



Universidad Nacional  
Autónoma de México

## Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Endurecimiento de Cementos Tipo Portland  
Inducido por Fosfatos y/o Silicatos

# TESIS

Que para optar por el Grado  
de Doctor en Arquitectura

Presenta:

ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ

México, D.F.

2015





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.

# JURADO

## Director de Tesis:

**Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza**  
Instituto de Física de la UNAM

## Sinodales:

**Dr. Lauro Bucio Galindo**  
Instituto de Física de la UNAM

**Dr. Agustin Hernández Hernández**  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

**Dr. Jesús Aguirre Cárdenas**  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

**Dra. Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino**  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura



## Instituto de Física de la UNAM

El trabajo de investigación asociado a la Tesis de Doctorado cuyo título es **"Endurecimiento de Cementos Tipo Portland Inducido por Fosfatos y/o Silicatos"**, fue realizado en los Laboratorios del Instituto de Física de la UNAM, bajo la dirección del Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza y el Dr. Lauro Bucio Galindo.

# Dedicatorias

---

## **A mis padres**

A ti mamá por ser la mujer mas valiente que conozco, nunca te ha detenido nada en esta vida para seguir adelante, una vez mas me demostraste la forma en que se debe sobrellevar esta vida. Te amo inmensamente.

A ti papá, porque escribir las razones por las que te amo tomaría demasiado tiempo, este mensaje es simplemente para decirte que estoy orgulloso y feliz de ser tu hijo. Sigues siendo mi mejor amigo, mi compañero de aventuras, la persona de la cual sigo aprendiendo.

Siéntanse orgullosos porque cada paso que doy es gracias a ustedes, por alentar

mis sueños, por creer en mi y por ver siempre a sus hijos como triunfadores.

Papás con estas letras quiero expresarles mi inmenso amor por ustedes y nunca podre olvidar mi paso por esta vida a su lado.

## **A mis hermanos Miguel y Uriel**

Cómplices, compañeros, enemigos en los juegos pero aliados en la vida, gracias por tantas risas. En mi corazón sólo puede haber agradecimiento hacia ustedes, por su inmenso apoyo, por los momentos de alegría y tristeza que hemos pasado juntos y siempre

formando una familia unida. Cada vez que los veo son momentos de inmensa felicidad pues disfruto su peculiar forma de amar.

#### **A Brenda**

Cuando inicie este trabajo creíste en mi, a pesar de las adversidades siempre me apoyaste y nunca abandone este sueño, hoy lo culmino no sin antes pensar que tu me diste la fuerza y las palabras adecuadas para no caer. Hoy seguiremos construyendo muchos caminos y no me importa a donde llegaremos, porque a tu lado me has demostrado que no existen fronteras.

Mi vida cambio indudablemente cuando te conocí. Gracias por tu amor, comprensión, paciencia, por tu tiempo.

Gracias por soñar conmigo, Te Amo.

#### **A Leo**

Le dedico gran parte de este trabajo a mi hijo Leo, quien es mi máxima motivación.

Aún eres pequeño pero cuando leas esto quiero que sepas que inundaste de luz mi vida con sólo mirarme a los ojos segundos después de nacer. Llenas mi

casa con tu risa de niño. Alegras mi vida con una simple llamada.

Gracias por estar en mi vida, por compartir tu mundo conmigo, por venir con todo tu entusiasmo y alegría, quiero que sepas que eres mucho mejor de cómo te soñé.

#### **A mis abuelitos**

Aunque ya no estas conmigo nunca te he olvidado, tu paso por esta vida me dejo muchas alegrías y aun no puedo evitar sentirme triste cada vez te recuerdo, te extraño pero me quedo con los momentos vividos a tu lado. Gracias Estelita, te quiero con todo mi corazón.

Miguel siempre hay razones y muchos motivos para seguir viviendo, le doy gracias a Dios de poder seguir aprendiendo de ti. Cuando veo tus manos están llenas de mucho trabajo, pero también de mucha experiencia, te quiero mucho, eres el gran ejemplo de mi familia.

Abuelita Elena nunca me ha hecho falta conocerte, porque cuando veo a mi papá se que es un gran reflejo de ti. Se que me escuchas cuando estoy a solas y en muchas ocasiones estas presente, en donde quiera que te encuentres ..... gracias.

# Agradecimientos

---

Al Dr. Eligio Orozco, por brindarme la oportunidad de seguir colaborando e investigado a su lado, por haberme ayudado a forjar el temple como investigador y por abrirme las puertas para cumplir uno de los sueños mas grandes de mi vida, ser Doctor. Le agradezco por su confianza depositada en un arquitecto y que gracias a eso aprendí que la investigación es una experiencia que uno transita solo en la búsqueda del conocimiento. Muchas gracias.

A mi jurado de examen: Dr. Lauro Bucio Galindo por brindarme sinceramente sus conocimientos, le guardo un profundo respeto por su calidad como ser

humano, gracias por ser un gran amigo, por alentarme a seguir por este camino. Al Dr. Agustín Hernández Hernández por sus comentarios, aportaciones y revisiones que no me dejaron olvidar que este trabajo es para los arquitectos y la arquitectura. Al Dr. Jesus Aguirre Cardenas, por el honor de brindarme su valioso tiempo asesorando este trabajo pues al comenzar por este camino es gratificante tener su experiencia reflejada en sus comentarios que enriquecen el trabajo y motivan para seguir adelante. A la Dra. Gemma Verduzco Chirino, porque me alentó a dar lo mejor de mi, por ser un impulso invaluable ya que gracias a su apoyo pude conseguir más objetivos para mi

desarrollo profesional, porque a esta profesion le faltan mentores como usted que nos impulsen a realizar trabajos de verdadera calidad, su disposición por ayudarme nunca lo olvidare.

A mis amigos: Ángel Osornio, Leticia Trejo, Eréndira Martínez, Gabriela García, por su ayuda y ánimo siempre presente. Muchas gracias a Nora Pérez y Jacobo Martínez, ya que realizar esta tesis resultó ser gratificante y divertido al compartir cada día con ustedes.

Quiero agradecer a CONACyT por brindarme la beca que me permitió estudiar este doctorado. Al Programa de

Maestría y Doctorado en Arquitectura por su apoyo. Al CCADET (Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico), en especial al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE), y al Dr. Jose Ocotlan por su valiosa cooperación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi casa, por haberme abierto sus puertas nuevamente y por contribuir a mi formación como investigador, por ser la mejor institución para desarrollar conocimiento, es un honor para mi pertenecer al grupo académico que labora para esta universidad.

# Contenido

---

Introducción	13
<b>Capítulo I</b>	
Planteamiento de la Investigación	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Planteamiento del Problema	22
1.3 Justificación	28
1.4 Origen del Proyecto	29
1.5 Objetivos	31
1.5.1 General	31
1.5.2 Particulares	32
1.6 Hipótesis	32

<b>Capítulo II</b>	
<b>Marco Conceptual</b>	<b>33</b>
2.1 Cemento	33
2.2 Producción del Cemento	36
2.3 Hidratación del Cemento	42
2.4 Propiedades Físicas del Cemento	48
<b>Capítulo III</b>	
<b>Procedimiento Experimental</b>	<b>53</b>
3.1. Materiales Empleados	55
3.2 Fabricación de Probetas para Compresión y Flexión	57
3.3 Tipo de Mezclas que se Prepararon	69
3.4 Técnicas de Caracterización	72
3.4.1 Pruebas Mecánicas	72
3.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	76
3.4.3 Difracción de Rayos X (DRX)	78
3.4.4 Espectroscopía Infrarroja	79
<b>Capítulo IV</b>	
<b>Análisis y Discusión de Resultados</b>	<b>83</b>
4.1. Endurecimiento de las Pastas de Cemento Simple y con TCP de Origen Natural, Mezclados con Agua Potable de la Red	85
4.1.1 Pruebas de Deformación a la Fractura	85
4.1.2 Microscopía Óptica	89
4.1.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	91
4.1.4 Difracción de Rayos X (DRX)	95
4.1.5 Espectroscopía Infrarroja (FTIR)	102
4.1.6 Resistencia Mecánica: Caso Wollastonita	111
4.2. Discusión de Resultados	113
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>117</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>124</b>

# Índice de Tablas

---

Tabla 1	Compuestos principales del Cemento Portland
Tabla 2	Compuestos principales del Cemento Portland Hidratado
Tabla 3	Clasificación del cemento Pórtland
Tabla 4	Especificaciones y tolerancias de cementos hidráulicos
Tabla 5	Lote de Muestras a Analizar
Tabla 6	Fases cristalinas detectadas en las pastas de cemento con y sin TCP

# Índice de Figuras

---

- |          |  |
|----------|--|
| Figura 1 | Causas que producen problemas de durabilidad en el concreto  |
| Figura 2 | Causas de deterioro en el concreto   |
| Figura 3 | Países Productores de Cemento a Nivel Mundial  |
| Figura 4 | Producción del cemento a nivel mundial   |
| Figura 5 | Consumidores de cemento a nivel nacional   |
| Figura 6 | Esquema representativo del proceso las materias primas que se requieren para obtener cemento portland. |
| Figura 7 | Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco                        |

- Figura 8** Horno Rotatorio para la manufactura del clinker de cemento
- Figura 9** El clinker de cemento portland se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice
- Figura 10** Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final
- Figura 11** Yeso, la fuente del sulfato, se muele juntamente con el clinker para formar el cemento portland
- Figura 12** Descripción esquemática de los productos de reacción y la microestructura que se desarrolla durante la hidratación
- Figura 13** Dimensiones de las probetas fabricadas para pruebas a compresión.
- Figura 14** Elaboración de moldes y vaciado posteriormente con mezclas de Cemento Portland y Cementos con Aditivos
- Figura 15** Elaboración de prototipos de diseño para fabricar probetas de Cementos Básicos y Cementos con Aditivos, para someterlos a pruebas de Flexión.
- Figura 16** Corte Longitudinal y Transversal del diseño de probetas rectangulares.
- Figura 17** Desmolde de las probetas de Cemento Básico y Cemento con Aditivos.
- Figura 18** Dimensiones de las probetas fabricadas para pruebas a flexión de 3 puntos.
- Figuras 19 y 20** Fabricación de la celda de carga para Pruebas de Flexión, las flechas indican la parte frontal y la zona punteada el perfil de la pieza.
- Figura 21** Cálculo de la resistencia a la compresión efectuada a las probetas.
- Figura 22** Cálculo de la resistencia a la flexión efectuada a las probetas.
- Figura 23 y 24** Prueba de Compresión y Prueba a Flexión en Tres Puntos realizada en la Máquina de Pruebas Universal SHIMADZU.
- Figura 25** Máquina Shimadzu, Mod. AG-100 KNG. En la que se llevaron a cabo las pruebas de Compresión y Flexión en Tres Puntos

- Figura 26** Microscopio de Barrido JEOL, en sesión de micrografías para cemento.
- Figura 27** Difractómetro D8-Discover
- Figura 28** Equipo Nicolet Nexus 670 FT-IR
- Figura 29** Mortero de ágata con KBr y muestras de Cemento Portland
- Figura 30** Pastilla elaborada para FTIR.
- Figura 31** Productos de hidratación presentes en el cemento portland.
- Figura 32** Resistencia mecánica a la fractura de pastas de cemento simple y cemento con TCP, en ambos casos se utilizó agua desionizada para preparar la pasta.
- Figura 33** Resistencia mecánica a la fractura de pastas de cemento simple y cemento con partículas submicrométricas de TCP, en ambos casos se utilizó agua potable de la red para preparar la pasta.
- Figura 34** Resistencia a la flexión de pastas de cemento simple y cemento con partículas submicrométricas de TCP.
- Figura 35** Imágenes de microscopía óptica para determinar los productos de hidratación en pastas de cemento simple a 37 días de endurecimiento. La imagen A es la original tomada por el microscopio óptico junto con la escala en micras y en la imagen B se resaltan los productos de hidratación como resultado del procesamiento por medio del programa ImageJ .
- Figura 36** Imagen óptica para determinar los productos de hidratación en pastas de cemento con TCP a 37 días de endurecimiento. La imagen A corresponde a la original tomada con el microscopio óptico junto con la escala en micras y en la imagen B se resaltan los productos de hidratación después del procesamiento por medio del programa ImageJ .
- Figura 37** Micrografías de pastas de cemento a 5 días de endurecimiento, imagen A cemento simple e imagen B cemento con aditivo TCP. Se enmarcan los productos de hidratación Silicato Tricálcico (C3S), Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y Etringita ( $\text{C}_6\text{ASH}_32$ ).
- Figura 38** Micrografías de pastas de Cemento Simple y Cemento con TCP a 7, 14 y 28 días de endurecimiento.

- Figura 39** Difractogramas de las muestras de Cemento Básico y TCP a 5 días de endurecimiento.
- Figura 40** Difractogramas de las muestras de Cemento Básico y TCP a 37 días de endurecimiento.
- Figura 41** Variación de la fracción de silicato tricálcico con el tiempo de endurecimiento (imágenes A, B). Variación de la fracción de Portlandita con el tiempo de endurecimiento.
- Figura 42** FTIR de cemento simple hidratado durante las diferentes etapas de endurecimiento. Se marcan las posiciones de las bandas asociadas a grupos funcionales de interés para la investigación.
- Figura 43** FTIR de cemento hidratado, con TCP de origen natural, durante las diferentes etapas de endurecimiento. Se observan bandas similares al espectro de cemento simple.
- Figura 44** Deconvolución del espectro de 7 Días de Endurecimiento de Cemento Simple.
- Figura 45** Evolución de la banda de  $949\text{ cm}^{-1}$  asociada a modos vibracionales del los silicatos de calcio C3S yC2S.
- Figura 46** Evolución de las bandas de  $3420$  y  $1654\text{ cm}^{-1}$  con el tiempo de endurecimiento. La primera asociada a agua adsorbida o en sitios capilares y la segunda a modos vibracionales del agua incorporada en la red.
- Figura 47** Resistencia mecánica de pastas de cemento simple y cemento con partículas submicrométricas de Wollastonita, en ambos casos se utilizó agua potable de la red para preparar la pasta.
- Figura 48** Representación esquemática del proceso de hidratación de una partícula de silicato tricálcico o alita.
- Figura 49** Representación esquemática de la hidratación de la alita o cemento con y sin la "siembra" de nano-partículas de C-S-H

# Glosario

## Abreviaturas Empleadas en el Presente Documento

Nomenclatura	Nombre de Materiales
CPO	Cemento Portland Ordinario
TCP	Fosfato Tricálcico
W	Wollastonita

Nomenclatura	Elementos del Cemento
C CaO	Óxido de calcio
S SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silicio
A Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dióxido de Aluminio
F Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro
H H <sub>2</sub> O	Agua

Nomenclatura	Técnicas de Caracterización
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
DRX	Difracción de Rayos X
FTIR	Espectroscopía Infrarroja

Nomenclatura	Fases del Cemento no Hidratado
C <sub>3</sub> S 3CaO·SiO <sub>2</sub>	Silicato Tricálcico (Alita)
C <sub>2</sub> S 2CaO·SiO <sub>2</sub>	Silicato Dicálcico (Belita)
C <sub>3</sub> A 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminato Tricálcico
C <sub>4</sub> AF 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferroaluminato tetracálcico

Nomenclatura	Productos de Hidratación del Cemento Portland
CSH	Silicato de Calcio Hidratado
CH - Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Calcio (Portlandita)
Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ·3(CaSO <sub>4</sub> )·32H <sub>2</sub> O	Etringita

# Introducción

---

**E**l concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo. Se estima que el concreto se utiliza cinco veces más en peso que el acero. En algunos países, este porcentaje excede la proporción de 10 a 1. El consumo de concreto hoy en día es aproximadamente dos toneladas por cada ser humano por año, sin embargo, hay que aclarar que la materia prima de este material es el cemento y para producir una tonelada de este, se está produciendo también una tonelada de CO<sub>2</sub>.<sup>[1]</sup>

Se estima que las plantas productoras de clinker producen el 7% del total de producción mundial del CO<sub>2</sub> del planeta, siendo por consiguiente uno

de los contribuidores de los gases de efecto invernadero.<sup>[2]</sup>

Este material es tan versátil, manejable, moldeable, de bajo precio y se produce fácilmente; ya que sólo se requiere una mezcla de cemento, agua, grava y arena para producirlo. Al cabo de unas cuantas horas se tiene una masa que ha fraguado y endurece paulatinamente a la cual podemos clasificar como una "roca artificial" y esta piedra puede adoptar diversas formas ya que por medio de la "cimbra" el ser humano propone el molde.

