestra de Cemento-TCP 1% en peso fracturada después de 28 días de envejecimiento.

También se aprecia la capa que recubre a las partículas de C3S y C2S pero a diferencia de la anterior (Cemento Básico), la superficie de recubrimiento de las partículas y el número de agujas es notablemente mayor. Suponemos que esto es consecuencia de la adición del TCP (Figura 5.9).

Otro hecho interesante es que en estas muestras encontramos estructuras similares a las generadas en el material BioEutéctico estudiado por E. Martínez.^[28] La Figura 5.10, muestra un arreglo laminar "distorsionado de dos fases, una clara y otra oscura, cuya composición según el microanálisis practicado corresponde a los elementos típicos del Cemento Portland (Figura 5.11). Será necesario hacer un estudio más detallado de estas estructuras aplicando técnicas como Micro-Raman, micro difracción y detección de perfiles de concentración con microsonda.

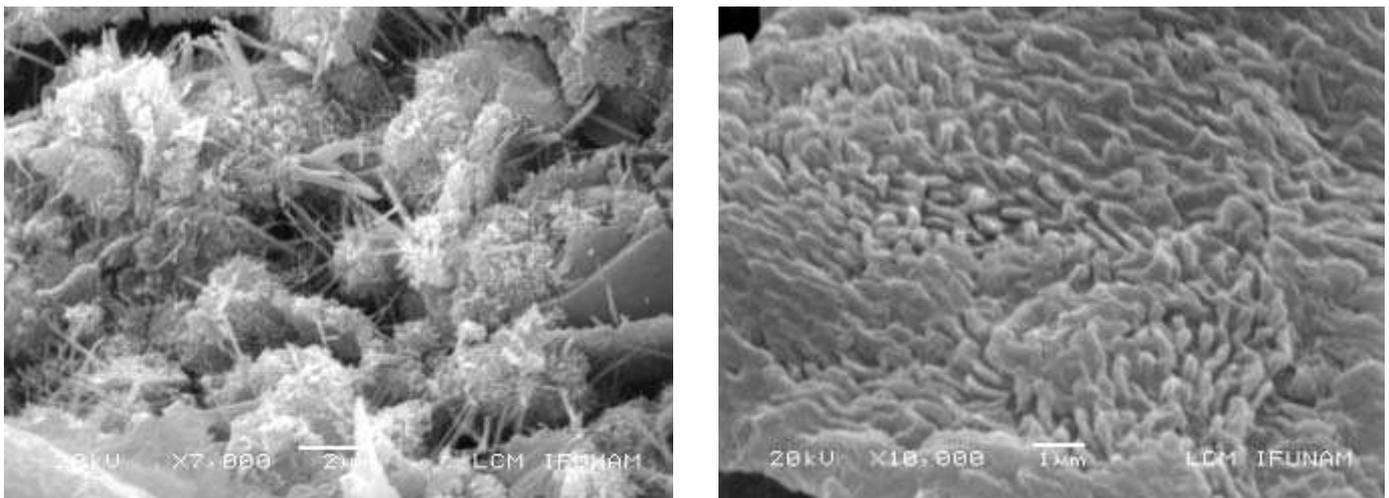


Figura 5.9 y 5.10 Consecutivamente. Micrografía de Cemento-TCP 1% en peso, a 28 días de envejecimiento.

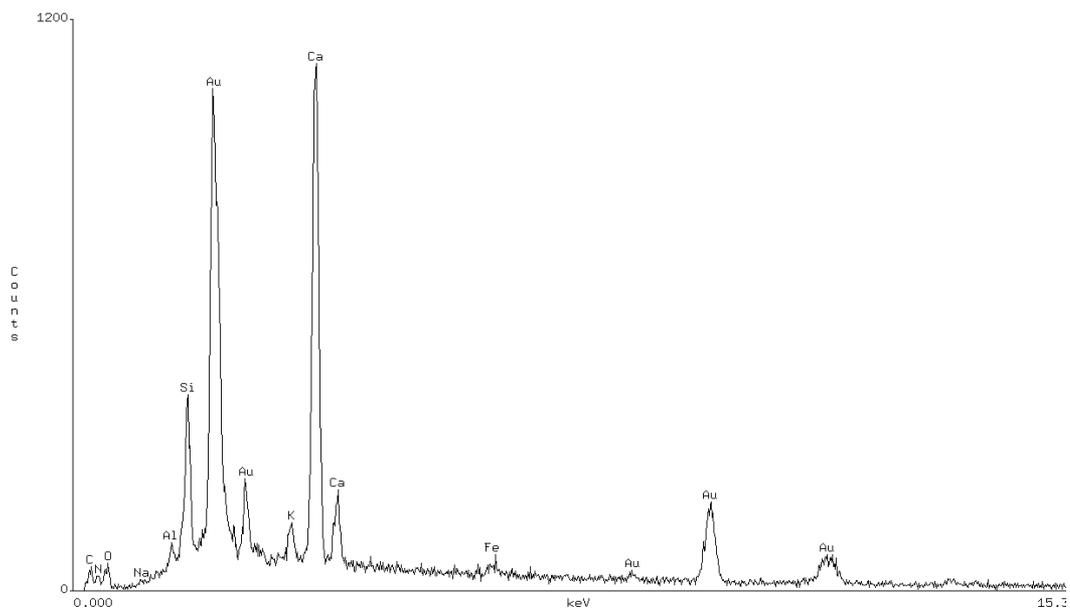


Figura 5.11 Microanálisis de Cemento-TCP 1% en peso, a 28 días de envejecimiento.

Finalizaremos esta sección haciendo una comparación de uno de nuestros resultados de los obtenidos por otro investigador citado en esta Tesis: la siguiente tabla presenta los resultados que obtuvo L.E. CARCAMO PÉREZ^[32] para cemento-arena y nano partículas de SiO₂ 1% en peso y los nuestras Cemento-Básico y Cemento-TCP 1% para 28 días de endurecimiento.

TCP - Nanosílice
Resultados de Pruebas a Compresión
Resultados de Ensayos a Compresión a Probetas de
Cemento con Adiciones de TCP y Nanosílice

TIPO DE PROBETA <ul style="list-style-type: none"> • TCP: Sin arena y con agua desionizada. • Sílice: Con arena y agua potable. • Los dos tipos de muestras están a 28 días de endurecimiento. 	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPas)			
	TCP 0%	TCP 1.0%	Nanosílice 0%	Nanosílice 1.0%
A/C= 0.45	22.87	26.31	33.125	37.813

Para Cemento Base con arena, el valor que obtiene es superior al nuestro, lo cual es de esperarse por el consolidante. Sin embargo, la diferencia entre la muestra con y sin SiO₂ representa el 14%. En nuestro caso, la diferencia es del 15% entre la muestra con y sin TCP.

No sabemos qué efecto adicional se tendría si preparáramos muestras de Cemento Portland con TCP y arena como consolidante.

Conclusiones

De la investigación experimental podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El Cemento Portland tipo II se endurece al agregarle nanopartículas de Fosfato Tricálcico.
- Esto se observa tanto en las pruebas de resistencia a la fractura en compresión como en las de flexión en tres puntos.
- El efecto de endurecimiento es mayor cuando las partículas se agregan en forma de suspensión líquida comparado con el caso en el que se hace la mezcla mecánica con los polvos de cemento.
- El endurecimiento se presenta desde el inicio del envejecimiento de las muestras, posiblemente desde la etapa de fraguado del cemento (primeras horas después de hacer la mezcla de los reactivos y el agua).
- El efecto de la fracción en peso de TCP en el endurecimiento del cemento, indica que por arriba del 1%, se alcanza el nivel de saturación en la resistencia a la fractura en compresión.
- La evolución del endurecimiento con el tiempo de envejecimiento de las muestras es como sigue:
 - Al principio (7 días de envejecimiento), la brecha entre el esfuerzo de fractura del Cemento Básico y el Cemento-TCP 1% en peso es del 70%.
 - Al final (39 días de envejecimiento), la brecha se reduce a 15%.
- Sería necesario hacer un estudio más detallado de la microestructura inicial que da lugar a esos niveles de endurecimiento, para tratar de retenerla durante todo el envejecimiento.
- Comparado con el caso de "Revisión, Análisis y Aplicación de la Nanotecnología en la Generación y Mejora de Materiales Constructivos. Estudio de Morteros de Cemento con Adiciones de Nanosílice", que experimentaron en cemento con arena (como consolidante) y 1% en peso de nanopartículas SiO₂, neutro nivel de endurecimiento a 28 días es muy parecido; 14% obtiene L.E. Cárcamo^[31], 15% nosotros.
- Par hacer la comparación correcta con ese resultado, tendríamos que repetir los experimentos de Cemento-TCP 1% en peso empleando también arena como consolidante.
- Los experimentos realizados en esta investigación siguieron procedimientos más cercanos al área de Ciencia e Ingeniería de Materiales que al área de interés tecnológico.

Por esto, usar el tipo de sustancias empleadas aquí (TCP y Agua-Desionizada) sería prohibitivo económicamente, para fabricar elementos de construcción.

Tras estudiar en primer instancia las propiedades del cemento sobre algunos parámetros como los tiempos de fraguado, el tiempo de cohesión, la velocidad de endurecimiento y la resistencia máxima alcanzada, se investigaron los posibles mecanismos para el reforzamiento de este, sin embargo en el camino se encontró con un material que a través de su comportamiento microestructural reforzó al cemento tradicional.

El objetivo era llegar a una comprensión de la Nanotecnología en los materiales principalmente aquellos que se aplican a la construcción y buscar la adhesión adecuada para aumentar sus propiedades, con el fin de marcar líneas maestras en el diseño e investigación de materiales que se aplicaran a los requerimientos adecuados para sus futuras aplicaciones en la Arquitectura, ya que en este campo difícilmente se llega a una investigación científica, la investigación pudo ser más amplia y con mayores alcances pero debido a la falta de recursos y tiempo sólo se quedó en la constatación científica y por medio de pruebas de laboratorio del elemento que puede reforzar al cemento.