Conforme evolucionan la ciencia y los cambios tecnológicos, se ha demostrado que este material puede ser susceptible

a una serie de fenómenos físico-químicos que afectan su durabilidad y pueden llevar a la destrucción de las estructuras de concreto reforzado.

Por ejemplo en la arquitectura es difícil entablar un diagnóstico en las estructuras que se ven afectadas por el intemperismo, una forma de evaluar las condiciones de los elementos constructivos es determinando los posibles factores de su microestructura que condicionaron un probable deterioro en el material, es así como puede darse la unión de las tecnologías por medio de la interdisciplina para obtener el mejor resultado.

Actualmente, se cuenta con la tecnología para estudiar gran parte de los factores y mecanismos que pueden originar baja durabilidad del concreto, esto incluye el estudio de cada uno de los componentes del concreto, sus reacciones físico-químicas en el proceso de fraguado y endurecimiento, su comportamiento mecánico al someterse a diferentes tipos de cargas, así como su comportamiento en las condiciones ambientales de exposición a los fenómenos naturales.

Hoy en día no se puede hablar de concretos sin mencionar que estos contengan algún tipo de aditivo o complemento cementante. El deterioro del planeta por la contaminación de la atmósfera y la no planeación de



el concreto se  
utiliza cinco  
veces más en  
peso que el  
acero

procesos o productos sustentables ha impulsado a que la industria cementera esté cambiando en la búsqueda de una mejora continua, disminuyendo los consumos de energía en sus procesos y

---

<sup>1</sup>. P. C. ATcin. *Cement and Concrete Development from an Environmental Perspective*, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21<sup>st</sup> Century, Edited by Odd GjØrv and Koji Sakai, 2000, p. 210.

<sup>2</sup>. J. Péra, J. Ambroise, and M. Chabannet, *Transformation of Wastes into Complementary Cementing Materials*, p. 459. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP199, ACI, Volume 2. 2001.

utilizando complementos cementantes ya sean naturales o artificiales.

Los complementos cementantes reducen los consumos de clinker, ahorrando energía, produciendo menos gases de efecto invernadero a la atmósfera y generando por lo tanto procesos más sustentables.

Las edificaciones hoy en día, que utilizan concreto tienen planteamientos al inicio, durante el proceso y uso final, pero el producto sobrante de este material denominado cascajo, no contempla su reciclaje o reutilización; lo que lleva finalmente a un desecho de este material, el cual produce un daño medio ambiental ya que contamina el suelo y no permite la filtración para recargar los mantos freáticos; su reciclaje no ha tenido avance hoy en día, de ahí el interés por estudiar las propiedades del cemento y proponer nuevas alternativas de consumo para la construcción haciendo mas efectivo y preciso su empleo en la obra.

En México por ejemplo la industria del cemento se caracteriza por ser de las más eficientes del mundo, gracias a:

las inversiones continuas en tecnología y equipamiento de punta; capacidad técnica de su personal; y la seguridad de sus procesos, equipos y operaciones; aunado con la buena calidad de los minerales que conforman el clinker.

Esto permite que México se encuentre entre los 15 principales productores de cemento en el mundo. La Industria está compuesta por 6 empresas (dentro de las cuales se encuentran las 3 más grandes a nivel mundial: Lafarge, Holcim y Cemex), 32 plantas, con una capacidad total de 51.0 mmt (millones de toneladas métricas).

Hoy en día se fabrican cementos en los cuales existe una diversidad de materiales y aditivos que se pueden utilizar para obtener un concreto que pueda soportar condiciones ambientales adversas. Algunos estudios realizados en los años 80 (Sanjuán, 2001)<sup>3</sup> sobre las causas que producen problemas de durabilidad, se atribuye el defecto en la calidad de los materiales en un 16.2%, siendo los errores de ejecución el 38.5% y más del 40% a errores de diseño y/o cálculo (Figura 1). Otros estudios

---

<sup>3</sup>. Sanjuán Barbudo, Miguel y Castro Borges, Pedro (2001). *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. IMCYC.

<sup>4</sup>. Neville M. Adams, (1999). *Tecnología del Concreto, México*, IMCYC.

<sup>5</sup>. Aitcin, P-C. (2007) *Binders for Durable and Sustainable Concrete. Modern Concrete Technology Series No. 16, CRC Press, Bacon Raton*.

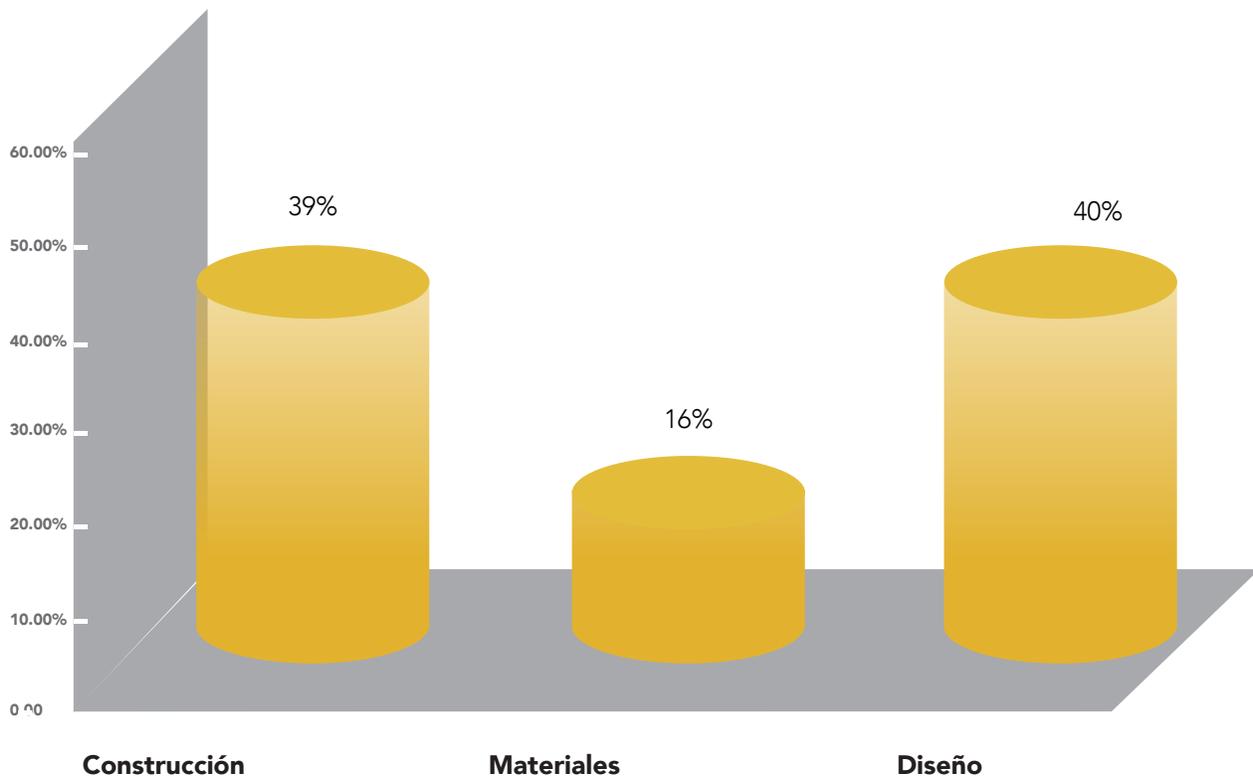


Figura 1. Causas que producen problemas de durabilidad en el concreto. Extraído con fines didácticos ídem 3.

realizados en los años 90 elevan al 30% la inadecuada selección de materiales que afectan su durabilidad. En la Figura 2, se pueden observar las principales causas de deterioro del concreto.

Debido a lo anterior, actualmente se incorporan en el concreto subproductos de origen natural o industrial como son: las

cenizas volantes, escorias de alto horno, humo de sílice y puzolanas naturales para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas, en estado fresco y endurecido (Neville, 1999; Aitcin, 2007).<sup>[4,5]</sup>

Sin embargo, en México estos aditivos se importan y su alto costo reduce la competitividad del concreto. Esto hace

necesario identificar aditivos naturales disponibles en el medio que contribuyan a mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. La mayor parte de las investigaciones se han centrado en el cemento portland ordinario (cemento gris), investigándose las propiedades físico-mecánicas

y microestructurales desarrolladas mediante la adición de otros materiales suplementarios y aditivos químicos, se pretende evaluar las características físico-mecánicas y microestructurales del cemento gris con la incorporación de materiales naturales a base de fosfatos y/o silicatos.

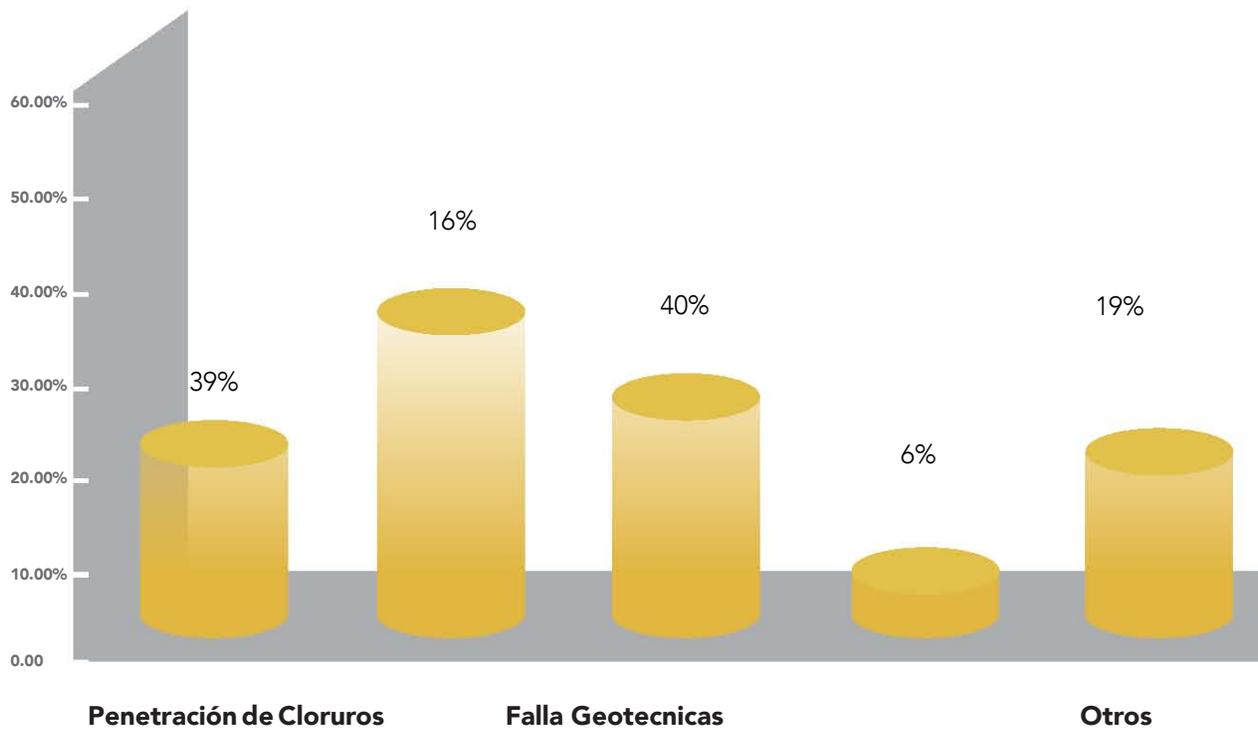


Figura 2. Causas del deterioro del concreto. Extraído con fines didácticos Idem 3.

# I. Planteamiento de la Investigación

---

## 1.1 Antecedentes

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidratados. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta.

Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo.

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las substanciasadyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en aumento de la rigidez, endurecimiento y desarrollo progresivo de la resistencia. La rigidez del concreto puede reconocerse por la pérdida de manejabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, dependiendo de la composición y finura del cemento, del aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura del ambiente. Por consecuencia el concreto fragua y se endurece.

La hidratación continúa desde que existan condiciones favorables de temperatura y humedad (curado) y espacio disponible para la formación de los productos de hidratación. A medida que la hidratación continúa, el concreto

se vuelve más duro y resistente. Gran parte de la hidratación y el desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero si hay humedad y temperatura adecuadas, continúa de manera más lenta, por un largo periodo. Se ha reportado el aumento continuo de resistencia, excediendo 30 años.<sup>[6,7]</sup>

Algunos antecedentes relacionados con la investigación del cemento adicionado de partículas como elementos catalizadores empleados en la mezcla son los siguientes:

Chandra et al. (1983)<sup>[8]</sup>, investigaron la influencia de la adición de un material orgánico "Black gram" en mezclas de mortero. Elaboraron prismas de mortero de 4x4x16 cms y 4x4x8 cms con una relación cemento-arena de 1:3 y relación agua- cemento de 0.50. Se determinó la absorción de agua por capilaridad secando los especímenes a 105°C.

Los autores sugieren que la adición orgánica puede ser utilizada como

---

<sup>6.</sup> Washa, George W., y Wendt, Kurt F., "Fifty Year Properties of Concrete (50 Años de Propiedades del Concreto)." *ACI Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Enero 1975, pags. 20 a 28.

<sup>7.</sup> Wood, Sharon L., *Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete (Evaluación a Largo Plazo de las Propiedades del Concreto)*, Research and Development Bulletin RD102, Portland Cement Association, 1992, 99 páginas.

<sup>8.</sup> Chandra, S. and Aavik, J. (1983). Influence of Black Gram (natural organic material) additions as admixture in cement mortar and concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.13, pp. 423-430.

un agente introductor de aire en morteros debido a que interactúa como un polímero dispersante pero que en presencia de aceite se reduce el contenido de aire. La incorporación del material orgánico incrementó las propiedades hidrofóbicas en los morteros, lo cual se explica debido a que las biomoléculas contienen tanto grupos polares (o cargados iónicamente) como regiones no polares, por lo tanto son simultáneamente hidrofílicas e hidrofóbicas.

Por otra parte Cárdenas et al. (1997)<sup>[9]</sup>, evaluaron la preparación del mortero de cal con la incorporación del extracto del nopal. El mortero de cal preparado de esta manera se ha utilizado durante muchos siglos para restaurar y proteger edificios históricos contra la penetración del agua. La incorporación del extracto de nopal se redujo la absorción de agua y se incrementó considerablemente la permeabilidad de los muros de los edificios históricos.

Asimismo Wang et al. (2003)<sup>[10]</sup>, realizaron un estudio en donde examinaron el método para determinar el grado de hidratación del cemento y el grado de reacción puzolánica de la ceniza volante. Entre sus resultados, encontraron que la ceniza volante muestra buena actividad puzolánica al reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Portlandita), y por lo tanto aumenta la hidratación del cemento.

La ceniza de cáscara de arroz (Rice Husk Ash, RHA) como puzolana, es un material que puede ser empleado en la fabricación de morteros y concretos de alta resistencia en la construcción. Nehdí et al., (2003)<sup>[11]</sup>, desarrollaron una técnica para controlar la combustión de la cáscara de arroz de Egipto y reducir los daños ambientales relacionados con la combustión de este subproducto, además de proporcionar un material suplementario para la industria de construcción con la ceniza obtenida. Las investigaciones incluyeron un análisis de contenido de

---

<sup>9</sup>. Cardenas, A., I. Higuera-Ciapara, and Goycoolea, F. M. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution, *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, Vol 3., pp. 152-159

<sup>10</sup>. Wang A., Zhang Ch., Sun W., (2003). Fly ash effects. The active effects of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 2057-2060.