De acuerdo al objetivo más general de la presente investigación, se puede establecer que el gran e importante beneficio de la investigación radica en que está, puede ser la posible pauta ya que pone en conocimiento el tema de la "Nanotecnología", a través de sus aplicaciones en el sector de la construcción principalmente y con un material esencial como lo es el cemento. Creo que dicho objetivo está cumplido, pues se desarrollaron las siguientes actividades a través del siguiente informe:

- Se presentó y se hizo conocer la Nanociencia, a través de sus antecedentes y como se están aplicando estas nuevas tecnologías de investigación por medio de materiales nanoestructurados, junto a sus potenciales aplicaciones de los mismos.
- Se mostró como y de qué forma pueden existir mejoras en la producción del cemento tanto en su producción como en su elaboración para contribuir con materiales novedosos y tomando en cuenta al medio ambiente.
- Se presentaron los grandes avances y desarrollo de materiales novedosos, como una manera de ilustrar sus potencialidades y los beneficios del uso de ésta nueva "ciencia".
- Se mostró una visión con respecto a la estructura del cemento (como material principal de esta investigación) a nanoescala, lo que implicó un mayor conocimiento de sus mecanismos de acción, posibilidades de fractura, entre otros aspectos.
- Se presentó un material que sin llegar a ser nanotecnológico, pero si utilizando herramientas nanotecnológicas, resolvió molecularmente los objetivos de esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2001. Guía para la durabilidad del hormigón. Reporte ACI Comité 318S. Estados Unidos. 495p.

Acumulación y Socialización de Capacidades durante la Gestión Tecnológica: caso CEMEX", CARLOS ARTURO TORRES GASTELÚ, D.F. – México, 2006. Consultado el 22 de Mayo de 2009.

Bentz,D.,Coveney,P., Garboczi,E., Kleyn,M and Strutzman,P., Cellular automaton simulations of cement hydration and microstructure development, *Modelling Simul. Mater.* pp.783-808, (1994).

Bentz,D., Three- Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development, *Journal of American Ceramic Society*, Vol 80, N°1, pp.3-21, (1997).

Citado de Espacio, *Tiempo y Arquitectura*: el crecimiento de una nueva tradición, por Sigfried Giedion, Harvard University Press, 1954. Aguafuerte del informe de Smeaton sobre el faro, una narrativa del edificio y una descripción de la construcción del faro de Eddystone.

Copyright © Grupo Reforma Servicio Informativo, Fecha de Publicación: 30-Enero-2007, Recopilación con fines didácticos.

"Determinación de la Influencia de las Nanomoléculas de Sílice en el Concreto frente a un Factor que afecta su Durabilidad", PAZ AGUILAR MUNDACA REBECA, Valdivia-Chile, 2007. Consultado el 8 de Febrero de 2009.

Estefanescu,D., Methodologies for Modeling of Solidification Microstructure and Their Capabilities, *ISIJ International*, Vol 35,N° 6, pp. 637-650, (1995).

EURORESIDENTES. 2006. Nanotecnología. España. (Disponible en: <http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnología/Nanotecnología.htm>. Consultado el: 20 de Marzo de 2009.

Extracción Literal de la Tesis Titulada "Síntesis y Estudio de Propiedades Físicas de Cerámicas Bioeutécticas", Erendira Martínez Acevedo,, México – D.F., 2007.

FRANZ-JOSEF ULM, Profesor de Ingeniería Civil y Medioambiental Y GEORGIOS CONSTANTINIDES, investigador en Ciencia e Ingeniería de los materiales, Diario de la Mecánica y Física de Sólidos, Instituto Tecnológico de Massachussets. MIT es considerada como la mejor universidad de ciencia e ingeniería del mundo. Consultado el 24 de Octubre de 2007.

Jasso, J. (2000). Los Sistemas de Innovación como espacios regionales, sectoriales y empresariales: Características y taxonomía. Centro de Investigación y Docencia Económica, CIDE No. 92, 1-35.

NANOESTRUCTURA Y DINAMICA DE SUPERFICIES, Dr. Roberto C. Salvarezza, Estudio de las relaciones estructura-función en biomacromoléculas, Dr. Marcelo R. Ceolín, www.inifta.unlp.edu.ar/investig/nano.htm - 30k -, Consultado 08 de Octubre de 2008.

NEVILLE M. Adam, *Tecnología del Concreto*, 1ra. ed., México, 1999, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Extraído de Capitulo 1, Cemento Portland.

Norman C. Dalkey y Olat Helmer, "An experimental Application of de Delphi method to the use of experts", cit. Pag. 458.

P.N. De Aza, A. H. De Aza, S. De Aza, 2005, Crystalline Bioceramic Materials, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol.44, No.3, Pág. 135-145.

PÁGINAS WEB

Cementos Cruz Azul, descripción de cemento Portland.
http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo_II.html.

Coordinadora Central Salinas - El cemento evoluciona con el CO₂,
<http://www.ccsa.org.es/modules.php?name=News&file=article&sid=1857>, Página Consultada el 10 de Noviembre de 2007.

COGNOSCIBLE TECHNOLOGIES. 2006, Mayo. Nanotecnología aplicada al concreto. Santiago, Chile. (Disponible en:
<http://www.cognoscibletechnologies.com/descubrimientosyaplicacionesencontradas.htm>. Consultado el: 27 de Agosto de 2006).

CONCRETONLINE. 2006. Gaia Nanosílice. Madrid, España. (Disponible en:
<http://www.concretonline.com/pdf/Gaia1.pdf>. Consultado el: 27 de Agosto de 2006).

<http://www.greenfacts.org/es/glosario/def/dioxido-carbono.htm>, Página Consultada el 23 de Octubre de 2007.

Ing. Ernesto F. Bravo e Ing. Antonio E. Cornejo. Proceso de Hidratación Del Cemento.
http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento_Fabricacion.pdf

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto
<http://www.imcyc.com/cyt/junio05/TECNOLOGIA%20.pdf>.

Microestructura del Cemento. Introducción, Extraída de Página de Internet. <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Microestructura%20del%20cemento.pdf>

OCAMPO RUIZ, Ernesto, Artículo Nanotecnología y Arquitectura, Revista del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Febrero 1998. <http://www.imcyc.com/revista/1998/febrero/nanfeb98.htm>, Página Consultada el 15 de Julio de 2007.

Paráfrasis llevada a cabo, para realizar comparación de resultados, con fines didácticos

http://calidadelaire.navarra.es/calidadaire/efectosglobales_efectoinvernadero.cfm

Rietveld, H.M. (1969) A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J.Appl.Cryst.* **2**, 65-71.

Sierra Bravo, Restituto. Tesis doctorales y trabajos de investigación científica: metodología general de su elaboración y documentación. Madrid : Paraninfo, 1999. <http://serviciosva.itesm.mx/cvr/investigacion/doc0059.htm>

Término extraído con fines didácticos, Informe Brundtland, 24 Octubre de 2007 www.desarrollosostenible.wordpress.com/2006/09/27/informe-brundtland/ - 17k -

Término extraído con fines didácticos, Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible. José Manuel Naredo, 24 Octubre de 2007, <http://habitat.aq.upm.es/select-sost/>

Tesis de Doctorado. Desarrollo y Caracterización de un Cemento Óseo Basado en Fosfato Tricálcico-a para Aplicaciones Quirúrgicas, Ginebra Molins María Pau, Universidad Politécnica de Cataluña, 1996-España, http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0219109-115710//TMPGM1de7.pdf

The Chemistry and Physics of Nano-Cement, por el Dr. C.P. Huang llevado a cabo en Maile Aiu Loyola Marymount University, y con fecha de publicación del 11 de Agosto de 2006

Wondratschek, H. & Neubüser, J. (1967) Determination of the symmetry elements of a space group from the 'general positions' listed in the international tables for X-ray crystallography, Vol.I. *Acta.Cryst.* **23**, 349-352.

YubaoL., Zhang X., Groot K. "Hidrolysis and phase transition of TCP". *Biomaterials* 18, (1997) 737-741

Young J.F., Mindess,R.J., Bentur,A., *The science and technology of civil engineering materials*, Chap 3 y 11, Prentice Hall, (1998).

ANEXO I



The Chemistry and Physics of Nano-Cement

Maile Aiu

Loyola Marymount University

**Advisor:
Dr. C.P. Huang**

**Submitted to:
NSF-REU**

University of Delaware

August 11, 2006



TABLE OF CONTENTS

TABLE OF CONTENTS	1
LIST OF FIGURES	3
LIST OF TABLES	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCTION	4
2. BACKGROUND	5
2.1 Portland Cement	5
2.2 Sol-Gel Process	5
2.3 Hydration	6
3. MATERIALS AND METHODS	6
3.1 Sample Preparation	6
3.2 SEM	8
3.3 XRD	8
3.4 Hydration Rate	8
3.5 Compression Test	9
4. RESULTS AND DISCUSSION	12
4.1 SEM	12
4.2 XRD	14
4.3 Hydration Rate	15
4.4 Compression Test	16
5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	19
6. ACKNOWLEDGEMENTS	20
7. REFERENCES	20
APPENDIX	22

LIST OF FIGURES

FIGURE 1 – Prepared Nano-Cement Samples.....	7
FIGURE 2 – Sputtering Instrument.....	8
FIGURE 3 – Scanning Electron Microscope.....	8
FIGURE 4 – Hydration Test Experiment Setup.....	9
FIGURE 5 – Specimens Prepared for Curing.....	11
FIGURE 6 – Fractured Specimens.....	11
FIGURE 7 – Specimens with Strain Gages.....	11
FIGURE 8 – Specimens Prepared for Testing.....	11
FIGURE 9 – Tinius Olsen Testing Machine.....	11
FIGURE 10 – Specimens after Testing.....	11
FIGURE 11.A – C3S Component with EH-5 Silica.....	12
FIGURE 11.B – C3S Component with EH-5 Silica.....	12
FIGURE 12.A – C3S Component with ZL Silica.....	12
FIGURE 12.B – C3S Component with ZL Silica.....	12
FIGURE 13.A – C3S Component with UP Silica.....	13
FIGURE 13.B – C3S Component with UP Silica.....	13
FIGURE 14.A – C3S Component with OL Silica.....	13
FIGURE 14.B – C3S Component with OL Silica.....	13
FIGURE 15.A – C3S Component with PDMS.....	13
FIGURE 15.B – C3S Component with PDMS.....	13
FIGURE 16 – X-ray Diffraction Results.....	14
FIGURE 17 – Hydration Rates for Pure C3S Samples.....	15
FIGURE 18 – Stress-Strain Diagram for Sample D.....	16
FIGURE 19 – Stress-Strain Diagram for Sample I.....	17
FIGURE 20 – Stress-Strain Diagram for Sample J.....	17
FIGURE 21 – Stress-Strain Diagram for Sample K.....	18
FIGURE 22 – Stress-Strain Diagram for Sample N.....	18

LIST OF TABLES

TABLE 1 – Components of Portland Cement Type I.....	5
TABLE 2 – Materials for Preparation.....	6
TABLE 3 – Properties of SNOWTEX SiO ₂	7
TABLE 4 – Properties of CAB-O-SIL Fumed SiO ₂	7
TABLE 5 – Mixing Ratios for Cement Components.....	9
TABLE 6 – W/C Ratios for Pure C3S Samples.....	10
TABLE 7 – W/C Ratios for Mixed Samples.....	10
TABLE 8 – W/C Ratios for Portland Cement Samples.....	10
TABLE 9 – Properties of Strain Gages.....	10
TABLE 10 – Particles Sizes for C3S Components.....	14
TABLE 11 – Comparison of Maximum Compressive Stress.....	16



ABSTRACT

The use of nano-particles in developing materials has gained its popularity and being applied in many fields. More specifically, such particles can lead to improvements in the nanostructure of building materials such as cement and concrete. This experiment focuses on synthesizing the components of Portland cement type I using nano-particles and comparing their properties with that of commercial cement. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) tests were conducted to study the morphology and structure of synthesized tricalcium silicate (C3S) components. The results showed conglomerated nano-particles with crystalline structures containing quantities of tri- and di- calcium silicate compounds as well as copper oxide. Hydration tests were also performed and the results show that the nano-cement has a more rapid hydration rate than Portland cement types I and III. However, it was found that Portland cement has a higher compressive strength than the nano-cement which may be due to several factors such as particle aggregation, rapid hydration rate, a high water: cement ratio, and the lack of gypsum.

1. INTRODUCTION

Nano-materials show unique physical and chemical properties that can lead to the development of more effective materials than ones which are currently available [1]. The extremely fine size of nano-particles yields favorable characteristics. For instance, carbon-based materials such as carbon nanotubes are becoming significant in the field of electronics because of their high surface area and excellent electrical conductivity [2]. The use of nano-particles can improve the function and properties of many types of materials. Reinforced plastics, fire-retardant materials, protective films or cloths, and high-quality coatings are among the many diverse applications of nanocomposites [3].

Application of nano-materials into the production of cement and concrete can lead to improvements in civil infrastructure because the mechanical strength and life of concrete structures are determined by the micro-structure and by the mass transfer in nano-scale [4]. In past years, superfine industrial by-products with pozzolanic and cementitious properties such as fly ash, slags, and silica fume have been ingredients for high-strength cement [5, 6]. Some research suggests that silica fume is valuable for enhancing such things as mechanical properties, abrasion resistance, bond strength with steel rebars, and corrosion resistance of steel rebars [6]. Additional studies have also concluded that nano-SiO₂ added to high-volume fly ash high strength concrete (HFAC) could improve short and long term strengths [7].

Nano-particles are unique because their size affects the behavior of cement. M.P. Ginebara et al. reported that particle size can greatly affect the kinetics of cement [8]. Their findings indicate that a reduction in particle size can lead to a more rapid setting and hardening of cement due to stronger electrostatic attractive forces and a greater specific surface [8]. Other studies have shown that the compressive and flexural strengths of cement mortars enhanced with SiO₂ and Fe₂O₃ nano-particles or organo-modified montmorillonites (OMMT) were higher than those of plain cement mortar [1, 9].





Researchers found that nano-particles uniformly dispersed in a cement paste will accelerate cement hydration due to their high activity [1]. Additionally, the nano-articles will fill pores to increase strength and these characteristics will improve the microstructure of cement and the interface between the cement paste and aggregates in concrete [1]. It was also found that nano-Fe₂O₃ exhibits a self-sensing of strain capability which can be useful for structural health monitoring [10].

Recent studies have shown that nano-particles used as an additive to cement mortar can improve its mechanical properties; however, the behavior of cements composed exclusively of nano-particles has not yet been reported. This experiment focused on synthesizing the major components of Portland cement Type I with nano-particles using the sol-gel method. The structure, morphology, hydration rate, and compressive strength of the synthesized cements were studied.

2. BACKGROUND

2.1 Portland Cement

The most common type of cement used by concrete manufacturers is Portland cement, which is prepared by igniting a mixture of raw materials mainly composed of calcium carbonate or aluminum silicates [11]. According to ASTM standard specification C 150, Portland cement is defined as "a hydraulic cement produced by pulverizing clinker consisting essentially of hydraulic calcium silicates, usually containing one or more of the forms of calcium sulfate as an interground addition" [12]. The phase compositions in Portland cement Type I are shown below and they are denoted as tricalcium silicate (C₃S), dicalcium silicate (C₂S), tricalcium aluminate (C₃A), and tetracalcium aluminoferrite (C₄AF) [13].

Table 1 – Components of Portland Cement Type I

Description	Formula	% Composition
tricalcium silicate (C ₃ S)	3CaO SiO ₂	49
dicalcium silicate (C ₂ S)	2CaO SiO ₂	25
tricalcium aluminate (C ₃ A)	3CaO Al ₂ O ₃	12
tetracalcium aluminoferrite (C ₄ AF)	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	8

2.2 Sol-Gel Process

The sol-gel method was used to synthesize each component of Portland cement Type I using nano-particles. This method is based on colloid chemistry in which solid raw materials are dissolved in selected solvents under specific conditions for temperature, pressure, etc. until a homogeneous solution is formed by a hydration process [3]. The sol is a combination of monomers of solvent-soluble or water-soluble polymers along with a precipitator [3]. Once formed, the sol can be transformed into a gel under similar controlled conditions for temperature, pressure, etc. [3].

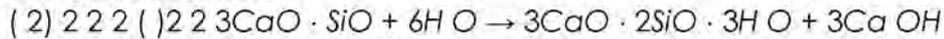


2.3 Hydration

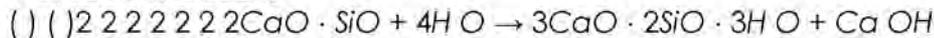
In this experiment, the hydration rate for each type of tricalcium silicate component was measured. Hydration is the reaction that takes place between cement and water that leads to setting and hardening [11]. All compounds present in Portland cement clinker are anhydrous, but when brought into contact with water, they are all attacked or decomposed, forming hydrated compounds [11]. When the tri- or di- calcium silicates react with water a calcium-silicate-hydrate gel is formed [11]. This calcium-silicatehydrate (C-S-H) is the principal hydration product and primary binding phase in Portland cement [14].

The chemical reactions that take place during hydration are summarized below:

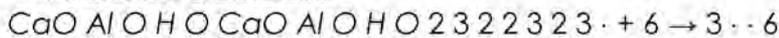
- Tricalcium silicate



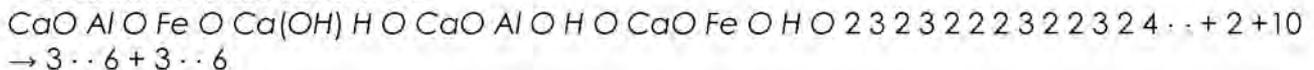
- Dicalcium silicate



- Tricalcium aluminate



- Tetracalcium aluminoferrite



3. MATERIALS AND METHODS

3.1 Sample Preparation

Each component of cement was prepared using the materials and ratios shown in Table 2. Polyethelyene glycol (PEG) and calcium acetate ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$) were supplied by Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, Missouri, USA). Aluminum oxide (Al_2O_3) was supplied by Aldrich Chemical Co. (Milwaukee, Wisconsin, USA) and ferrous oxide (Fe_2O_3) was supplied by Fisher Scientific Co. (Fairlawn, New Jersey, USA).

Table 2 – Materials for Preparation

Material	Properties	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
PEG	MW 3400 g/mol	4g	4g	4g	4g
$\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$	MW 158g/mol	0.03 mol	0.02 mol	0.03 mol	0.04 mol
SiO_2	variable	0.01 mol	0.01 mol	**	**
Al_2O_3	MW 101.96 g/mol	**	**	0.01 mol	0.01 mol
Fe_2O_3	MW 159.7 g/mol	**	**	**	0.01 mol
Water	De-ionized	15 mL	15 mL	15 mL	15 mL

Six types of silicon dioxide particles were used and their properties are illustrated in Tables 3 and 4. SNOWTEX® silica nano-particles in solution were manufactured by Nissan Chemical America Corporation (Houston, Texas, USA) and CAB-O-SIL® untreated amorphous fumed silica were manufactured by Cabot Corporation (Boston, Massachusetts, USA). Tri- and di-calcium silicate components were synthesized using each type of silica nano-particles.

Table 3 – Properties of SNOWTEX® SiO₂

Name	ZL	UP	OL
Particle Shape	spherical	elongated	spherical
Particle Size (nm)	70-100	diameter: 9-15 length: 40-300	40-50
SiO ₂ weight %	40-41	20-21	20-21

Table 4 – Properties of CAB-O-SIL® Fumed SiO₂

Name	M-5	HS-5	EH-5
Surface Area (m ² /g)	200	325	380
Bulk Density (g/l)	50	50	50

Aside from SiO₂, polydimethylsiloxane (PDMS) was also used in synthesizing the C3S component. This product was supplied by Acros Organics (New Jersey, USA) as a solution with a density of 0.98 g/mL. The molecular weight was specified as 90,200 g/mol, however, this figure may have been overestimated. One mL of PDMS, 6.27 g of calcium acetate, and 15 mL of de-ionized water was used.

Each component was synthesized by dissolving the solid particles in water and mixing the solution by hand with a metal spatula to form a homogenous sol. The sol was then heated on a heat plate at 100°C for approximately thirty to forty minutes until a paste was formed. Next, the samples were placed in crucibles and annealed at 1000°C for thirty minutes enabling the particles to crystallize and form the desired nano-cement components. Finally, the samples were ground to a fine powder using a mortar grinder then placed in glass tubes and sealed with Para Film for protection from moisture.



Figure 1 – Prepared Nano-Cement Samples

3.2 SEM

Scanning electron microscopy (SEM) images were taken by JEOL electron microscope, model JSM 7400F. The acceleration voltage of 2 keV and working distance of 8.2 mm was used. Energy Dispersive X-Ray (EDX) analysis was performed at 18 keV acceleration voltage. 1.28 k-counts/s with 35 ± 3 % dead time percentage was observed during acquisition of the atomic composition. Prior to imaging, the samples were sputtered with gold for enhancement of the sample surface conductivity.



Figure 2 – Sputtering Instrument



Figure 3 – Scanning Electron Microscope

3.3 XRD

X-ray diffraction (XRD) patterns of Sn coated and non-coated stainless mesh samples were performed by using a Rigaku D-Max B diffractometer which is equipped with a graphite crystal monochromator operating with a Cu anode and a sealed x-ray tube. The 2θ scans were recorded using Cu K α radiation of wavelength of 1.5405 Å from 20° to 80° with a step size of 0.05°.