<sup>11</sup>. Nehdí M., Duquette J. y El Damatty A., (2003). Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1203-1212.

<sup>12</sup>. C. Adnan, (2003). Characteristic of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 585-593.

carbón, demanda de agua, índice de la actividad puzolánica y distribución del tamaño de las partículas, la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la penetración de cloruros.

Igualmente Adnan Colak (2003)<sup>[12]</sup>, evaluó la influencia de una puzolana natural de origen volcánico en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de pastas de cemento. Se utilizó un superplastificante tipo Naftaleno, y se encontró que el fraguado final de la pasta con puzolana natural está en un rango de 4-5 horas. Un reemplazo del 20% de puzolana con 1% de superplastificante, incrementa la resistencia y la durabilidad de las pastas de cemento, sin embargo aun falta investigar la adición de este material en mezclas para formar morteros.

Entre los avances recientes en la tecnología del concreto, se puede

mencionar el desarrollo de mezclas de concreto autoconsolidable (Okamura, 1997)<sup>[13]</sup>, con contenidos de agua relativamente bajos. Con la introducción de nuevos aditivos y materiales suplementarios (naturales o industriales), se han obtenido concretos altamente trabajables, con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad.

Estos concretos han sido llamados concretos de alto comportamiento (HPC). Entre sus propiedades comprende el mejoramiento en la trabajabilidad y compactación evitando la segregación, mejorando a largo plazo las propiedades mecánicas, alta resistencia a edad temprana, estabilidad de volumen y vida útil de servicio en condiciones ambientales agresivas (Carino y Clifton, 1991)<sup>[14]</sup>.

---

<sup>13</sup>. Okamura, H. (1997). Self-Compacting High Performance Concrete, Concrete International, American Concrete Institute, Vol. 19, No. 7, pp. 50-54.

<sup>14</sup>. Carino, N. J., and Clifton, J. R., (1991). Prediction of cracking in reinforced concrete structures High-Performance Concrete: Research Needs to Enhance its Use, Concrete International, September. Vol. 2, pp. 25-36

# 1.2 Planteamiento del problema

El estudio del cemento en el país, implica un análisis complejo, ya que no solo se concentra en la producción de cemento, se debe ahondar más allá en sus procesos de obtención, para hacer un campo de conocimiento el cual el arquitecto pueda abordar, debido a que en la practica profesional este propone un diseño de edificación acompañado de una propuesta de sistema constructivo, y en este sistema se toma en cuenta el material con el que se llevara a cabo las edificaciones. Además el estudio, no solo implica conocer los minerales que lo constituyen, los procesos y métodos, también es necesario que todos estos rubros estén regidos dentro de una normalización, estas normas van a depender de la actividad o proceso con el que se quiera manipular este material.

La industria del cemento en México, ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, creando centros de investigación, evaluación y comportamiento de materiales, relacionados con el estudio del cemento y del concreto.

México es un país que cuenta con una gran diversidad de materiales cerámicos, entre los que el cemento es de carácter principal, industria en pleno crecimiento y una de las más desarrolladas del país. La creciente demanda de este cerámico, implica una constante investigación de nuevos y mejores productos que proporcionen una mejor calidad, conservando sus propiedades físicas y mecánicas con el fin de disminuir su consumo, teniendo la perspectiva en un futuro de poder reducir las secciones (columnas y traveses por ejemplo) para tener una un mejor diseño de espacios.

A nivel mundial se ha considerado al concreto como uno de los materiales más nobles en la industria de la construcción debido a su maleabilidad y su bajo precio, porque con base en los requerimientos así como exigencias de los proyectos éste es un material que se adapta fácilmente, permitiendo al diseñador del espacio y al constructor su empleo en la mayor parte de las obras.

La producción de cemento, que es la materia prima del concreto, aumenta de manera constante impulsada sobre todo por la demanda interna e internacional. Un indicativo de la situación actual de la producción mundial de cemento se refleja en la publicación Cement Review, donde se destaca que en 1999 China demandó 485 millones de toneladas de cemento, mientras que su producción fue de 520 millones, utilizando el 93.3% de su producción, esto es 18 y 19 veces más que el consumo y fabricación de la industria mexicana, respectivamente

(De la Rosa, 2004)<sup>[15]</sup>. Este dato permite dar un acercamiento de que la mayor demanda de cemento se presenta en países altamente poblados o en vías de desarrollo, por lo cual es necesario brindar un material cementante económico que permita el desarrollo de la infraestructura carente respetando el entorno urbano-ambiental adaptándose a las condiciones de clima y humedad en donde será propuesta. En la Figura 3 se muestran los países que producen el 70% del cemento utilizado en el mundo (Obras, 2003)<sup>[16]</sup>.

---

<sup>15</sup>. De La Rosa Medina Tomas, La Guerra por el cemento. Obras México, 2004, p.35-37

<sup>16</sup>. Obras Web, Principales países productores de cemento, México. Obtenida el 29 de agosto de 2003, tomado de <http://www.obrasweb.com>

## Principales productores de cemento en el mundo

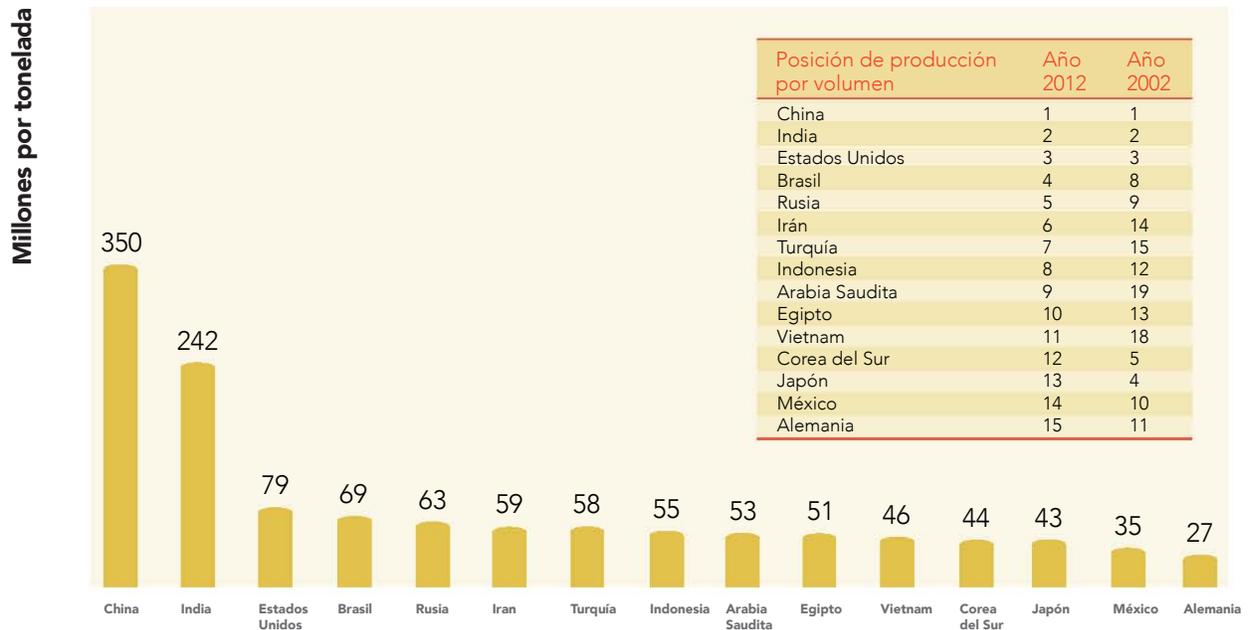


Figura 3. Países Productores de Cemento a Nivel Mundial

En nuestro país la producción de cemento se ha visto en aumento en los últimos años, al llegar a 36.2 millones de toneladas en el año 2012, en la Figura 4 se puede apreciar un incremento con respecto al 2010 fecha en que

cayo drásticamente la producción del cemento. Por lo tanto la demanda del cemento del año 2000 al 2012 ha sido alrededor del 34.43 por ciento, de esta forma la demanda del concreto también se ha visto en aumento.

## Producción de Cemento 2000-2012 MM Ton

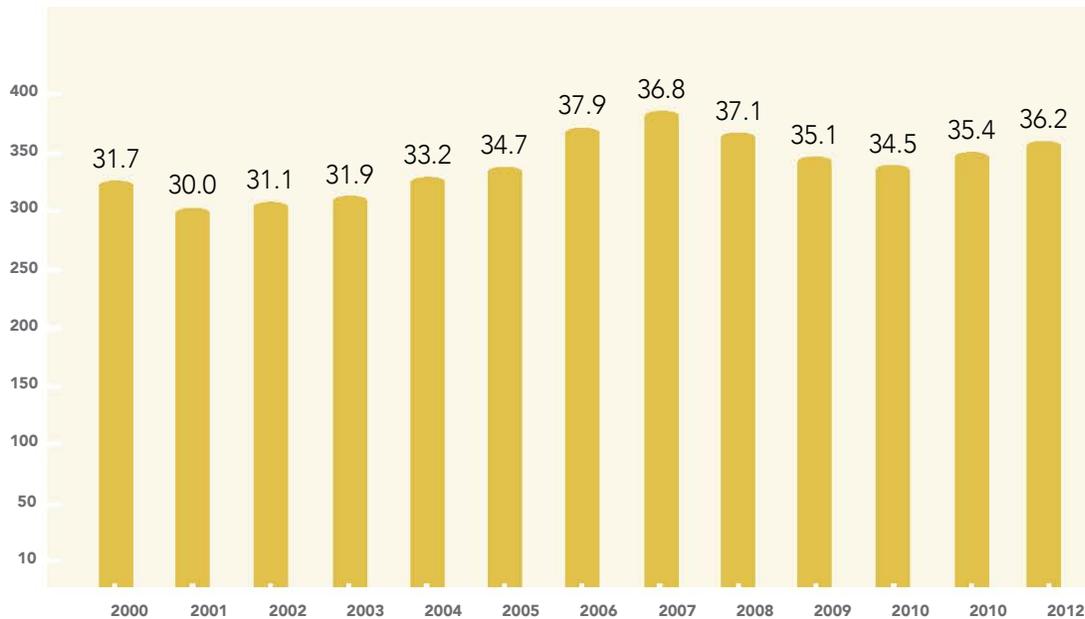


Figura 4. Cámara Nacional del Cemento. Fecha de consulta septiembre de 2014. [http://www.canacem.org.mx/la\\_industria\\_del\\_cemento.htm](http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm)

Por otro lado se percibe que el consumo del cemento tiene diversas variantes, ya que no solo depende de la construcción formal sino en gran medida el cemento se consume en la autoconstrucción (ver Figura 5), debido a las bondades de este material. En el caso de los transformistas quienes son los productores de prefabricados de concreto y otros productos a base de cemento, su porcentaje es negativo,

debido a la disminución de consumo de elementos prefabricados.

Esta característica es alarmante ya que principalmente en ese sector que es informal, no se respetan las condiciones ambientales, lo cual se ve reflejado en el desperdicio y uso excesivo que ocasiona este material.

## Consumidores

### Usuarios e la Industria del Cemento (millones de toneladas)

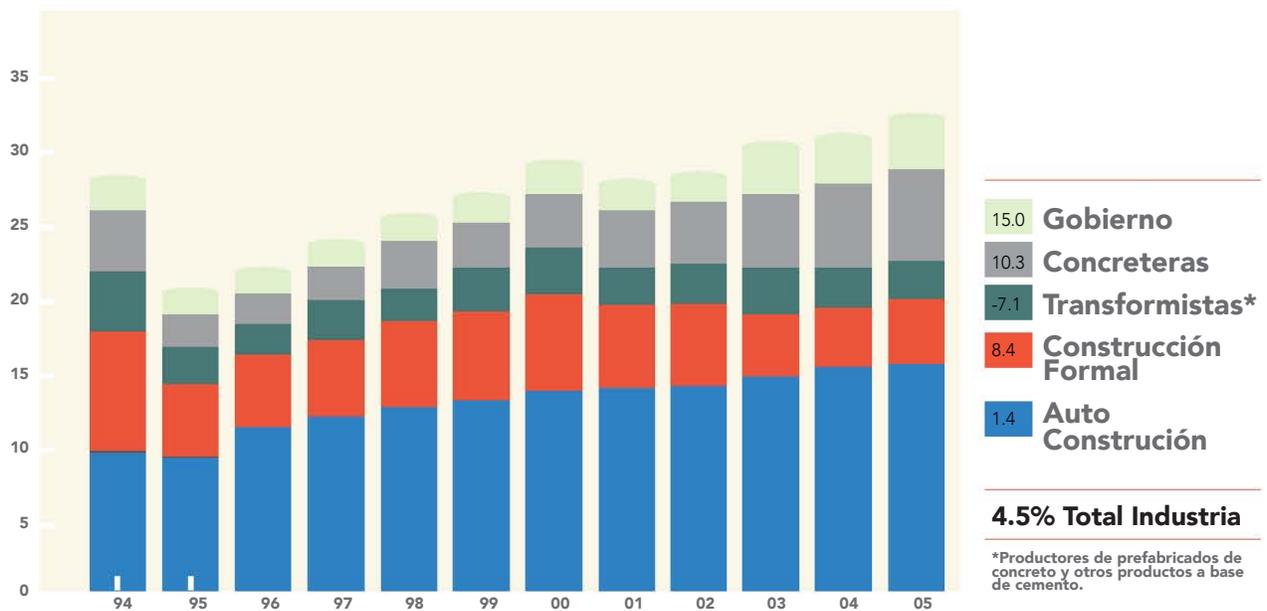


Figura 5. Cámara Nacional del Cemento. Fecha de consulta septiembre de 2014. <http://www.canacem.org.mx/canacem.htm>.

La producción de cemento consume grandes cantidades de energía; los largos tiempos de retención y las altas temperaturas propician una disposición de materiales no reciclables. Y para

satisfacer esta exigencia del mercado la industria cementera también involucra altos requerimientos de energía utilizando el equivalente de 60 a 130 kilogramos de combustible y 110 Kwh de

electricidad para producir una tonelada de cemento (World Business Council for Sustainable Development, 2002)<sup>[17]</sup>.

Durante la fabricación del cemento en ambos procesos (seco ó húmedo) se generan 84 toneladas métricas por año de partículas de materia y 3279 toneladas métricas por año de emisión de gases, siendo los más importantes el óxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbón (CO), dioxinas de sulfuro (SO<sub>2</sub>) y compuestos de emisión orgánica volátil (VOC) dependiendo del tipo de combustible y el proceso empleado. Estos componentes provocan el deterioro de la salud de la población además contribuyen al efecto invernadero (Farias, 1998)<sup>[18]</sup>.

Por otra parte la extracción de piedra caliza, materia prima requerida para la producción de cemento, puede tener impactos locales significativos sobre la tierra y las comunidades vecinas a las canteras, polvo, ruido y tráfico

son consecuencias inevitables de los trabajos de extracción.

Aunado a la sobre explotación de los yacimientos de las minas, el agua no se queda atrás al considerarse un problema clave de la sostenibilidad. Hoy, el concepto de la escasez del agua se comprende mejor; conservación del agua, huella hídrica y gestión del agua están ganando un espacio cada vez mayor en las agendas de sostenibilidad de las empresas generadoras de cemento, como un recurso finito que requiere de un cuidadoso manejo.

Por lo tanto el consumo de agua para generar pastas, morteros o concretos es demandante, de esta manera también se busca que los nuevos materiales cementantes disminuyan el consumo del agua, haciendo mas efectivo el material y así contribuyendo al no deterioro del ambiente y disminuyendo su impacto ambiental a futuro.

---

<sup>17</sup>. World Business Council for Sustainable Development (2002). Toward a sustainable cement industry. Pág. 1

<sup>18</sup>. Farías Ramón,(1998). Contaminantes, Quemando Nuestra Salud: La Incineración de Residuos Peligrosos en Hornos de Cemento, Conferencia dada en la Fundación para la Ciencia México- Estados Unidos, Monterrey.

## 1.3 Justificación

Los tiempos modernos demandan que la producción de cemento y de algunos aditivos químicos se efectúen con el consumo mínimo de energía y que sus subproductos no sean agresivos al medio ambiente. Sin embargo, en México estos aditivos son importados y su alto costo los hace antieconómicos para su uso de rutina en nuestro medio.

Por estas características, en la actualidad es necesario sustituir los aditivos químicos producidos sintéticamente por aditivos naturales, con el objeto de minimizar los contaminantes y costos de producción. Una opción es utilizar fosfatos y/o silicatos naturales, como lo es el Fosfato Tricálcico, el cual puede contribuir a mejorar las propiedades del concreto en su proceso de endurecimiento.

Además, al disminuir la cantidad de cemento portland que se consume para elaborar concreto, se disminuye el consumo de energía utilizada en la fabricación de este material, y las emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) a la atmósfera se reducirán, haciendo un proceso de fabricación de bajo impacto al medio ambiente.

Este tema de investigación planteado aporta desarrollos tecnológicos con implicaciones importantes en la industria de la construcción, en particular, se podría conseguir ahorro de materiales y de energía en el desarrollo de obras civiles, al desarrollar investigaciones en pastas de cemento con mejores comportamientos mecánicos, y comenzar con el estudio de cementos que proporcionen mejores condiciones a morteros y concretos.

El desarrollo de esta investigación permite la interacción de especialistas en diferentes campos del conocimiento y en consecuencia una formación más integral de profesionales de la Arquitectura.

Otro aspecto importante de este trabajo es que de los materiales utilizados para elaborar concreto (cemento, arena, grava y agua), el cemento es el de mayor costo en comparación con el resto de materiales involucrados en la mezcla de concreto. De modo que una reducción de cemento, sustituyendo una parte por otro material de menor costo, contribuye a mejorar la competitividad del mismo como material de construcción y en un futuro disminuir las secciones de un sistema estructural permitiéndole al arquitecto un mejor diseño arquitectónico.

La realización para caracterizar nuevas adiciones al cemento tratando de correlacionar las propiedades físico-químicas con las propiedades mecánicas,

así como implementar el uso de aditivos naturales para disminuir el consumo de cemento en la construcción es parte importante de este proyecto.

## 1.4 Origen del Proyecto

En la investigación que se realizó durante la tesis de maestría con el tema "*Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas Sub-micrométricas de Fosfato Tricálcico (TCP)*", se encontró que la resistencia máxima a la fractura de los cementos

tipo Portland, se puede incrementar por arriba del 10% con respecto al cemento sin aditivos, añadiendo partículas sub-micrométricas de TCP grado reactivo de laboratorio mezclado con agua desionizada.

### Las principales conclusiones fueron:

El Cemento Portland mejora su resistencia mecánica a la fractura al agregarle partículas submicrométricas de Fosfato Tricálcico.

Esto se detecto tanto en las pruebas de compresión como en las de flexión en tres puntos.

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 adición en peso de TCP en el endurecimiento del cemento alcanza su máximo cuando se le agrega alrededor del 1%; valores superiores a este, disminuyen incluso el nivel de 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 (37 días de envejecimiento), la brecha se reduce hasta 15%.

Se establece como recomendación en esta investigación, hacer un estudio más detallado de la microestructura

inicial que da lugar a los niveles de endurecimiento iniciales, para retenerlos de manera controlada y poder fabricar cementos con diferentes niveles de resistencia mecánica para aplicaciones múltiples.

Al comparar el caso de cementos endurecidos con otros aditivos como nanopartículas de sílice<sup>[19]</sup>, se encontraron que nuestros resultados son muy similares, sin embargo, para hacer la comparación correcta con esos resultados, se tendrían que repetir nuestros experimentos de Cemento-TCP empleando también arena como consolidante, tal como se hizo en esa investigación.

En esta etapa de la investigación (Tesis de Maestría), los experimentos siguieron protocolos más cercanos al área de Ciencia e Ingeniería de Materiales, por lo que usamos aditivos grado reactivo de laboratorio, lo que haría prohibitivo económicamente la aplicación de los resultados obtenidos en áreas de la construcción.

En la siguiente etapa (Tesis de Doctorado) además de los aspectos básicos relacionados con los mecanismos de endurecimiento del Cemento-TCP 1%, exploraremos la viabilidad económica de su aplicación en la industria de la construcción al emplear TCP de origen natural y agua potable de la red.

---

<sup>19</sup>. "Revisión, Análisis y Aplicación de la Nanotecnología en la Generación y Mejora de Materiales Constructivos. Estudio de Morteros de Cemento con Adiciones de Nanosílice", LUIS ENRIQUE CARCAMO PÉREZ, Valdivia-Chile, 2006.

Las metas académicas alcanzadas durante la realización de la Tesis de Maestría, así como la experiencia permitió una aproximación altamente constructiva entre dos áreas académicas generalmente ajenas, como lo son la Arquitectura y la Ciencia e Ingeniería de Materiales. De esta aproximación, se puede establecer que el beneficio de la investigación básica en la Arquitectura, cuando se tratan temas de construcción, específicamente, refiriéndose al área de la Nanotecnología aplicada al diseño

de nuevos cementos para aplicaciones arquitectónicas.

En la segunda etapa de este proyecto de investigación, se investigará acerca de los posibles micro-mecanismos que dan lugar a los procesos de endurecimiento de Cementos tipo Portland cuando se les adiciona partículas submicrométricas de TCP mineral y/o desilicatos de origen natural (Wollastonita). Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física, UNAM.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1. General

---

Investigar el posible empleo de materiales de origen natural; fosfato tricálcico (TCP) y wollastonita, para mejorar las propiedades mecánicas de cementos portland ordinarios mezclados con agua potable de la red.

### 1.5.2.Particulares

---

Identificar las fases que se generan en las diferentes etapas de endurecimiento de las pastas de cemento después de la incorporación del TCP y la Wollastonita en forma de partículas sub-micrométricas, mediante el empleo de microscopía óptica y electrónica de barrido, difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía infrarroja (FTIR).

Analizar si por medio del empleo de estos aditivos de menor costo, se pueden buscar alternativas económicas para mejorar la resistencia mecánica del cemento disminuyendo así su consumo en la construcción.

## 1.6 Hipótesis

La incorporación de partículas sub-micrométricas de Fosfato Tricálcico (TCP;  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) y Wollastonita (silicato de calcio;  $\text{CaSiO}_3$ ) de origen natural, incrementa la resistencia mecánica a la compresión de cemento tipo portland mezclado con agua potable de la red.

# II. Marco Conceptual

---

## 2.1 Cemento

El cemento es la materia principal en la elaboración del concreto. La palabra cemento deriva del latín "caementum", porque los romanos llamaban opus caementitum (obra cementicia) a la grava y a diversos materiales parecidos al concreto que usaban en sus morteros, aunque no eran la sustancia que los unía.

El cemento es un material con propiedades de adhesión y cohesión, brindándole la capacidad de poder aglutinar fragmentos de origen mineral

para formar un elemento rígido (piedra). Para fabricar cemento pueden utilizarse tanto minerales de origen natural como productos industriales. La norma ASTM 150 define al cemento Portland como un cemento hidráulico producido al pulverizar al clinker (con un tamaño de grano aproximado de 5 a 25 mm), material sintetizado debido a la mezcla de materiales de una composición predeterminada esencialmente en silicatos de calcio; además de sulfato de calcio como una adición en la

molienda. Las materias primas, objetos de prospección, para la fabricación del cemento son esencialmente la caliza y las arcillas, ambas rocas sedimentarias.

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente dividido que, mezclado con agua, forma una pasta que fragua (cambia de estado líquido a sólido) y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación, para conservar

una resistencia determinada. El cemento se forma a partir de caliza, alúmina y óxido de hierro, estos al quemarse a una temperatura de 1400°C, forman el clinker y su diferencia en proporciones hacen los diferentes tipos de Cemento Portland. (Ver figura 6)

Éste se produce esencialmente mezclando agregados pétreos con agua y cemento. El agregado pétreo, que consiste de partículas grandes y



Figura 6. Esquema representativo del proceso las materias primas que se requieren para obtener cemento portland.

finas (arena y grava), puede constituir hasta tres cuartas partes del volumen del concreto. El resto del volumen está formado por la pasta de cemento hidratada, que se obtiene por reacción del agua con el cemento, y cavidades que contienen aire. Al concreto se le puede considerar como un material compuesto, ya que la pasta de cemento es la matriz y el agregado es el material de relleno. Las propiedades mecánicas y físicas del concreto dependen de la mezcla (cemento, arena, grava, agua y aditivos) así como del tiempo y temperatura de curado (Metha, 1998).<sup>[20]</sup>

La adherencia entre el agregado y la pasta de cemento es un factor importante para la resistencia del concreto, debido a la rugosidad de la superficie del primero, a su composición mineralógica, a las condiciones electrostáticas de la superficie de la partícula. La porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción influyen en las propiedades de los agregados tales como la adherencia

entre éste y la pasta de cemento hidratada (Neville, 1999)<sup>IDEM 4</sup>.

Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto se denominan cementos hidráulicos. El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conservará su resistencia y estabilidad (NMX-C-414-ONNCCE).

El concreto es el material estructural fabricado por el hombre más empleado en la construcción y factor de diseño en la arquitectura, ya que cuando se bosqueja un proyecto arquitectónico se deben considerar secciones y un sistema constructivo a emplear, para el cual en el mayor de los casos el arquitecto propone el material.

---

<sup>20</sup>. Metha Kumar, Monteiro Paulo. (1998). Estructura, propiedades y materiales, México, IMCYC.

## 2.2 Producción del Cemento

El cemento portland se produce por la pulverización del clinker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidratados. Este también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clinker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento portland debe contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Durante la fabricación, se hace el análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

Las materias primas extraídas de las canteras se transportan, se trituran, se

muelen y se dosifican de tal manera que el polvo resultante tenga la composición deseada. El polvo crudo es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), así como caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), arcilla, ceniza volante o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso de vía húmeda los materiales se mezclan con agua en forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares. En la figura 7 se ilustra los desarrollos tecnológicos importantes, en los cuales pueden mejorar considerablemente la productividad y la eficiencia energética de las plantas con proceso seco.

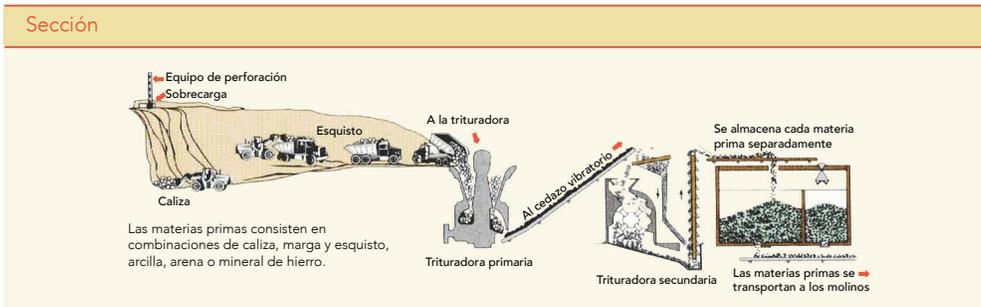


Figura 1 La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5<sup>1/4</sup> pulg.) y después a un tamaño de 20mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarlo.

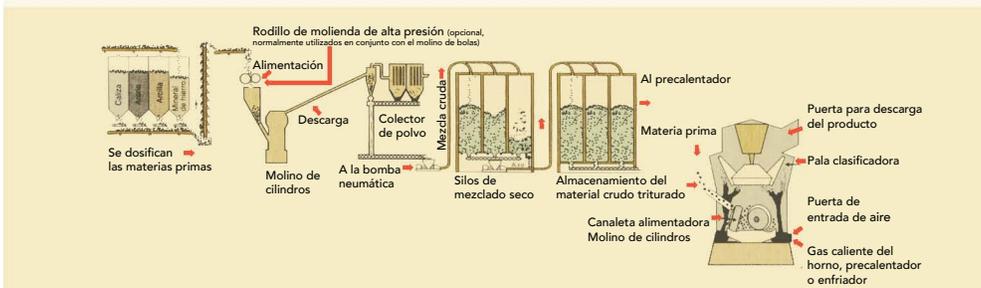


Figura 2 Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.

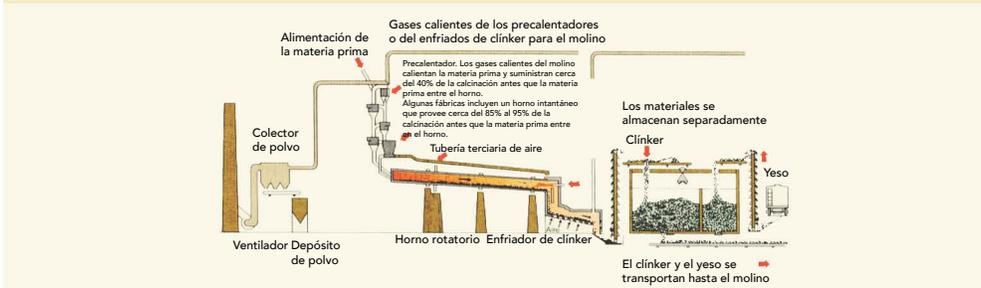


Figura 3 La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.

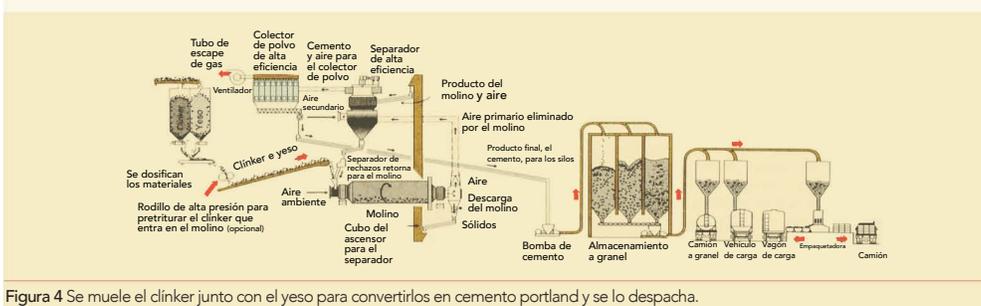


Figura 4 Se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Figura 7. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco. Extraído con fines didácticos de Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno (Fig. 8). El polvo crudo pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible empleado (carbón, aceite nuevo o reciclado, gasolina, gas natural, llantas de goma y subproductos) se introducen hacia la parte inferior del

horno donde por medio de estos materiales se alcanza temperaturas de  $1400^{\circ}\text{C}$  a  $1550^{\circ}\text{C}$ , debido a esto cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de canicas (Fig. 9). La figura 10 muestra el proceso de producción del clínker desde la alimentación de la materia prima hasta el producto final