3.4 Hydration Rate

The hydration rate was measured using an OMEGA CN1000 Thermocouple meter connected to a DATAQ Instruments DI-710 data logger system. 15 mL of de-ionized water was placed in a vacuum flask along with the temperature probe. 1g of cement was added to the water and the flask was covered with a piece of Styrofoam board. The water and cement were mixed by shaking the flask and the temperature as a function of time was recorded using WinDaq data acquisition software. The sampling rate was set at 10 points/second. The hydration rates for the C3S components and Portland cement Types I and III were measured.

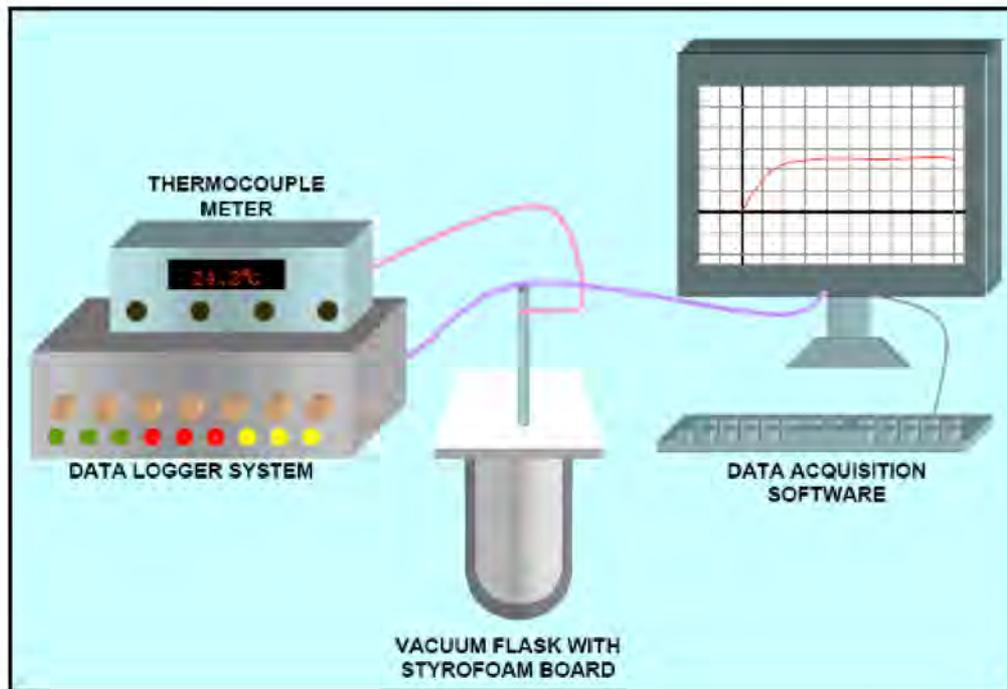


Figure 4 – Hydration Test Experiment Setup

3.5 Compression Test

Cylindrical specimens were prepared using PVC pipe, 1.25 cm in diameter and 2.5 cm in length. Mixtures of the nano-cement components according to their percent composition were made as well as pure C₃S samples and Portland cement samples. Cement mixtures of components were formed according to the ratios shown in Table 5. For pure C₃S samples, 4 grams of cement was used and for Portland cement samples, 6 grams of cement was used.

Table 5 – Mixing Ratios for Cement Components

COMPONENT	% COMPOSITION	GRAMS
C ₃ S	49	2.21
C ₂ S	25	1.12
C ₃ A	12	0.54
C ₄ AF	8	0.36
TOTAL	94	4.23

The water: cement (w/c) ratios for pure C₃S samples, mixed samples, and Portland cement samples are shown in Tables 6, 7, and 8. (Note: The abbreviation "ST" represents SNOWTEX® silica and the abbreviation "COS" represents CAB-O-SIL® fumed silica.)

Table 6 – W/C Ratios for Pure C₃S Samples

SAMPLE	TYPE	W/C RATIO
A	ST-ZL	1.000
B	ST-UP	1.000
C	ST-OL	1.250
D	COS-HS5	1.375
E	COS-M5	1.375
F	COS-EH5	1.500

Table 7 – W/C Ratios for Mixed Samples

SAMPLE	TYPE	W/C RATIO
G	ST-ZL	1.064
H	ST-UP	1.064
I	ST-OL	1.182
J	COS-HS5	1.300
K	COS-M5	1.300
L	COS-EH5	1.300

Table 8 – W/C Ratios for Portland Cement Samples

SAMPLE	TYPE	W/C RATIO
M	I	0.500
N	III	0.417

The samples were mixed with water, cast in the PVC pipe molds (a thin layer of grease was applied to the inside surface of the pipe), and covered with thin glass plates. They were cured for one day at room temperature and then for an additional six days in a moist curing room. Following the 7-day curing period, the samples were removed and allowed to dry. Some specimens fractured during the curing process and therefore, could not be tested. Precision strain gages (see Table 9) manufactured by Measurements Group, Inc. (Raleigh, North Carolina, USA) were glued (with epoxy glue) on all remaining specimens and compression tests were conducted using a Tinius Olsen 200 kip testing machine with a model CMH 496 controller. Load and strain data were recorded using Vishay System 5000 data acquisition software. The loading rate was set at 0.3 inches/minute.

Table 9 – Properties of Strain Gages

Type	CEA-06-125UN-350
Lot Number	R-A58AD815
Resistance (ohms at 24°C)	350.0±0.3%
Gage Factor at 24°C	2.085±0.5%
Transverse Sensitivity at 24°C	(+0.3±0.2)%
Code	093518-3129



Figure 5 – Specimens Prepared for Curing



Figure 6 – Fractured Specimens



Figure 7 – Specimens with Strain Gages



Figure 8 – Specimens Prepared for Testing



Figure 9 – Tinius Olsen Testing Machine



Figure 10 – Specimens after Testing

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 SEM

SEM images are shown in Figures 2-6. The images show cement particles in the range of 40 to 100 nm in length. The particles appear to be conglomerated and are spherical or rod-shaped. EDX test results (see Appendix) show that the ratio of calcium to silica content is approximately 3:1 or 2:1 for most samples. However, the C3S component which contained PDMS showed a much higher ratio of calcium to silica content. This suggests that the sample was not prepared using the correct amount of PDMS or calcium acetate. Further investigation is needed to determine a more accurate ratio for preparing this type of cement. EDX test results also show that the sample containing the fumed silica EH-5 had a small amount of copper in it which implies that the fumed silica may be composed of some impurities.