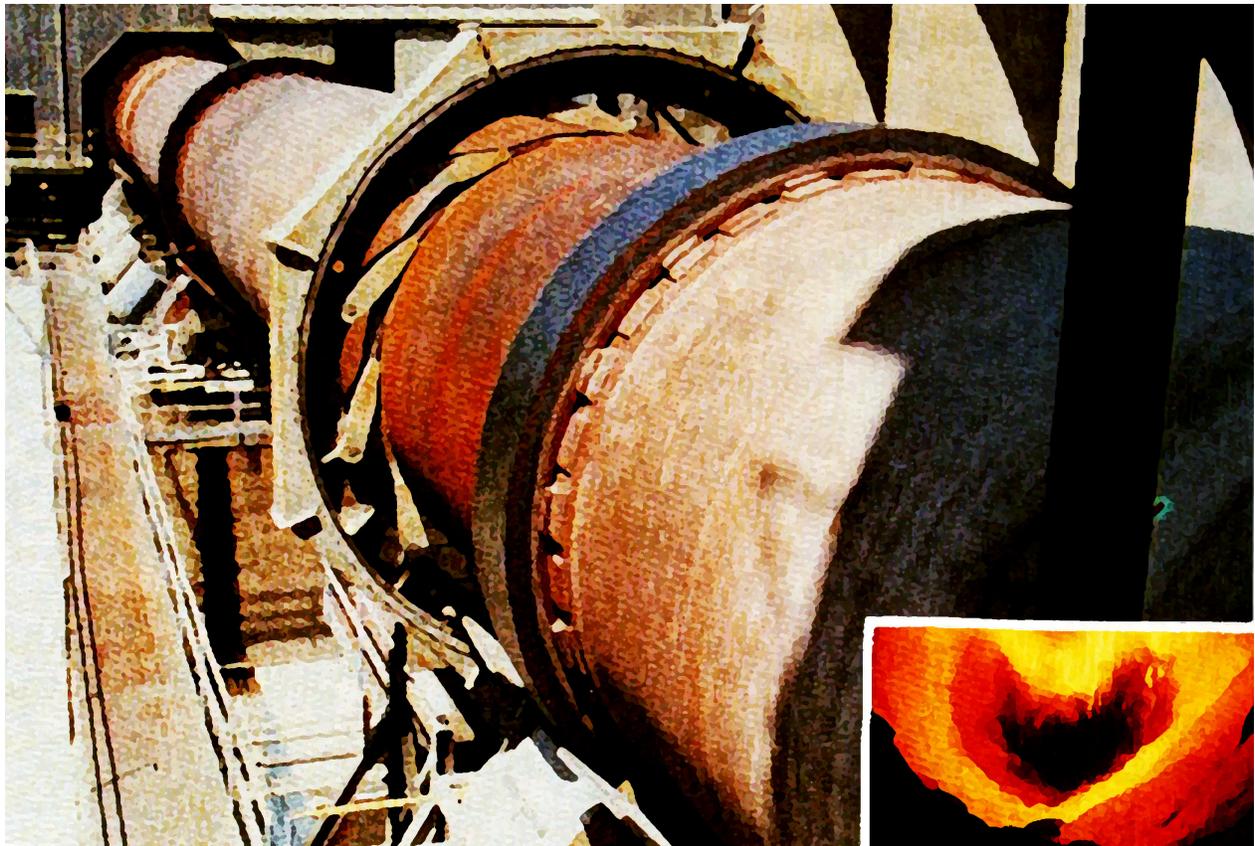


Figura 8. Horno Rotatorio para la manufactura del clínker de cemento. La imagen inferior derecha muestra una vista interior del horno. Extraído con fines didácticos de Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

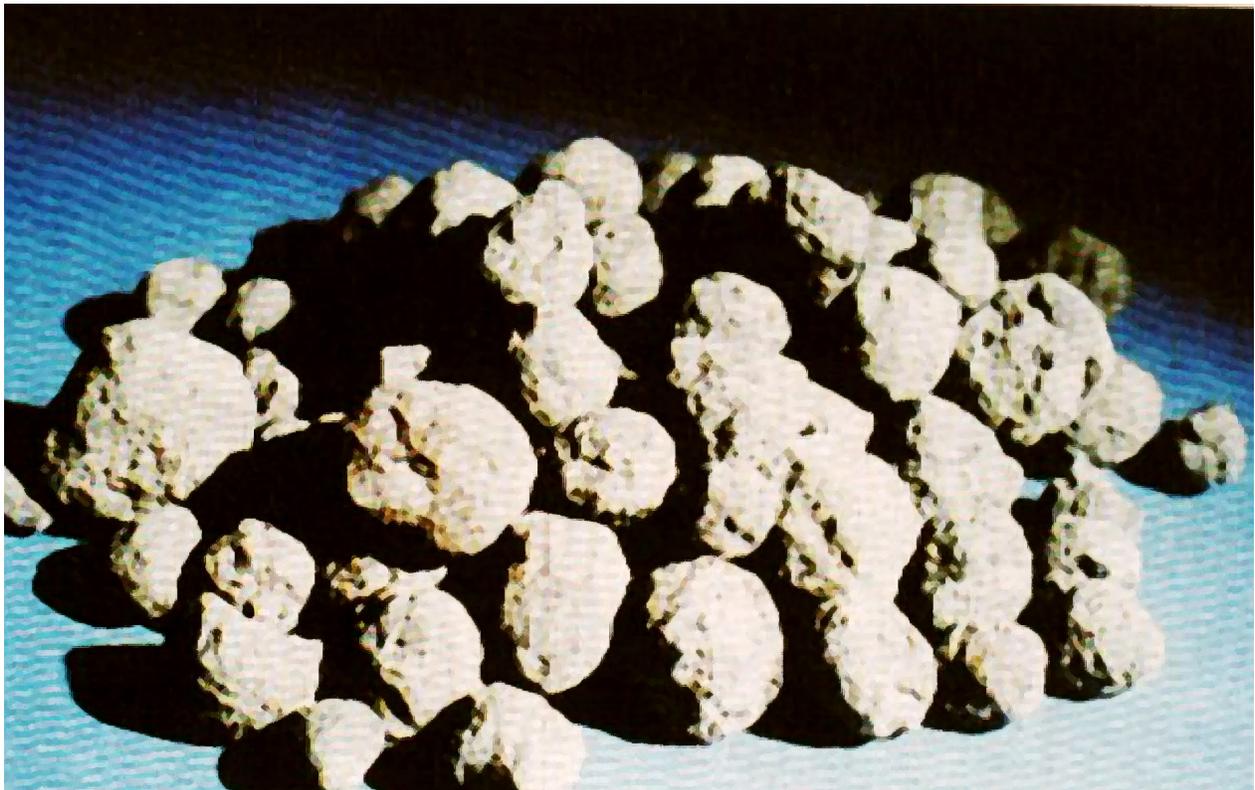


Figura 9. El clinker de cemento portland se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice. Este clinker en específico tiene un diámetro de 20mm. (3/4 pulg). Extraído con fines didácticos de Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

Sección	Vista del horno	Proceso de nodulización	Reacción de clinkerización
A 700°C Las materias primas son un polvo de flujo libre		Las partículas son sólidas.  No hay reacción entre las partículas.	Hay pérdida de agua.  La arcilla deshidratada se recrystaliza.
A 700-900°C El polvo aun fluye libremente		Las partículas aun son sólidas.	A medida que la calcinación continua, la cal libre aumenta. La sílice reactiva combina con el CaO para empezar a formar C2S. La calcinación mantiene la temperatura de alimentación en 850°C.
1150-1200°C Las partículas empiezan a ser "pegajosas"		Las reacciones empiezan entre las partículas sólidas.	Cuando la calcinación termina, la temperatura se eleva rápidamente.  Los cristales pequeños de belita se forman por la combinación de silicatos con CaO.
1200-1350°C Las partículas comienzan a aglomerarse, ellas se mantienen juntas por el líquido. La rotación del horno empiezan la cocción de los aglomerantes.		Las fuerzas capilares del líquido mantienen las partículas juntas.	La fase líquida se forma cuando la temperatura excede 1250°C.  El líquido permite la reacción entre la belita y el CaO libre, formando alita.
1350-1450°C La aglomeración de las partículas continua a medida que el material cae encima uno del otro.		Si hay líquido suficiente, se forman nódulos.  La insuficiencia de líquido producirá un clinker polvoriento.	La cantidad de cristales de belita disminuye y su tamaño aumenta.  El tamaño y la cantidad de alita aumentan.
Enfriamiento.		Los nódulos de clinker no cambian durante el enfriamiento	Bajo el enfriamiento, el C <sub>3</sub> A y el C <sub>4</sub> AF se cristalizan en la fase líquida.  La estructura lamilar aparece en los cristales de belita.

Figura 10. Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final. Extraído con fines didácticos de Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

Posteriormente, el clinker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso (Fig. 11) para controlar el tiempo de fraguado en la mezcla del cemento (retardar el fraguado) y para que se mejoren las propiedades de contracción

(retracción) y el desarrollo de resistencia (Lerch 1946 y Tang 1992)<sup>[21 y 22]</sup>. En el molino, el clinker se muele tan fino que puede pasar, casi completamente, a través de un tamiz (malla) de 45 micrómetros (malla No.325) este polvo gris extremadamente fino es el cemento portland.



Figura 11. Yeso, la fuente del sulfato, se muele juntamente con el clinker para formar el cemento portland . El yeso ayuda a controlar el tiempo de fraguado, las propiedades de contracción (retracción) por secado. Extraído con fines didácticos de Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

<sup>21</sup>. Lerch, William, *The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes*, Research Department Bulletin RX012, Portland Cement Association, [http://www.prtcement.org/pdf\\_files/RX012.pdf](http://www.prtcement.org/pdf_files/RX012.pdf), 1946.

<sup>22</sup>. Tang, Fulvio J., *Optimization of Sulfate Form and Content*, Research Department Bulletin RD105, Portland Cement Association, 1992

En la Figura 7 se representa esquemáticamente el proceso de la fabricación del cemento, en la actualidad el método de fabricación depende de la dureza de la materia prima empleada y de su contenido de humedad. La mezcla y trituración de las materias primas pueden efectuarse en condiciones húmedas y secas. Las consideraciones iniciales en el proceso húmedo consisten

en el empleo de la marga (mezcla de materiales calcáreos y arcillosos) triturada y dispersada en agua en un molino de lavado, el cual es un pozo circular con brazos revolventes, en cambio en el proceso seco o semiseco, el material es triturado adicionándose en proporciones en un molino de mezclado donde se secan y se reduce su tamaño a un polvo fino.

## 2.3 Hidratación del cemento

La composición teórica de los compuestos del cemento Portland o fases minerales se puede estimar a través de las ecuaciones de Bogue. Dichas ecuaciones están incluidas en norma ASTM C 150 y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clinker, han avanzado hasta su equilibrio termodinámico. (Mehta y Monteiro, 1998).<sup>IDEM 20</sup>

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción,

llamada "hidratación", el cemento se combina con agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca (Kosmatka, 1992)<sup>[23]</sup>. La reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se produce en una pasta de cemento, que está compuesta por agua, polvo de cemento y aire atrapado o incluido. La propiedad de "adhesión o pegamento" de las pastas de cemento Portland se debe a la reacción química entre el polvo de cemento y el agua, llamada "hidratación".

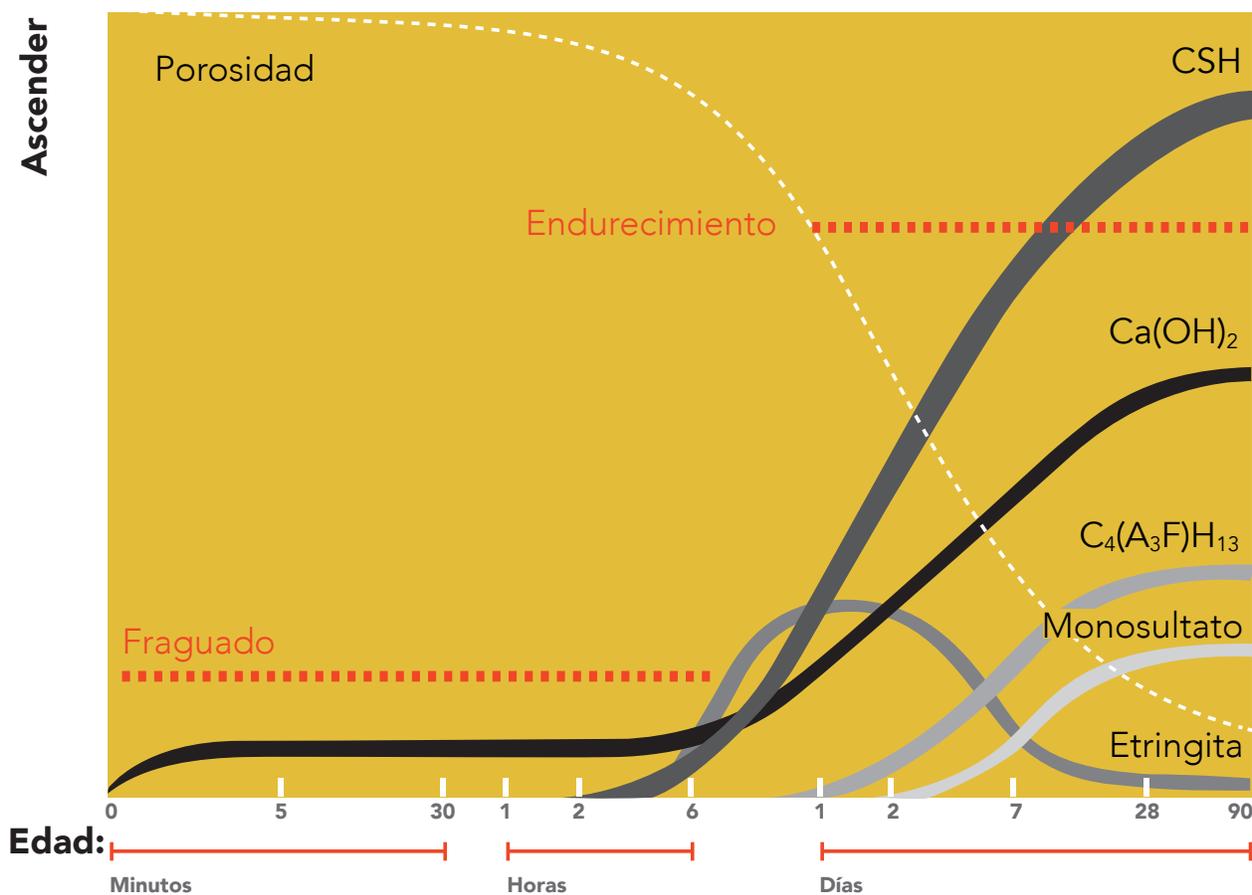
---

<sup>23</sup>. Kosmatka, Steven H., *Portland Blended and Other Hydraulic Cements*, IS004, Portland Cement Association, 2001.

<sup>24</sup>. 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>

En la figura 12 se puede apreciar, el proceso de hidratación el cual consiste en 2 etapas, Fraguado y Endurecimiento, el fraguado se refiere al fenómeno en que la pasta del cemento cambia de un estado plástico a sólido, mientras que

en el endurecimiento la pasta adquiere resistencia y da inicio a la formación de compuestos químicos. La presente investigación se enfoca a esta segunda etapa.



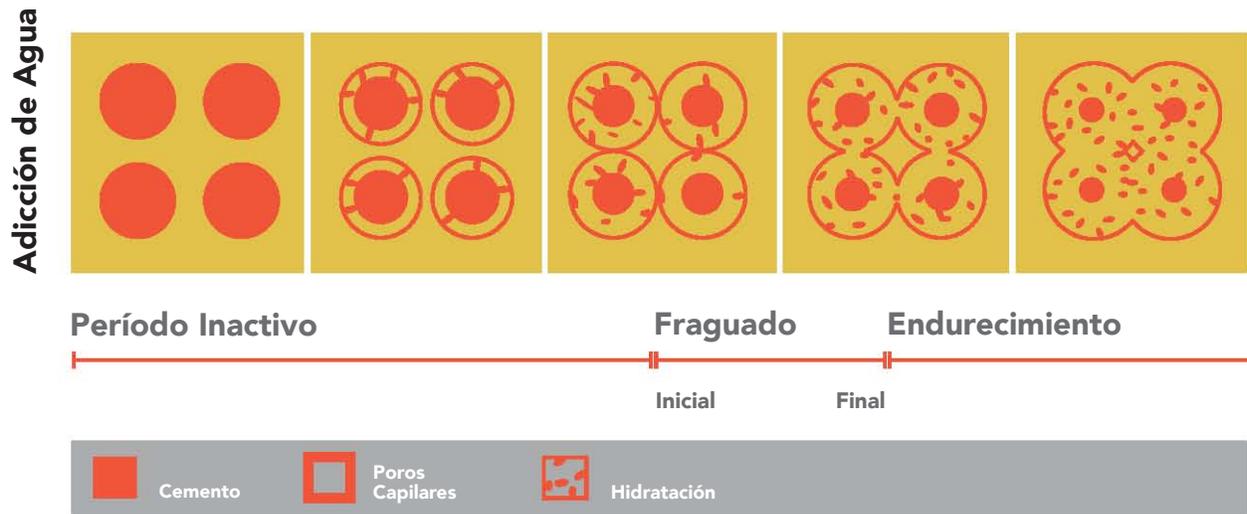


Figura 12. Descripción esquemática de los productos de reacción y la microestructura que se desarrolla durante la hidratación.<sup>[24]</sup>

En presencia del agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta de cemento endurecida. Los silicatos de calcio,  $C_3S$  (silicato tricálcico) y  $C_2S$  (silicato dicálcico), que constituyen cerca del 75% del peso del cemento, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio (portlandita) e hidrato de silicato de calcio (gel de CSH; silicato de calcio hidratado). La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente a este gel. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto.