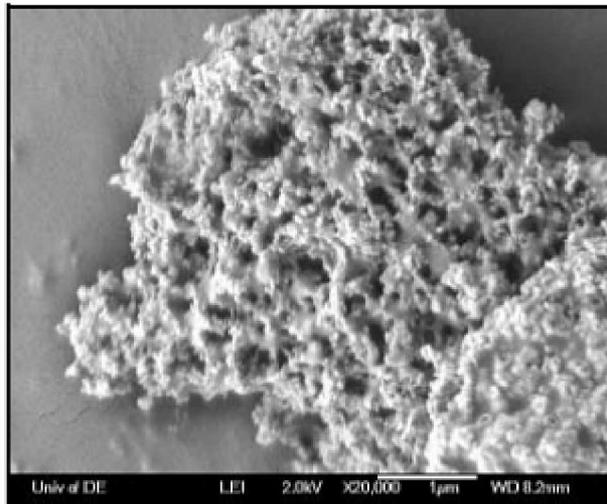


Figure 11.a – C₃S Component with EH-5 Silica

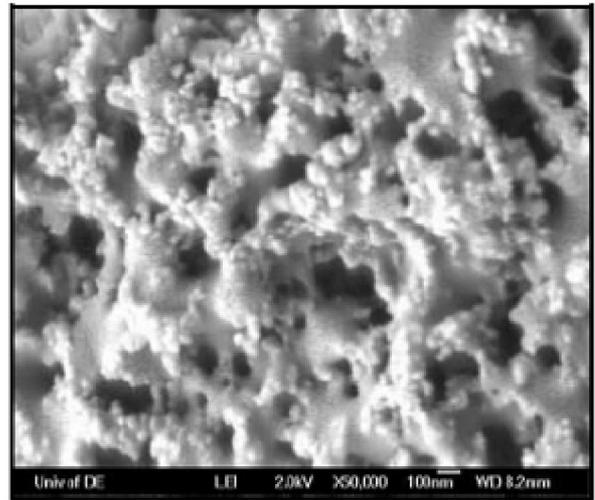


Figure 11.b – C₃S Component with EH-5 Silica

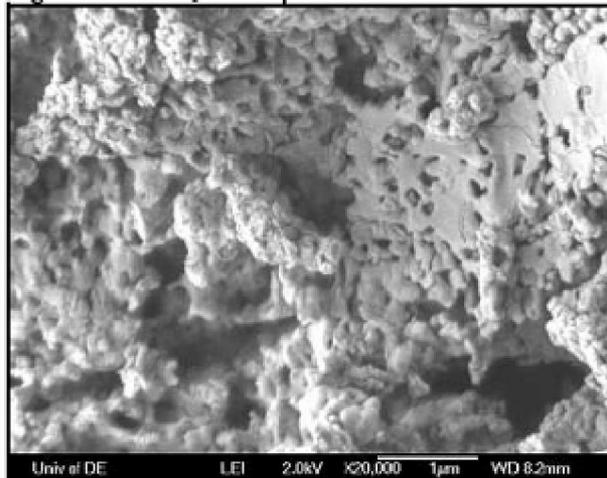


Figure 12.a – C₃S Component with ZL Silica

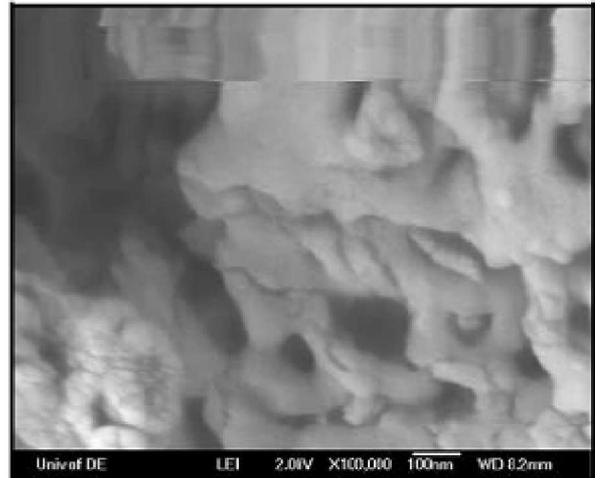


Figure 12.b – C₃S Component with ZL Silica

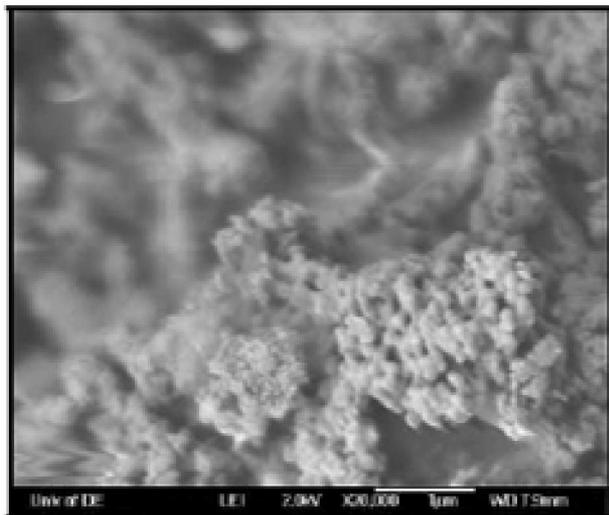


Figure 13.a – C₃S Component with UP Silica

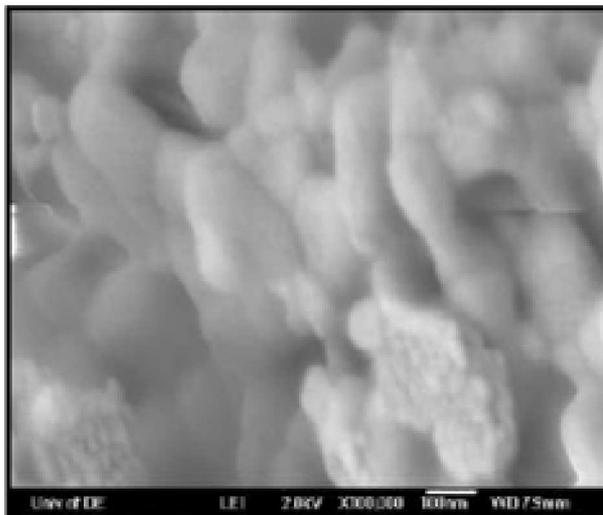


Figure 13.b – C₃S Component with UP Silica

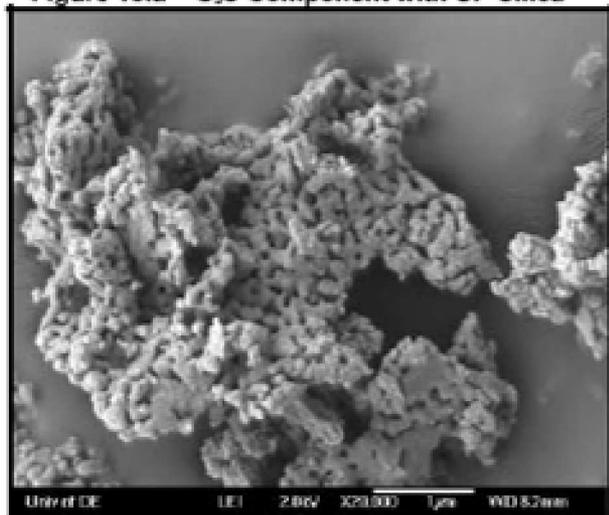


Figure 14.a – C₃S Component with OL Silica

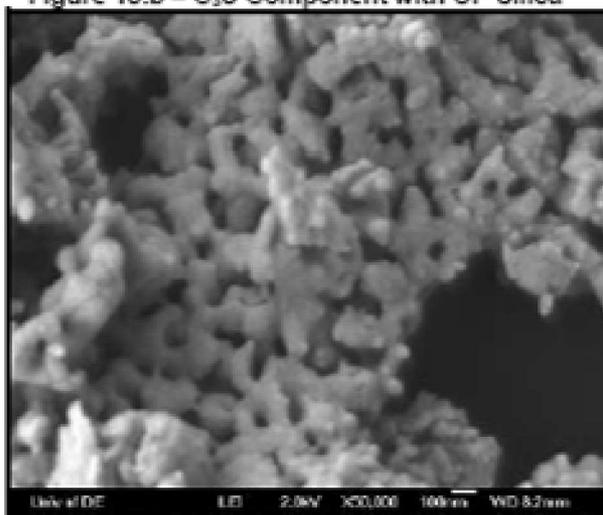


Figure 14.b – C₃S Component with OL Silica

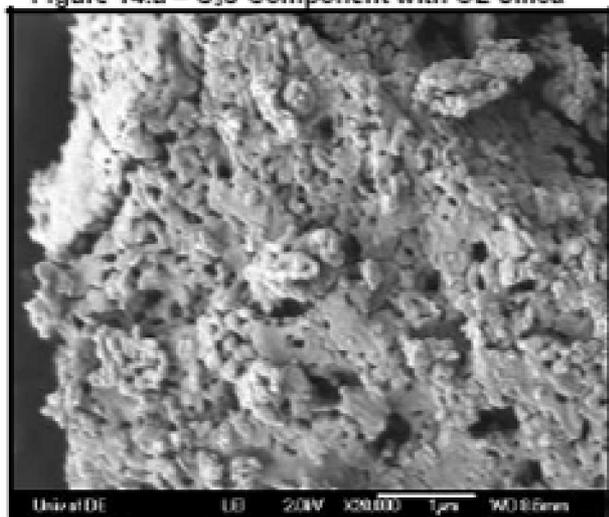


Figure 15.a – C₃S Component with PDMS

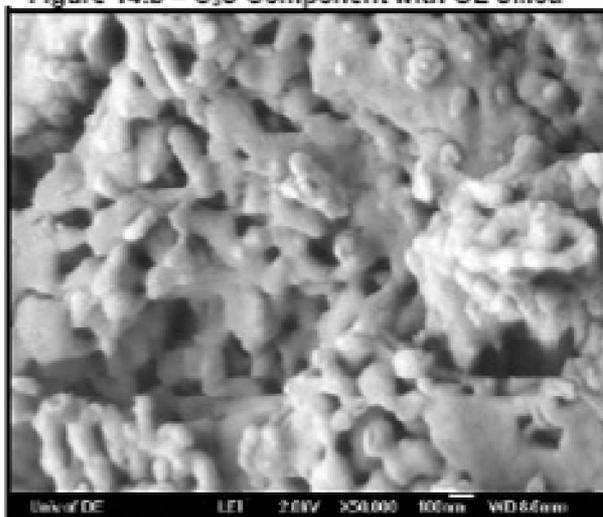


Figure 15.b – C₃S Component with PDMS

4.2 XRD

Figure 10 shows the X-ray diffraction patterns for all pure C₃S components. The peaks indicate that the samples contain crystalline structures for tricalcium silicate, dicalcium silicate and copper oxide compounds. Based on Sherrer equation calculation, the crystalline size of these cements is listed in Table 10.

Table 10 – Particle Sizes for C₃S Components

SAMPLE	SIZE (nm)
EH-5	13±1
M-5	14.5±1
ST-OL	15.4±1
ST-UP	15.5±1
ST-ZL	13.8±1

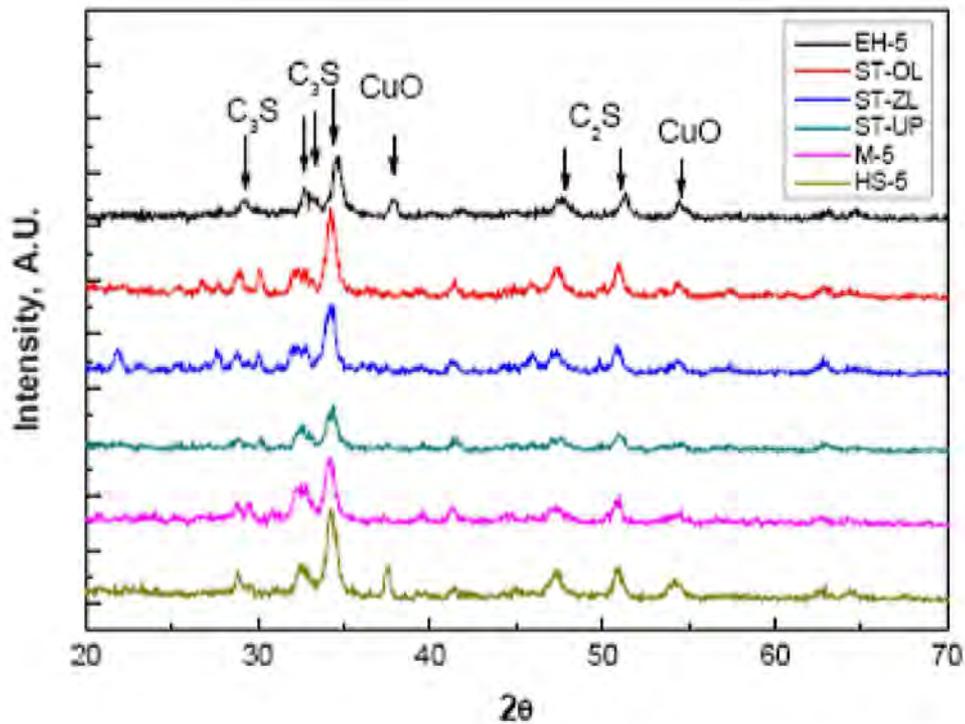


Figure 16 – X-Ray Diffraction Results

4.3 Hydration Rate

Figure 11 shows the hydration rates in calories per gram for each type of tricalcium silicate component and Portland cement Types I and III. With the exception of the DMS specimen, all nano-cement specimens showed a much higher hydration rate than that of Portland cement. The C3S component containing the fumed silica EH-5 seemed to have the fastest reaction rate while Portland cement Type I had the slowest. These results are consistent with the notion that more fine cement has a greater surface area in proportion to its mass and thus, has a more rapid rate of hydration [11]. It also implies that more cement gel will form at early ages and the nano-cement will develop a higher initial strength [13].

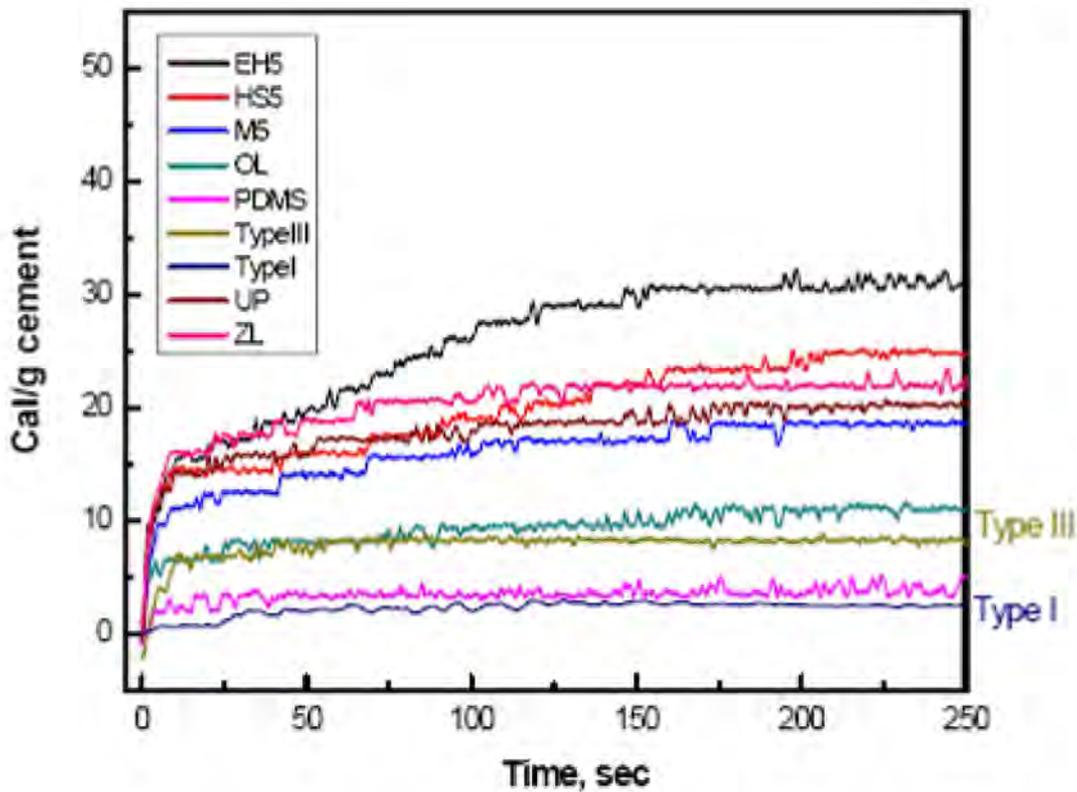


Figure 17 – Hydration Rates for Pure C₃S Samples

4.4 Compression Test

Figures 12-17 below show stress-strain diagrams samples D, I, J, K, and N and Table 10 provides a summary of the maximum load applied as well as the maximum stress exerted on the specimens.

Table 11 – Comparison of Maximum Compressive Stress

SAMPLE	MAX LOAD (lb)	MAX STRESS (psi)
HS-5 PURE C ₃ S	53	67.5
M5 PURE C ₃ S	21	34.4
ST-OL MIXED	61	77.7
HS-5 MIXED	78	96.8
M5 MIXED	68	85.6
EH-5 MIXED	45	57.3
TYPE III	568	723.2

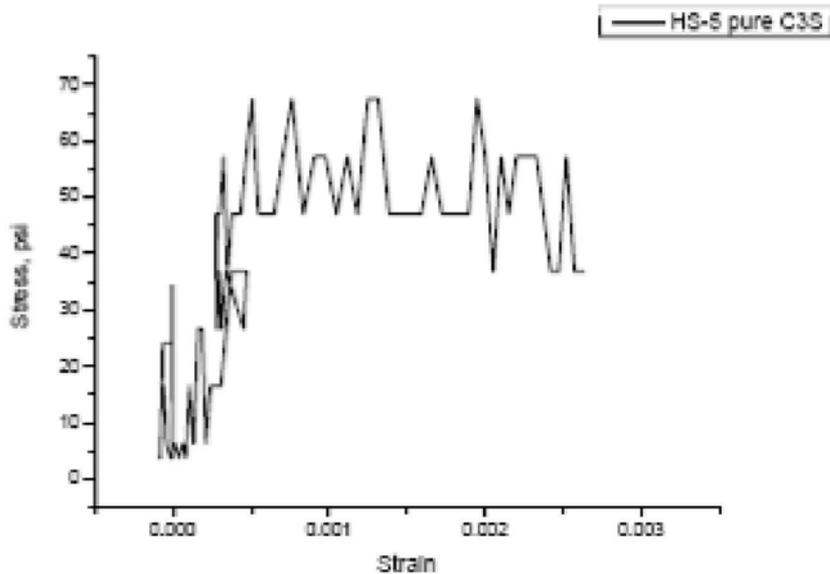


Figure 18 – Stress-Strain Diagram for Sample D

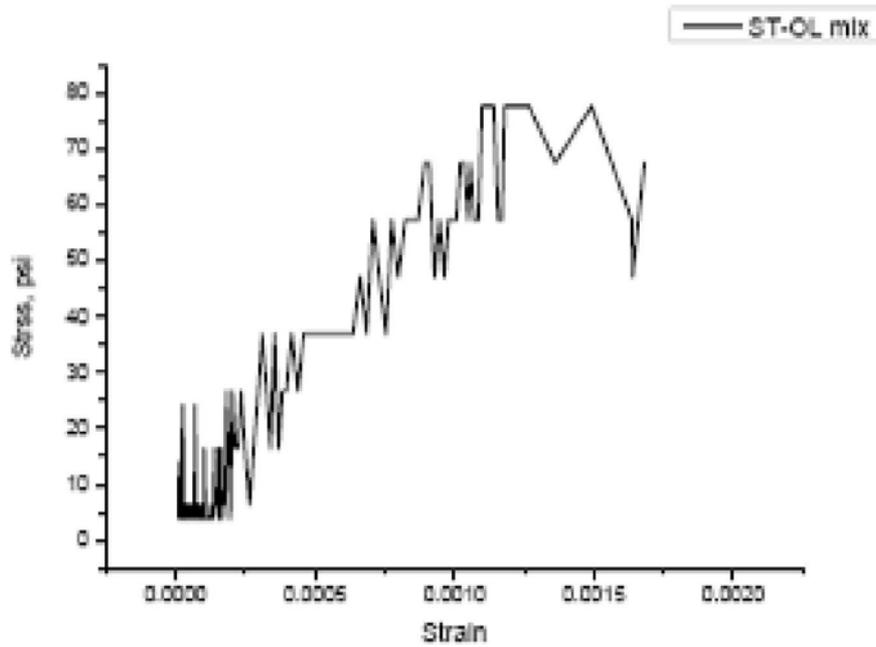


Figure 19 – Stress-Strain Diagram for Sample I

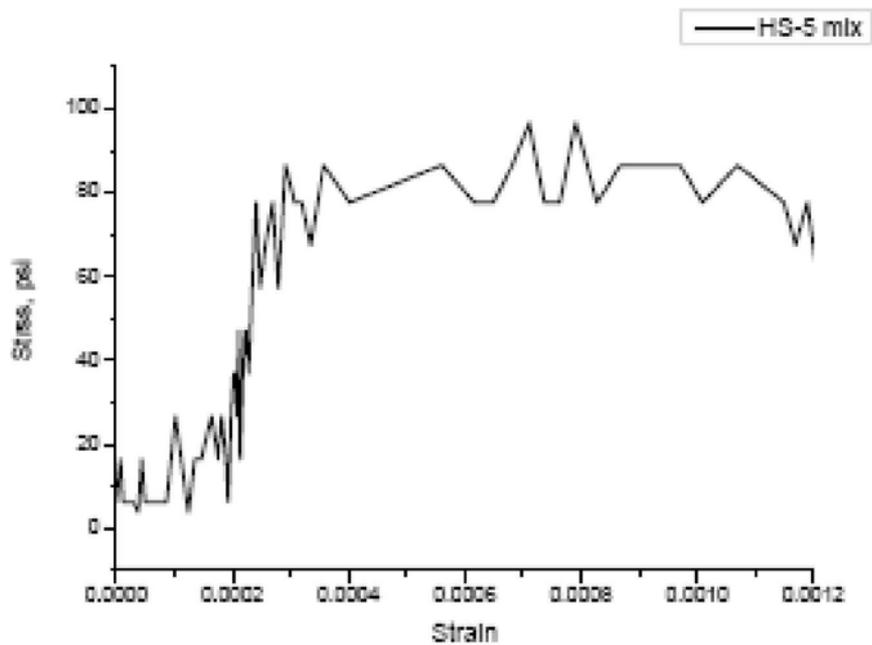


Figure 20 – Stress-Strain Diagram for Sample J

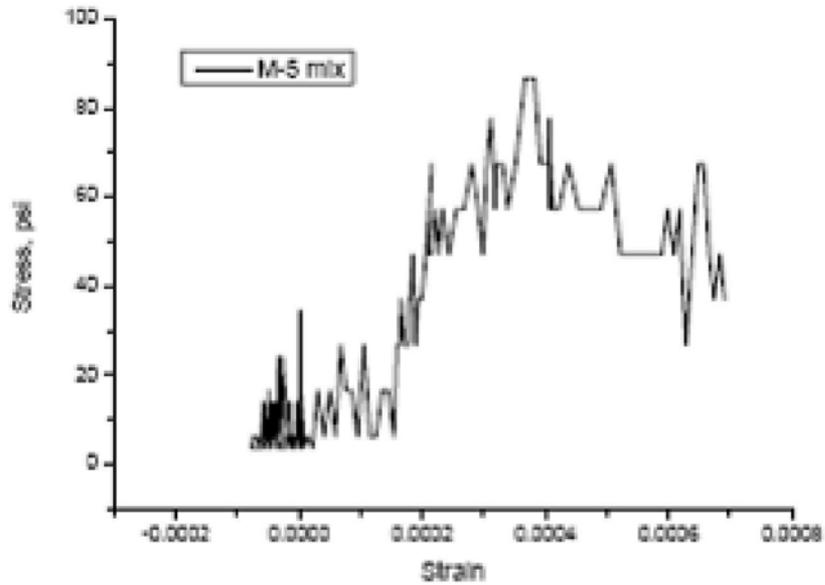


Figure 21 – Stress-Strain Diagram for Sample K

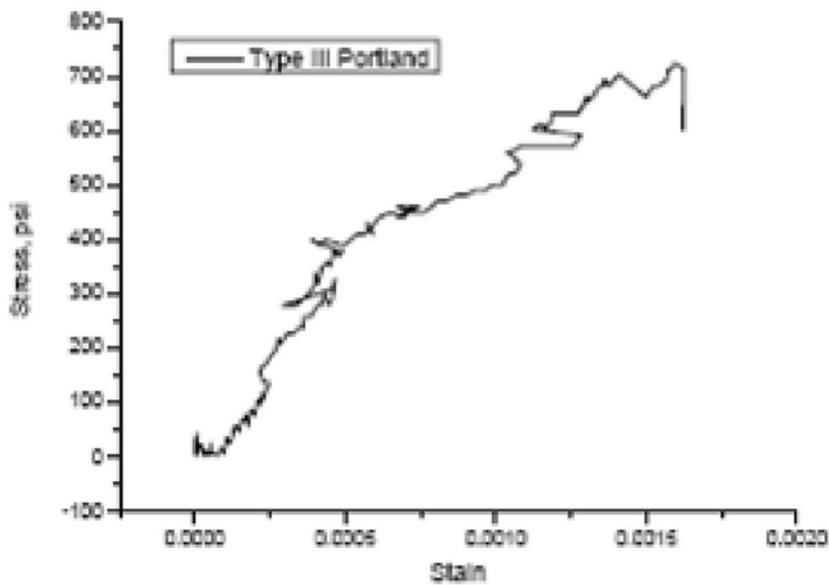


Figure 22 – Stress-Strain Diagram for Sample N

The compression tests revealed that Portland cement was able to withstand much more loading than the nano-cements. This may have several implications.