Las cuatro fases sólidas principales, presentes generalmente en una pasta de cemento hidratado son los siguientes (Mehta, 1998)<sup>DEM 20</sup>:

Silicato de Calcio Hidratado. La fase de silicato de calcio hidratado CSH, representa de 50 a 60 % del volumen de sólidos en una pasta de cemento. La resistencia del material es atribuida principalmente a las fuerzas de Van der Waals.

Hidróxido de calcio. Los cristales de hidróxidos de calcio llamados también portlandita constituyen de 20 al 25% de los sólidos en la pasta hidratada.

Sulfoaluminatos de calcio. Ocupan de 15 a 20% del volumen de los sólidos en la pasta hidratada y juegan por lo tanto solamente un papel menor en las relaciones estructura –propiedades.

Granos de clinker no hidratados. Dependiendo de la distribución de

partículas del cemento anhidrido, estos pueden encontrarse en la microestructura de las pastas de cemento hidratadas, a un tiempo largo después de la hidratación, y las partículas de clinker se hallan en el rango de 1 a 50  $\mu\text{m}$ .

El cemento portland esta definido por la norma ASTM C150 como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el clinker que consiste esencialmente de silicatos de calcio, conjuntamente con una o más formas de sulfato de calcio. Los principales óxidos

presentes en la materia prima son  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Dentro de la química del cemento se ha acostumbrado expresar los óxidos y los compuestos principales del clinker utilizando las siguientes nomenclaturas:

Tabla 1 Compuestos principales del Cemento Portland		
Nombre	Oxido	Abreviatura
Calcio	Ca	C
Óxido de Silicio	$\text{SiO}_2$	S
Óxido de Aluminio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	A
Óxido de Hierro	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F
Óxido de Magnesio	MgO	M
Óxido de Azufre	$\text{SO}_3$	S
Agua	$\text{H}_2\text{O}$	H

La composición teórica o potencial de los compuestos del cemento portland o fases minerales pueden estimarse a través de la ecuaciones de Bogue, dichas ecuaciones están incluidas en norma ASTM C 150 y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clinker han avanzado hasta su equilibrio termodinámico.

El fraguado y el endurecimiento del cemento portland ocurre como un resultado de la reacción de hidratación entre los compuestos del clinker y el agua, la cual genera calor que es conocido como calor de hidratación. Estas reacciones se producen a diferentes tasas de velocidad y están influenciadas unas con otras.

**Las fases del cemento portland que participan en el proceso de hidratación son:**

**Aiita.** Solución sólida de silicato tricálcico ( $C_3S$ ).

**Oxido** de calcio libre ( $CaO$ ). Sulfatos alcalinos

**Belita.** Solución sólida de silicato dicálcico ( $C_2S$ ).

Agua de mezclado

Solución sólida de **aluminato tricálcico** ( $C_3A$ ).

**Ferrita.** Ferro aluminato de calcio ( $C_4AF$ ).

**Tabla 2 Compuestos principales del Cemento Portland Hidratado**

Nombre del Compuesto	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Silicato Dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Aluminato Tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
Aluminoferrita Tetracálcica	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$
Hidróxido de Calcio (Portlandita)	$Ca(OH)_2$	CH
Etringita	$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$	$C_4A_3S$
Tobermorita	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	$C_3S_2H_3$
Sulfato de Calcio (Yeso)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CSH_2$

El  $C_3S$  y  $C_2S$  son dos fases de silicatos cristalinos, teniendo a las fases  $C_3A$  y  $C_4AF$  como fases intersticiales, así mismo se tienen algunas impurezas como la periclasa ( $MgO$ ), cal viva ( $CaO$ ) y sulfatos alcalinos ( $Na_2SO_4$  y  $K_2SO_4$ ).

Es importante mencionar que las diversas etapas de producción del clinker tienen un papel determinante en la reactividad del material, ya que por ejemplo la viscosidad de la fase intersticial en la zona de sinterización define la dispersión del  $C_3S$  y  $C_2S$  y/o las concentraciones de ellos en alguna área específica del clinker.

La **alita** es la fase principal y más importante del cemento portland, ya que controla el fraguado y el endurecimiento. Su hidratación es rápida pero varía en función de la cantidad de iones en solución que contenga.

La **belita** puede existir en cinco formas estructurales diferentes, la forma más importante en la química del cemento es la  $\beta$ - $C_2S$  se hidrata mucho más lentamente que la alita.

Tanto la alita como la belita producen los mismos tipos de **silicatos de calcio hidratados** (CSH) y son las principales fases generadoras de la portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), la cual es la base de la reacción puzolánica.

El  $C_3A$  es la fase que genera mayor calor de hidratación y ésta depende también de la cantidad y calidad de los iones alcalinos que se encuentran en su estructura. La hidratación de ésta fase es

también afectada por la disolución de los sulfatos presentes.

El  $C_4AF$  forma productos similares a aquellos del  $C_3A$ , donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado.

El sulfato de calcio (yeso) es añadido al cemento portland para controlar el tiempo de fraguado, para mantener una estabilidad volumétrica y en una proporción adecuada para desarrollar en la pasta de cemento portland la máxima resistencia mecánica a la compresión.

El  $C_3A$  en la presencia de sulfato de calcio se transforma en etringita ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ). La primera capa de **etringita** al parecer precipita en la superficie del grano de  $C_3A$  y será un obstáculo impermeable para evitar la hidratación adicional del mismo, sin embargo, en el avance de la hidratación, la etringita puede ser transportada y colocada fuera de la partícula de  $C_3A$ , haciendo que se pierda consistencia de la pasta de cemento.

Por otro lado la cantidad máxima permitida de sulfato en el concreto depende de muchos factores, incluyendo el contenido de  $C_3A$ , la temperatura de curado, el tamaño de las partículas del yeso y la presencia de cloruros en la mezcla, si se excede esta cantidad, la generación de etringita puede causar expansión y agrietamientos en el concreto.

## 2.4 Propiedades físicas del cemento

Las especificaciones de cemento presentan límites para las propiedades físicas y para la composición química. La comprensión de la importancia de las propiedades físicas es útil para la interpretación de los resultados de los ensayos (pruebas) de los cementos. Los ensayos de las propiedades físicas de los cementos se deben utilizar para la evaluación de las propiedades

del cemento y no del concreto. Las especificaciones del cemento limitan las propiedades de acuerdo con el tipo de cemento. Durante la fabricación, se monitorean continuamente la química y las propiedades como: tamaño de las partículas y finura, constancia de volumen, consistencia, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, calor de hidratación, análisis térmico.

### Tipos de Cemento Portland

---

Los procesos de fabricación de cemento aseguran la calidad del producto final siendo resultado de controlar los estándares especificados durante la manufacturación; en México la normatividad vigente para la

producción de los diferentes tipos de cemento hidráulico y sus características comerciales se identifican en la Tabla 3 con base en la norma NMX- C414-ONNCCE.

Tabla 3 Clasificación del cemento Pórtland							
Cemento		Componentes Principales (% en masa)					Características
Tipo	Denominación	Clinker+ Sulfato de calcio	Puzolana	Escoria granulada de Alto horno	Humo de Sílice	Caliza	
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95-100	—	—	—	—	Provee velocidad de endurecimiento moderado.
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	50-94	6-50				Reduce calor de hidratación. Se producen reacciones por incorporación de Puzolanas.
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	—	6-60	—	—	Baja reactividad álcali- agregado.
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	Alta resistencia química y menor desprendimiento de calor.
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	90-99	—	—	1-10		Resistente a suelos salinos y ambientes químicamente agresivos.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	—	61-80	—	—	Baja resistencia inicial y alta en edades tardías.

Fuente: NMX-C414-ONNCCE

En la Tabla 4 se identifican las especificaciones físicas con base a la clase de resistencia a la compresión, tiempo de

fraguado y el tipo de cemento manejado en la norma NMX-C- 062-ONNCE y la norma NMX-C414-ONNCE.

Tabla 4 Especificaciones y tolerancias de cementos hidráulicos							
Tipo	Denominación	Clase de resistencia	Resistencia a compresión			Tiempo de fraguado	
			3 días	28 días	365 días	Inicial	Final
			Mínimo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	—	20	40	45	600
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	—	30	50	45	600
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	20	30	50	45	600
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	—	40	—	45	600
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40	—	40	—	45	600
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	40R	30	40	—	45	600

Fuente: Normas NMX-C414-ONNCE, NMX-C-062-ONNCE

## Cementos en México

---

Los cementos en México se especifican según la norma MX-C-414-ONNCCE. De acuerdo con esta norma, hay seis tipos básicos de cementos:

CPO. Cemento portland ordinario, el cual puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza.

CPP. Cemento portland puzolánico, que posee del 6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total de cemento.

CPEG. Cemento portland compuesto, se compone de clínker, yeso y dos o mas adiciones. Las adiciones pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35% de caliza. Independientemente del tipo y cantidad de material adicionado,

la cantidad de clínker y yeso debe ser del 50% al 94%.

CPS. Cemento portland con humo de sílice, que recibe del 1% al 10% de humo de sílice.

CEG. Cemento con escoria de alto horno, el cual tiene una cantidad de escoria que varía del 61% al 80%.

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, abreviaturas tales como RS – resistente a sulfatos; BRA – baja reactividad álcali-agregado; BCH – bajo calor de hidratación; B – blanco.

Los cementos aún se dividen en clases de resistencia; 20, 30, 40, las cuales designan resistencias a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa (mega pascales), 30MPa y 40 MPa (300 Kg/cm<sup>2</sup>, 400 Kg/cm<sup>2</sup>).

## Agua para la Mezcla en cementos

---

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se le puede usar como agua de mezcla (de mezclado, de amasado) para la preparación del concreto. Sin embargo, también se puede emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables.

Se puede emplear agua dudosa en concreto, pero se debe verificar su desempeño. Por ejemplo, se aconseja que los cubos de mortero (ASTM C 109) preparados con agua dudosa tengan la resistencia a los 7 días igual o por lo menos 90% de la resistencia de los especímenes de referencia preparados con agua potable o agua destilada. Además se debe garantizar a través de ensayos el tiempo de fraguado que las impurezas en el agua de la mezcla no van

a disminuir o aumentar adversamente el tiempo de fraguado del cemento. Las normas ASTM C94 presentan criterios de aceptación para el agua que será usada en el concreto.

El exceso de impurezas en el agua de la mezcla no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y las resistencias del concreto, sino también puede causar eflorescencias<sup>[25]</sup>, manchas, corrosión del refuerzo, inestabilidad de volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden establecer ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, y sólidos en el agua de la mezcla. Algunas impurezas pueden tener un pequeño efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado y aun afectar la durabilidad y otras propiedades.

---

<sup>25</sup>. Se denomina eflorescencia a los cristales de sales, generalmente de color blanco que se depositan en la superficie de ladrillos, tejas y pisos cerámicos o de cemento. Algunas sales solubles en agua pueden ser transportadas por capilaridad a través de los materiales porosos y ser depositados en su superficie cuando se evapora el agua por efecto de los rayos solares y/o del aire. Haciendose notar por cambios de color, apariencia o textura.

# III. Procedimiento Experimental

---

En el presente capítulo se describe el procedimiento experimental que se siguió en la investigación.

En lo que respecta a las pruebas mecánicas, se retoma el procedimiento empleado en la Tesis de Maestría; *“Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas Submicrométricas”*<sup>[26]</sup>, esto con el fin de mantener la metodología empleada y así poder comparar la resistencia mecánica

inducida por aditivos grado reactivo y por aditivos naturales.

Además se describen otro tipo de análisis físicoquímicos que se emplearon para caracterizar la composición y microestructura de los cementos en las diferentes etapas de endurecimiento. Para esto se emplearon técnicas espectroscópicas como lo son Difracción de Rayos X en polvos de cemento y Espectroscopía Infrarroja.

---

<sup>26</sup>. Muciño Vélez Alberto., Tesis para obtener el Título de Maestro en Arquitectura, Titulada “CONCRETO NANOTECNOLÓGICO”, Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas submicrométricas, México D.F. 2010.

La caracterización mecánica del cemento con y sin aditivos, se hizo a partir ensayos de deformación en compresión y de

flexión en tres puntos. En todos los casos el parámetro que se midió fue el esfuerzo máximo a la fractura.

La secuencia de actividades realizadas fue la siguiente:

Fabricación de probetas con Cemento tipo Portland sin aditivos; Cemento Base (CB).

Fabricación de los cementos con adición de partículas submicrométricas.

TCP Natural (Fosfato Tricálcico, COMPLEMENTO ALIMENTICIO).

posteriormente sometido a papel filtro de 8 micras.

TCP tamizado, para reducir el tamaño de partícula.

Wolastonita ( $\beta$  -  $\text{CaSiO}_3$ ).

TCP sometido a molienda mecánica.

Wolastonita sometido a molienda mecánica.

TCP sometido a molienda mecánica y

Hidroxiapatita Grado Reactivo.

Fabricación de probetas de cemento con aditivo para pruebas mecánicas; Cemento TCP (C-TCP).

Caracterización de la microestructura con microscopia electrónica de barrido SEM.

Realización de pruebas de Compresión y Flexión en Tres Puntos.

Determinación de las fases cristalinas presentes por difracción de Rayos X, y Espectroscopia Infrarroja.

# 3.1 Materiales Empleados

## Cemento

---

En este trabajo se empleó Cemento Portland Tipo II Modificado CPO 30-R, satisface ampliamente las especificaciones de la Norma Mexicana NMX C-414-ONNCCE y de la Norma Norteamericana ASTM C-150, por lo que se le emplea en todo tipo de obras, desde la autoconstrucción hasta aquellas donde se requiere de ingeniería y arquitectura sofisticada; por ejemplo, se le utiliza ampliamente en la industria de los prefabricados y premezclados para la construcción de puentes, aeropuertos, edificios y conjuntos habitacionales, entre otros. Por su composición química, el Cemento Portland Tipo II Modificado CPO 30 R genera menor calor de hidratación que otros 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.<sup>[27]</sup>

## Fosfato Tricalcico (TCP) "Natural"

---

El fosfato tricálcico es un compuesto de calcio y fósforo con fórmula química  $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ , su aspecto es de polvo blanco, inodoro y es estable en el aire. Se obtiene de la combinación de fosforo y calcio. En el área de biomateriales, el TCP se usa para la fabricación de cementos para aplicaciones dentales o reparación de huesos.

En esta trabajo, como aditivo se empleó Fosfato Tricálcico de marca comercial COSMOCEL, de la empresa Amfher Foods; esta empresa vende este material como Fosfato Tricálcico sin embargo al practicarle Rayos X muestra que es una mezcla de dos minerales naturales empleados en los alimentos en este caso Hidroxiapatita y Monetita siendo estos viables para los fines de esta investigación, estos se seguirán utilizando por consistencia y lo llamaremos TCP.

---

<sup>27</sup>. Cementos Cruz Azul, descripción de cemento Portland. [http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo\\_II.html](http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo_II.html).