First of all, in previous studies where nano-particles were added to cement mortar specimens, researchers found that when excessive nano-particles were added to the cement, the particles became aggregated and were not well dispersed [1]. This created a weak zone in the form of voids and as a result, low strength was expected [1]. Perhaps in the case of the nano-cements, the same phenomena occurred. Particles may have aggregated and formed voids in the cement pastes thus weakening the specimens.

Another possibility is that the rapid hydration of the nano-cements caused a high strength to develop early, but dissipate after a few days. Theoretically, a larger surface area implies that more cement gel will form at early ages, and a higher initial strength will be developed [13]. However, "the rate of hydration is slowed down by the presence of cement gel and the interaction of clinker minerals with capillary water depends on the mechanism of diffusion through the cement gel" [13]. If a large quantity of gel is formed rapidly because of a large cement surface, then the inhibiting nature of the gel also takes effect sooner [13]. For this reason, extra-fine grinding of cement is only very efficient for up to about 7 days, and at later stages, the chemical composition, rather than the fineness, becomes a more important factor in determining the ultimate strength of Portland cement [13]. It is a possibility that the nano-cements had such a rapid rate of hydration compared to Portland cement that their strength developed much earlier but began to dissipate before the 7th day while the Portland cement was still experiencing strength development.

It is also important to consider that the strength of mortar or concrete is dependent on the water: cement ratio and the degree of compaction [11]. For a concrete with good workability, the strength is inversely proportional to the water: cement ratio [11] meaning that a higher water: cement ratio implies lower strength. In this experiment, the water: cement ratio for the nano-cement was approximately twice that of Portland cement. The reason for this is that the nano-cement components appeared to be much less dense than Portland cement and therefore, more water was needed to create a good paste. However, the high water: cement ratio used for the nano-cements may also have contributed to a lower strength.

Finally, Portland cement is also composed of a small amount of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) which reacts with the aluminate components to form an insoluble water-rich compound called calcium sulphoaluminate (ettringite) [13]. However, the nano-cement did not contain this mineral additive and as a result, the aluminate components may not have formed the necessary hydrated compounds. It is suggested that the strength of the anocement cannot fully develop without these reactions taking place.

5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The hydration rate for nano-cement components was higher than that of Portland cement Types I and III, however, compression tests revealed that Portland cement was able to withstand more load than the nano-cement. There are several suggestions that support

these results. First, the particles may have become too aggregated and thus voids in the cement pastes were created. Second, the rapid hydration of nano-cements led to a high initial strength which quickly dissipated before the 7-day curing period was complete. Third, the water: cement ratio was too high and thus contributed to a lower strength. Finally, the addition of gypsum is needed for the aluminate components to react with; however, this mineral which is present in Portland cement was not present in the nanocement.

In order to improve the compressive strength of commercial cement, perhaps it is best to make a comparison between the pure components of each type of cement. For instance, strength tests should be conducted using the pure C3S component of nano-cement and the pure C3S component of Portland cement. Another possibility is to add gypsum to the nano-cement which would enable the aluminate components to react and form the necessary hydration products. It is also recommended that the same water: cement ratio be used for all types of cement. Finally, if aggregation is a factor that reduces strength then it is recommended that a surfactant be used to evenly disperse the nano-particles in the cement pastes.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This material is based on work supported by the National Science Foundation under Grant No. EEC-0139017, "Research Experiences for Undergraduates in Bridge engineering," at the University of Delaware.

- Sammy Lin
- Dr. C.P. Huang
- Dr. Michael Chajes and Diane Kukich
- Danny Richardson
- Gary Wenczel
- Doug Baker

7. REFERENCES

- [1] Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites: Part B* 2004;35:185-189.
- [2] Vinay Gupta, Norio Miura. Influence of the microstructure on the supercapacitive behavior of polyaniline/single-wall carbon nanotube composites. *Journal of Power Sources* 2006;157:616-620.
- [3] Y.C. Ke, P. Stroeve. *Polymer-Layered Silicate and Silica Nanocomposites*. Amsterdam: Elsevier B.V.; 2005. p. 52-55, 330-341.
- [4] S. Hanehara, M. Ichikawa. Nanotechnology of cement and concrete. *Journal of the Taiheiyo Cement Corporation* 2001;141:47-58.

[5] V.G. Papadakis, E.J. Pedersen. An AFM-SEM investigation of the effect of silica fume and fly ash on cement paste microstructure. *Journal of Material Science* 1999;34:683-690.

[6] Zhenhua Li, Huafeng Wang, Shan He, Yang Lu, Miao Wang. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters* 2006;60:356-359.

[7] Gengying Li. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research* 2004;34:1043-1049.

[8] M.P. Ginebra, F.C.M Driessens, J.A. Planell. Effect of the particle size on the micro and nanostructural features a calcium phosphate cement: a kinetic analysis. *Biomaterials* 2004;25:3453-3462.

[9] Wen-Yih Kuo, Jong-Shin Huang, Chi-Hsien Lin. Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. *Cement and Concrete Research* 2006;36:886-895.

[10] Hui Li, Hui-gang Xiao, Jin-ping Ou. A study on the mechanical and ressurensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research* 2004;34:435-438.

[11] F.M. Lea. *The Chemistry of Cement and Concrete*. Glasgow: Bell and Bain Ltd.; 1970. p. 20, 177-179, 392.

[12] American Society for Testing Materials. *1985 Annual Book of ASTM Standards: Concrete and Mineral Aggregates (Section 4)*. Easton: ASTM; 1985. p. 114

[13] Wolfgang Czernin. *Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers*. New York: Chemical Publishing Co., Inc.; 1962. p. 15, 49.

[14] J. Bjornstrom, A. Martinelli, A. Matic, L. Borjesson, I. Panas. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium—silicate—hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters* 2004;392:242-248.

ANEXO II ELABORACIÓN DE PRUEBAS DESECADAS

De acuerdo a la literatura estudiada se puede determinar que uno de los posibles causantes de la disminución de las propiedades mecánicas del cemento puede ser las burbujas de aire que este presenta ya en su fase de fraguado, pueden existir huecos en su interior lo cual hace que el material no se comporte de una manera plástica debido a que es un cerámico y en su interior estas moléculas de aire perjudican a la hora de aplicar dichos esfuerzos.

Por lo tanto se realizó un experimento de probetas de cemento simple pero estos después de ser vaciados se introdujeron a una cámara de cristal la cual provocara un vacío, mediante la extracción de aire en su interior por medio de una bomba; así mientras el material no llega a su etapa de fraguado puede eliminarse parte de sus moléculas de aire y así tratar de lograr que este material sea más resistente, de tal manera se fabricaron estas probetas (ver imagen 1, 2 y 3) y se sometieron a los pruebas correspondientes y posteriormente se reflejaron sus resultados, (Ver Pág. 44, Tablas de Compresión y Flexión de Tres Puntos).



Imagen 1, 2 y 3. Preparación de las muestras de cemento desecado, así como su inducción a la cámara de vacío.

ANEXO III

Comentario sobre las Implicaciones Medioambientales de los Nuevos Materiales Nanotecnológicos

Muchas son las aplicaciones potenciales de la nanotecnología, no obstante, por el momento casi todas giran en torno al perfeccionamiento de materiales existentes y en la innovación de nuevas aleaciones o combinaciones.

Los materiales nanodiseñados pueden ser utilizados en diversos productos como por ejemplo bolas de tenis, golf o boliche; para la fabricación de neumáticos de alto rendimiento; en la fabricación de telas con propiedades anti-manchas o antiarrugas; para cosméticos, fármacos y nuevos tratamientos terapéuticos; en el diseño de filtros/membranas de agua nanoestructurados y "remedios" medioambientales; en la mejora de procesos productivos mediante la introducción de materiales más resistentes o eficientes (tanto industriales como agroindustriales); para usos que van desde la construcción, electrónica, la aeronáutica y prácticamente toda la industrias del transporte.^[1]

AMBIENTE, POLÍTICA Y SOCIEDAD

Las propiedades de dichos materiales nanoestructurados, sustento de esas otras aplicaciones, sustento de esas y otras aplicaciones, han generado una doble atención. Por un lado se observan los amplios beneficios que posibilitaría la potencial reestructuración del entorno material que nos rodea. Y por el otro lado, se identifican las posibles implicaciones que esa transformación generaría en el medio ambiente y de ahí, en la salud puesto que estarían presentes novedosas nanopartículas y nanoestructuras diseñadas por el ser humano, cuyas características, en su gran mayoría, son todavía desconocidas e incomparables a aquellas similares de origen natural.

Para ello es básico determinar, de modo general y particular, las características de los nanomateriales en interacción con el medio natural (y consecuentemente de sus posibles transformaciones. Esto es, por tanto, aspectos como:

- Sus mecanismos de transporte o movimiento en aire, tierra y agua y el grado de capacidad de difusión (por ejemplo de forma aerodinámica; de filtración de medios porosos como la tierra; o de disolución/dispersión en medios acuosos), de aglomeración. De deposición húmeda y seca.

¹. Guerra por lo Invisible: Negocio, Implicaciones y Riesgos de la Nanotecnología. Gian Carlo Delgado Ramos. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Su reactividad con moléculas naturales (no diseñadas o modificadas químicamente) y su alteración, incluyendo su toxicidad.
- Los cambios inducidos por reacciones catalizadoras o por condiciones anaeróbicas.

Es interesante notar que el pleno ascenso del estímulo a la nanotecnología y de los numerosos reconocimientos acerca de los potenciales peligros de este tipo de nanoestructuras por parte de actores gubernamentales, empresariales o de la ONG, el financiamiento y por tanto el número de estudios sobre los efectos toxicológicos y medioambientales sean comparativamente aún limitados.