## Wolastonita

---

Desde la década de los 90's, se ha explorado el uso de la Wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) como material para elaboración de tejido óseo artificial y para aplicaciones dentales. Se ha reportado que este mineral produce la formación de apatita (componente del tejido óseo) en la superficie de cerámicas y metales, en presencia de fluidos corporales<sup>[28]</sup> de manera más rápida que otros vidrios bioactivos.

Existen reportes para las aplicaciones de Wollastonita en investigaciones de cementos Portland con la finalidad de que estos últimos sean viables para uso odontológico<sup>[29]</sup>, sin embargo pueden tomarse como referencia para estudiar su empleo en la construcción.

## Agua

---

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. Se emplea este tipo de agua como dispersante para preparar el aditivo en forma de suspensión. Sin embargo en esta investigación se emplea también agua potable de la red, con la finalidad de tener la mayoría de los parámetros a los cuales está sujeto el material en las obras de construcción.

---

<sup>28</sup>. Liu X, Ding C. Mechanism Of Apatite Formation On Wollastonite Coatings In Simulated Body Fluids. *Biomat.* 2004;25(10):1755-1761

<sup>29</sup>. Abigail Flores Ledesma., Tesis profesional para obtener el título de Maestra en Ciencias Odontológicas, Titulada "Influencia de Wollastonita y Vidrio Bioactivo en las Propiedades Físicas de un Cemento Dental Tipo Portland" ., México D.F., 2011.

## 3.2 Fabricación de Probetas para Compresión y Flexión

Para las pruebas de compresión, las probetas de cemento se colaron en moldes cilíndricos hechos de PVC, sus dimensiones aparecen en la figura 13

(abajo). La proporción de agua-cemento de acuerdo a Huang<sup>[30]</sup> fue; 5 ml. de agua por cada 6.27 gr. de cemento.

### Moldes de Fabricación para Pruebas a Compresión

Se diseñaron y fabricaron los siguientes moldes con el fin de llevar a cabo las pruebas de resistencia a la fractura en compresión tratando de simular el comportamiento que se tienen en elementos estructurales, en este caso en las columnas.

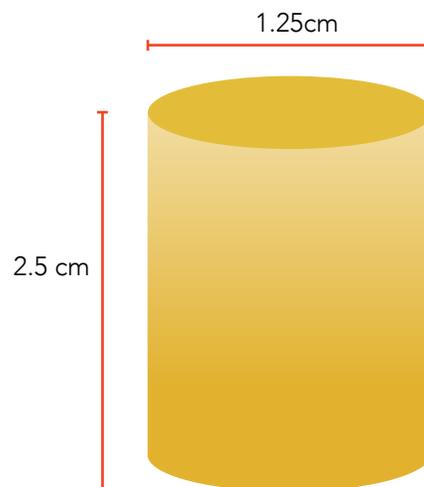


Figura13. Dimensiones de las probetas fabricadas para pruebas a compresión.

<sup>30</sup>. 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.



Figura 14. Elaboración de moldes y vaciado posteriormente con mezclas de Cemento Portland y Cementos con Aditivos

Se describen a continuación las características tomadas en cuenta para la obtención de datos durante el seguimiento hecho a las probetas.

El diámetro del espécimen de prueba, se determino promediando las 2 lecturas de sus diámetros perpendiculares entre sí, para realizar estas lecturas se realizaron por medio de un calibrador de vernier digital.

Antes de realizarse el ensayo de las probetas, se observo que las bases de los especímenes o caras de aplicación de carga contenían irregularidades por tal motivo fueron torneadas para dejar las superficies planas y paralelas en ambos lados del cilindro (normas aplicables: NMX-C-109-ONNCCE y ASTM C-39-86, Standard Method of Test "Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens").

Finalmente se limpio la superficie de las placas superior e inferior y las cabezas de los especímenes de prueba; posteriormente se coloco la probeta sobre la placa inferior de la celda de carga alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa con superficie esférica; mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se aproxime lo mas cerca de la probeta para que cuando se desplace la celda se tenga un contacto suave y uniforme.

Se aplico una velocidad de deformación uniforme y continua sin producir impacto, ni perdida de carga. La velocidad de carga o desplazamiento aplicado fue de 1mm/seg, hasta que ocurriera la falla, este procedimiento se efectuo de igual manera para pruebas de flexión incluyendo la velocidad de desplazamiento en la celda de carga.

### Moldes de Fabricación para Pruebas a Flexión en 3 Puntos (parámetro de interés, Resistencia a la Fractura)

---

Estudiando los diferentes tipos de material que existen para fabricar moldes de vaciado experimental, se tomo la decisión de elaborarlos con acrílico, debido a que este material

posee una superficie mas lisa, por lo que el desmolde es mas rápido sin someter a la probeta esfuerzos por manipulación, antes de llevar a cabo el ensayo de flexión.

Se comenzó con el diseño virtual de este antes de llevarlo a su fabricación, esto con la finalidad de evitar en la medida de lo posible la mayor parte de anomalías y errores evitando tener desperdicio;

fue así como se optó usar este material debido a que es muy fácil de trabajar, pero a su vez es muy preciso. A continuación se muestran los prototipos hechos para la fabricación de este.

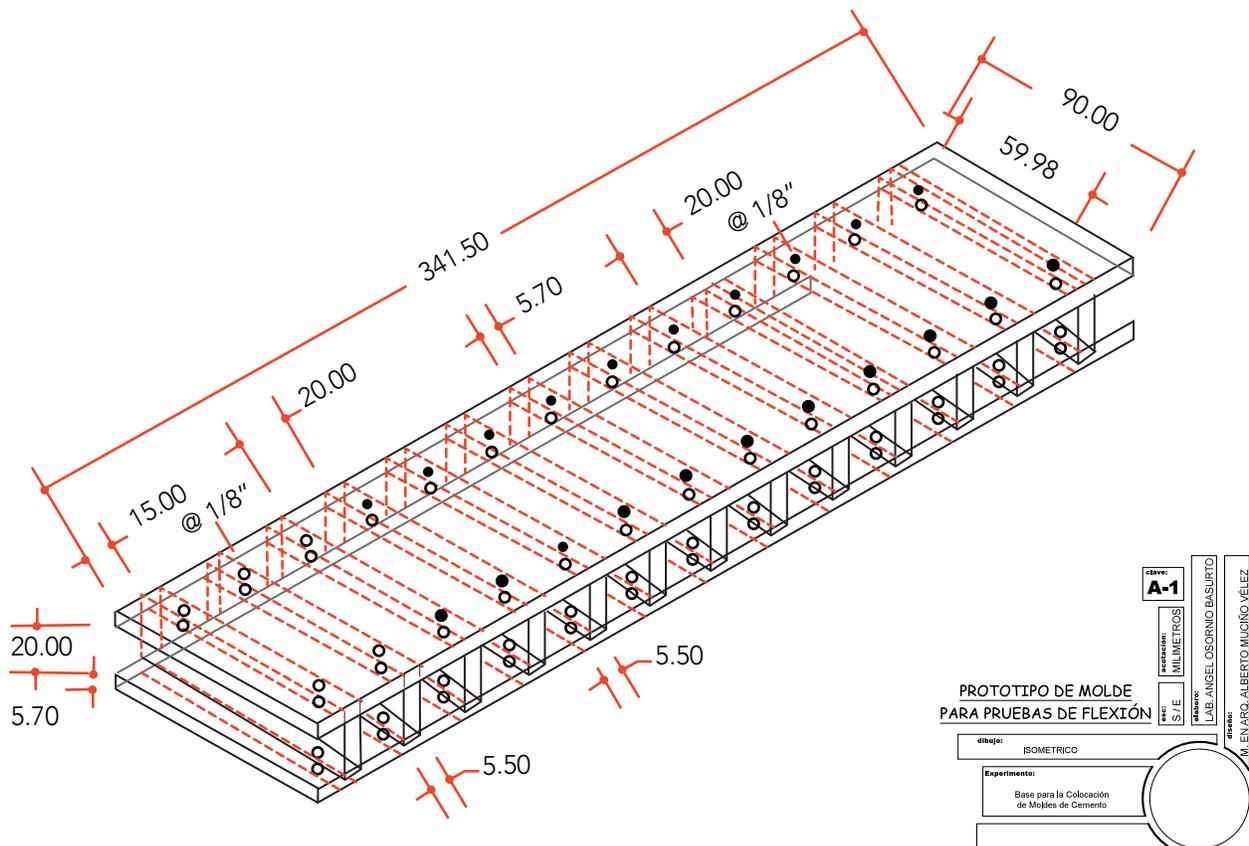


Figura 15. Elaboración de prototipos de diseño para fabricar probetas de Cementos Básicos y Cementos con Aditivos, para someterlos a pruebas de Flexión.

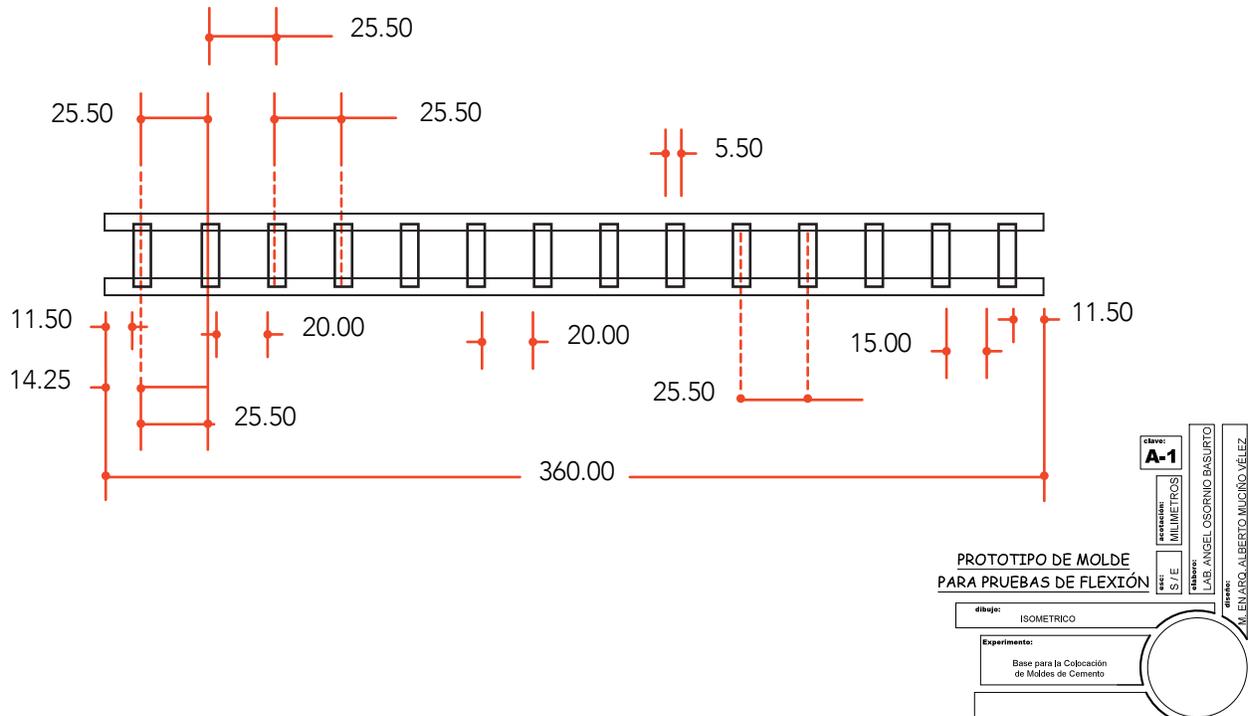


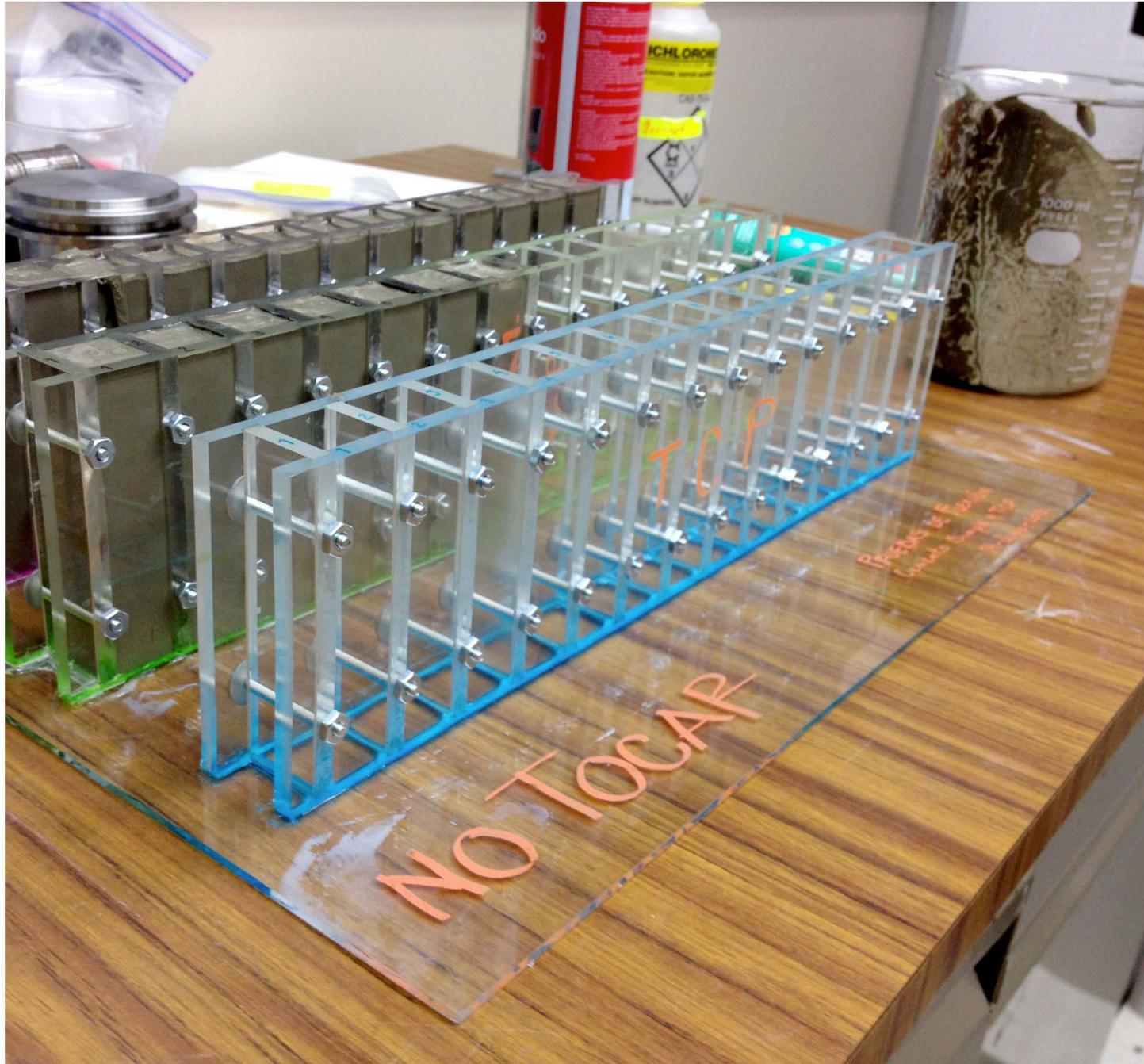
Figura 16. Corte Longitudinal y Transversal del diseño de probetas rectangulares.

En la figura 17 se pueden ver los moldes fabricados en acrílico, el proceso de vaciado y el proceso de desmontado

respectivamente. La dimensión de las probetas se muestra en la figura 18.



Figura 17. Se pueden ver los moldes fabricados en acrílico, el proceso de vaciado y el proceso de desmontado respectivamente. La dimensión de las probetas se muestra en la figura 18.