En términos globales, en cuanto a la actividad del sector privado y de ciertos institutos de investigación públicos pero con proyección comercial, está se puede analizar desde diversos ángulos:

- La determinación de los actores más activos en la captación inicial de capital de riesgo para la conformación de nuevas empresas, muchas de las cuales cuentan desde su inicio como uno o más científicos, lo que se podría categorizar como "pequeños" actores, aunque no por ello menos importantes.
- La indagación de aquellos con mejor desempeño en cuanto al tiempo del ciclo tecnológico –la velocidad de la innovación- y que pueden ser actores en varias dimensiones.
- La identificación de los llamados "gigantes" con mayor participación en las investigaciones de aplicaciones de largo plazo y/o "tecnologías convergentes" o;
- Mediante la revisión de la concentración de patentes adjudicadas.

Muchas de las condicionantes que se perciben para que la Unión Europea logre alcanzar las magnitudes en Ciencia y Tecnología de Estados Unidos, es la multiplicidad no sólo económica y social, sino también cultural de los Estados miembros de la UE, es aún relativa debilidad de frente a la competencia intercapitalista con EUA puesto que los grados de consolidación de una red y otra son un tanto distantes. Si bien dicha pluralidad permite una mayor "apertura política" en el proceso de definición de la agenda europea en Ciencia y Tecnología en comparación al mismo proceso de EUA. [2]

Todo indica una mayor consolidación de la red industrial europea depende, en buena medida de la minimización de confrontaciones de intereses nacionales entre los mencionados países mas fuertes (y no necesariamente con y entre los miembros "menores"). Al mismo tiempo parece obligado el estímulo de la integración de los planes para el desarrollo de áreas científico-tecnológicas que no resultan de interés mutuo y que por tanto suelen quedarse enfrascadas a las dimensiones de las redes industriales nacionales que conforman en la red industrial europea.

2. ídem, 1.

Desde luego lo anterior se sustenta en un aumento considerable de los niveles de inversión en Investigación y Desarrollo de la Ciencia dado que se asume la brecha entre EUA y la UE que ronda los 130 mil millones al año. [3] En tal sentido, la UE considera urgente un incremento bruto (PIB), el cual contempla que sea cubierto en dos terceras partes por el polo corporativo. [4] Y es que los grados de inversión en Investigación y Desarrollo de la Ciencia de EUA le permiten adjudicarse, y con holgura, la primera posición mundial. En 2004 tal inversión estadounidense, en su rubro civil, correspondió al 44% del gasto de todos los países de la OECD en comparación al aproximadamente 30% que le corresponde a la UE. Ese gasto por parte de EUA sobrepasa el ejercicio por el G7 en el mismo rubro y combinado con aquel militar, tan solo logran superar, en 17%, el gasto exclusivamente civil en EUA.

Finalmente es preciso advertir que una gran capacidad de infraestructura e inversión de Investigación y Desarrollo de la Ciencia no asegura la hegemonía en Ciencia y Tecnología de una red industrial en el mercado sino se garantiza el control de las tecnologías estratégicas, es decir de aquellas que fortalecen la capacidad militar del Estado nación y/o que tienen un alto grado de encadenamientos productivos hacia atrás y hacia adelante (muchas de las cuales ciertamente son tecnologías de punta aunque no exclusivamente). Es un contexto en el que la capacidad de liderazgo de las tecnologías de punta, ciertamente marca la pauta y establece los límites de la competencia intercapitalista, pero esta última define a su vez en el control de los nichos claves y no precisamente de cualquier tipo de aplicación de tal o cual tecnología de punta.

ALGUNOS BENEFICIOS

Se asegura que la nanotecnología en cuestión ambiental resolverá muchos de los problemas que hoy en día. Por ejemplo, se sostiene que será posible una reducción importante de los niveles de consumo de recursos necesarios en los procesos productivos, puesto que se mejoraría la eficiencia tanto en recursos utilizados como en energía consumida. Así mismo se habla de la ampliación de los ciclos de restitución de los medios de producción –gracias al uso de materiales más resistentes-, de la mejora de sistemas fotovoltaicos y/o de producción de hidrógeno para uso como combustible, entre otras aplicaciones puntuales como el desarrollo de procesos de remediación ambiental, o inclusive como la propuesta que maneja dicha tesis que es el llegar a desarrollar materiales para la eco-construcción y así proporcionar grandes elementos para otorgar beneficios que engloben un sistema económico, político, social y ambiental. [5]

3. European Commission, 6 de abril de 2005

4. El incremento promedio del gasto en Investigación y Desarrollo de Ciencia medido en tanto porcentaje del PIB entre 1981 y 1991 fue de 4% en EUA, de 4.3% en Japón y de 6.9% en EUA. Para la década de 1990, a pesar de registrarse un aumento de las tasas de inversión europea, la brecha entre ese conjunto de países y EUA se mantuvo (al igual que para el caso de Japón) debido a la gran divergencia en el gasto en términos absolutos. Para el registro del 2004, se registra un gasto de 2.59% en EUA, de 1.96 en la UE, y de 3.12 en Japón (European Commission, 6 de abril de 2005).

5. Ídem 1.

La meta general en el corto plazo es la de reducir el costo de producción de energía, consumo y muy importante del mantenimiento de estos, y generar el ya no consumo excesivo de materiales no renovables como lo es el petróleo llevando a cabo una competencia generando una disminución de precios. Se trata de un ejercicio oportuno de frente a las exageradas expectativas de las nanotecnologías "verde" que están siendo, en varias ocasiones, utilizadas como cartas de justificación del avance nanotecnológico como un todo y a modo de evadir discusiones dilemas o controversias públicas todo acerca de su gran complejidad, implicaciones y riesgos.

¿SUSTENTABLE O SOSTENIBLE?

"Actualmente existen ciertas tecnologías novedosas que mostraran en definitiva la concepción de nuestro futuro probable, sin duda un futuro que afectara a las áreas del conocimiento, incluido nuestro campo de trabajo la arquitectura. Las tecnologías que afectan nuestra disciplina están íntimamente ligadas con el dominio de la materia que los científicos no has proporcionado con sus descubrimientos, así las nuevas tecnologías permiten a la arquitectura contar con increíbles herramientas y materiales para conseguir su fin causal en este milenio."^[6]

En realidad es un tema que siempre ha llegado a desatar confusiones y en algunas ocasiones confrontamientos, ya que se ponen en juicio intereses particularmente políticos en donde ninguno de los organismos que representan esta dispuestos a ceder a favor de un habitat mucho mejor.

Pero aquí también intervienen los materiales que tienen una modificación como objeto de la intervención de la ciencia en sus propiedades químicas de cada elemento, por lo cual se busca que por medio de esta se desarrollen materiales nanoestructurados que proporcionen mayores características y que suplan a los actuales sin embargo debe comprobarse dos factores la sustentabilidad y su sostenibilidad.

La Sustentabilidad es "Aquel desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro, para atender sus propias necesidades", ^[7] pero este termino debe tomarse en cuenta que se desarrollan tanto desde su proceso de elaboración hasta su reutilización. Dichos materiales son sustentables ya que se busca como un elemento principal el no dañar un futuro probable y buscar en gran parte los beneficios a costa de un gran desarrollo, de grandes investigaciones que busquen alternativas para la humanidad y que si bien puede provocar una destrucción el hecho de dichas tecnologías debido a un mal empleo no es el fin común que se busca.

6. OCAMPO RUIZ, Ernesto, Artículo *Nanotecnología y Arquitectura*, Revista del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Febrero 1998. <http://www.imcyc.com/revista/1998/febrero/nanfeb98.htm>, Página Consultada el 15 de Julio de 2007.

7. Término extraído con fines didácticos, Informe *Brundtland*, 24 Octubre de 2007 www.desarrollosostenible.wordpress.com/2006/09/27/informe-brundtland/ - 17k -

Pero por otra parte es que sean Sostenibles que es *“Conseguir un equilibrio adecuado para el desarrollo económico, crecimiento de la población, uso racional de los recursos, protección y conservación del ambiente”*. [8] un elemento el cual es indispensable ya que su regeneración es un arma importante y tal vez sea el cuestionamiento de un futuro ya que los recursos de los cuales nos proveen el día de hoy, mañana pueden acabar. Por lo tanto son dos significados diferentes ya q sustentable se enfoca al cuidado de los recursos para un mejor aprovechamiento y Sostenible piensa en la auto regeneración para que los sistemas o recursos obtengan un ciclo independiente y que funciones por sí mismos.

A lo cual considero q para que un material sea “Sustentable”, debe estar relacionado con la energía empleada en las fases de producción, su comercialización y consumo; que englobe aspectos políticos, sociales, culturales y ambientales así se contempla o no una creciente generación neta de desechos como resultado de una disminución de la calidad de los bienes finales. En este contexto, y a modo de poder entender y evaluar mejor el asunto en términos ambientales, la definición más adecuada. El análisis de los flujos de energía y materiales de la economía es un aspecto ampliamente estudiado por la Economía Ecológica, tal vieja perspectiva sobre el equilibrio socioeconómico que “renace” con mucha fuerza recientemente debido a la crisis ambiental que se presenta en recientes años.

Pero en el caso de Nanotecnología se podría pensar que resulta más difícil ya que intervienen muchos factores que pudieran detener las investigaciones de los avances científicos, pero lo verdaderamente importante es saber si existe honestidad en este ámbito de la ciencia ya que de no existir así, puede llegar a ser contraproducente ya que en el mercado mundial pueden ofrecer materiales o artículos que contengan elementos nanotecnológicos pero en realidad no sea manipulado por ninguna de estas vías. Sin embargo la otra cara de la moneda puede ser aun más lamentable, ya que la mayoría de los materiales que son manipulados a la nanoescala pueden dañar en gran medida a la naturaleza ya que si no se tiene un optimo control puede contaminar gravemente y aun mas dañar severamente al ser humano; es así como puede intervenir la Nanotecnología en el ámbito global si no se tiene un sentido responsable de lo que se diseña, investiga y propone.

Creo que lo que debe interesar realmente debe ser un sentido de ética profesional, ya que no se puede sacar cualquier elemento para ser consumido, porque siempre estará de por medio el dinero, como elemento persuasivo y de ambición lo cual llega a cegar a los seres humanos ya que este ofrece poder y es un sentimiento que las personas no pueden negar llegar a conseguir, por eso nosotros como investigadores y profesionistas tenemos la gran tarea de erradicar en su mayoría estos aspectos, ya que el único poder que debemos tener es el de conseguir y demostrar nuestras investigaciones teniendo como recompensa la admiración de los diversos campos de estudio.

⁸. Término extraído con fines didácticos, *Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible*. José Manuel Naredo, 24 Octubre de 2007, <http://habitat.aq.upm.es/select-sost/>