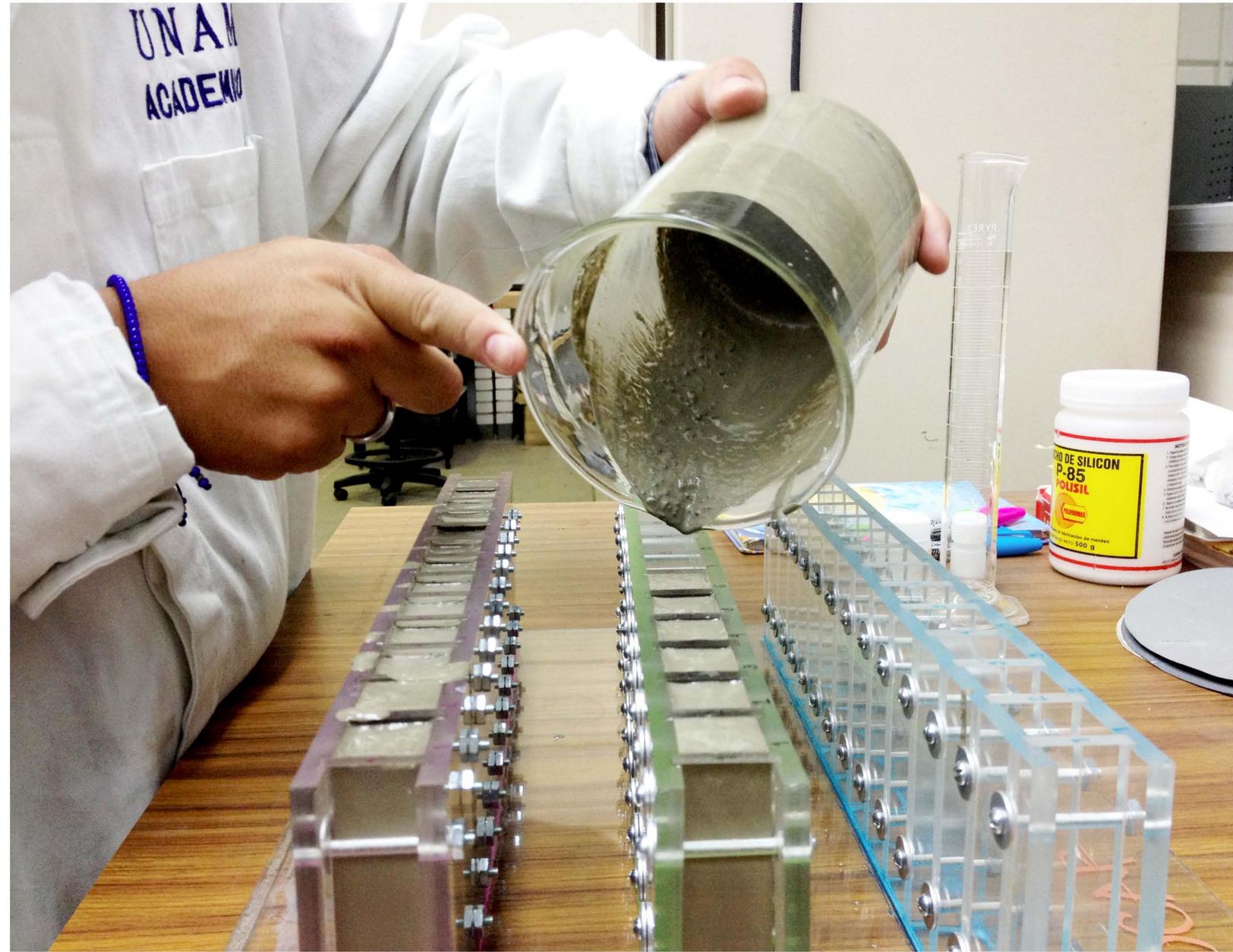






Figura 17. Desmolde de las probetas de Cemento Básico y Cemento con Aditivos.

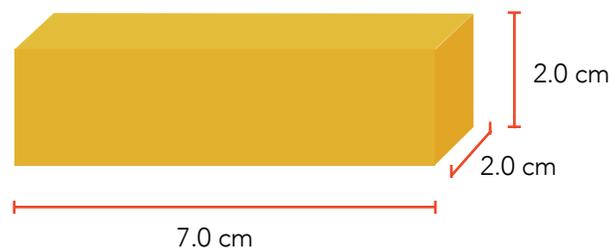
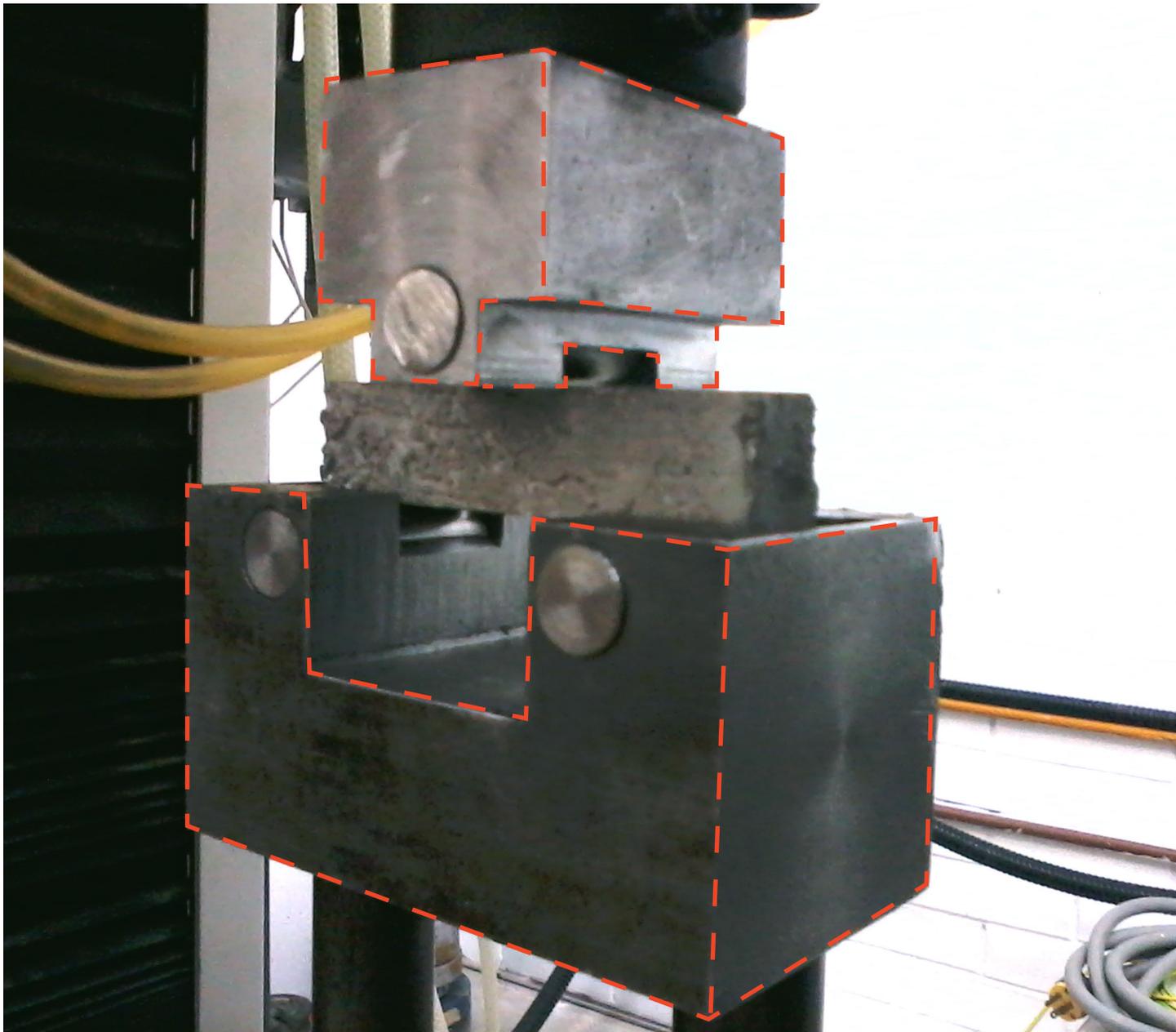


Figura 18. Dimensiones de las probetas fabricadas para pruebas a flexión de 3 puntos.

Finalmente, para las pruebas de flexión en 3 puntos, se diseñaron y construyeron un soporte adecuado para las dimensiones

de las probetas que se fabricaron (véanse las figuras 19 y 20).



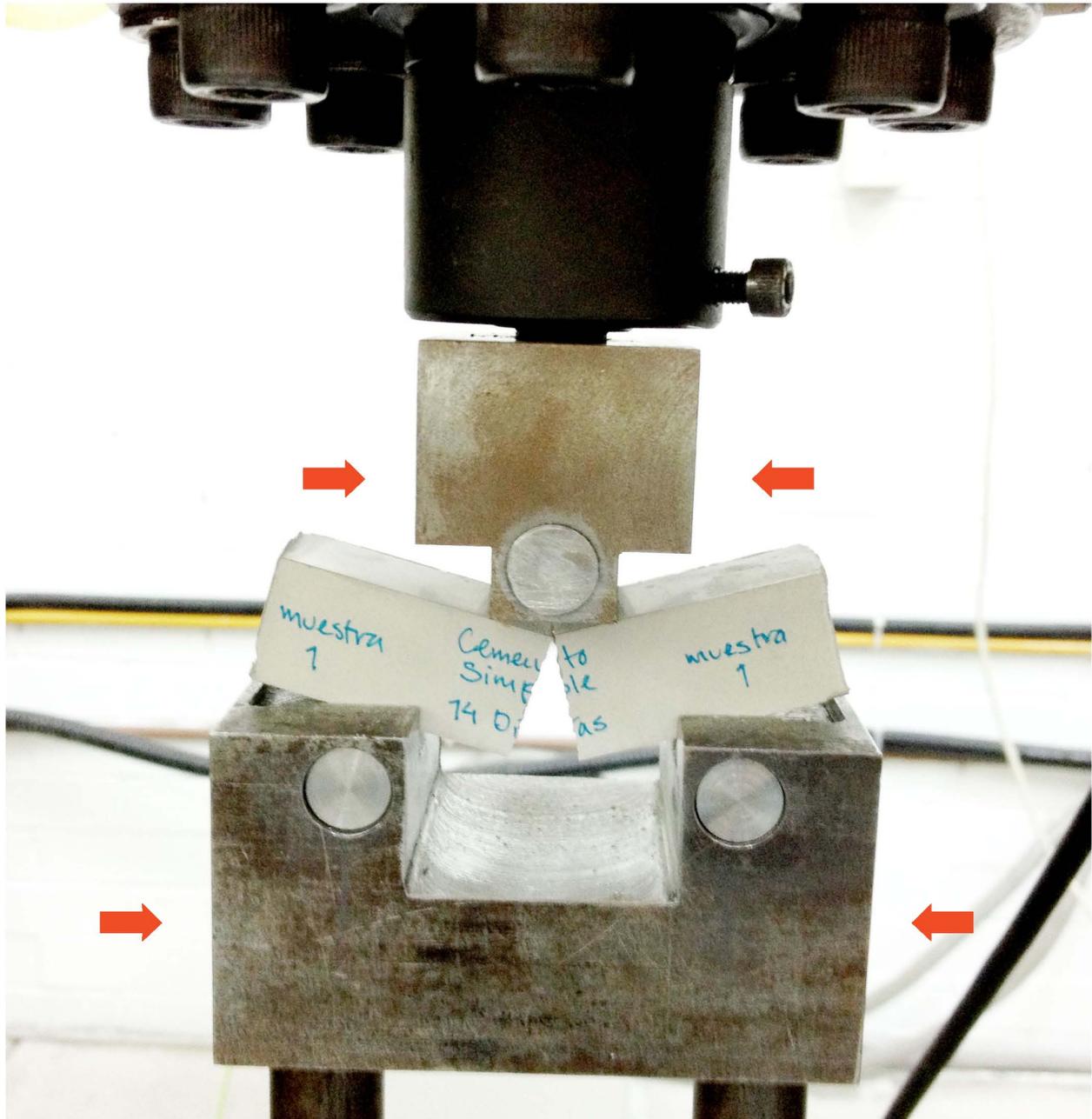


Figura 19 y 20. Fabricación de la celda de carga para Pruebas de Flexión, las flechas indican la parte frontal y la zona punteada el perfil de la pieza.

## 3.3 Tipo de Mezclas que se prepararon

El tipo de mezclas que se prepararon para este estudio se describen a continuación

Cemento Básico (C-B); es aquel que sólo es la mezcla de cemento y agua en la proporción ya mencionada.

Cemento con agua y TCP (C-TCP); es la mezcla de cemento y Fosfato Tricalcico (TCP) en suspensión en agua desionizada sin ningún elemento de modificación en el aditivo.

Cemento con agua y TCP Tamizado (C-TCP-T); esta se compone de la mezcla de cemento y la adición de TCP pasado por un tamizador de prueba de 60 mesh (tamaño de partícula de  $250\mu\text{m}$ , micrones).

Cemento con agua y partículas de TCP generadas por molienda mecánica (1% en peso) (C-TCP-M); el TCP es sometido a una molienda durante 20 Hrs para generar

partículas submicrométricas; posteriormente se prepara la suspensión con agua desionizada que se agrega al cemento.

Cemento con Partículas de TCP sometido a molienda mecánica (1% en peso), dispersado en baño ultrasónico con agua (C-TCP-Md); después de la molienda del TCP (20 Hrs) se dispersa por ultrasonido y se le filtra en papel filtro de porosidad media de 8 micras marca Whatman. La intención es obtener tamaños de partícula inferiores.

Cemento con agua y partículas de Wolastonita (C-W); es la mezcla de cemento y partículas de Wolastonita en suspensión con agua desionizada sin ninguna modificación del aditivo. Se utilizó este material con el fin de explorar otro tipo de aditivos de bajo costo.

Es importante mencionar que México es uno de los mayores productores

de wollastonita a nivel mundial, (Pilares: situada en Nacozari, Sonora.

Es considerada como uno de los yacimientos de wollastonita más importantes a nivel mundial, con un volumen de producción de 47 mil

toneladas<sup>[31]</sup>), por lo tanto sería importante que surjan nuevas investigaciones aprovechando los recursos con los que dispone el territorio nacional.

Cemento con Partículas de Wolastonita sometidas a molienda mecánica, (1% en peso) (C-W-M); se somete la Wolastonita a una molienda de 20 Hrs para generar partículas submicrométricas. Se agregan en suspensión con agua desionizada.

de este compuesto en el proceso de endurecimiento del cemento.

Cemento con agua y partículas de Hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ) grado reactivo (C-Hdap); durante el proceso de molienda del TCP se observó la formación de Hidroxiapatita. Los experimentos se hicieron para averiguar algún efecto

Cemento con agua y partículas de TCP generadas por molienda mecánica (1% en peso) (Cem-TCP); el TCP es sometido a una molienda durante 20 Hrs para generar partículas submicrométricas; posteriormente se prepara la suspensión con agua potable proveniente de la red y esta se agrega al cemento con la finalidad de disminuir el costo así como ver que efecto sucede en la pasta.

De todos los casos investigados, solo en las muestras denominadas TCP Molienda 20Hr's (Cem-TCP) y TCP 8 micras baño ultrasónico (C-TCP-Md), se observa un nivel de endurecimiento superior al del cemento básico o simple en todo el intervalo de prueba, específicamente, el porcentaje de endurecimiento en el todo el intervalo va del 6 al 10% para el primer caso y del 6 al 14% en el segundo, llegando a ser de alrededor del 10 % a los 37 días

en ambos casos. Así que se decidió investigar estos resultados con más detalle, haciendo pruebas a compresión y flexión en tres puntos. La evolución y el cambio en la microestructura con el proceso de endurecimiento se midió con microscopia (óptica y electrónica de barrido) y la evolución de los productos de hidratación se siguió con técnicas espectroscópicas (difracción de rayos X y espectroscopia infrarroja).

---

<sup>31</sup>. Linda Rocío López Sánchez., Tesis profesional para obtener el título de Ingeniera de Minas y Metalurgista, Titulada "Residuos Mineros y la Generación de Drenaje Ácido: Pruebas de Laboratorio y su Aplicación en el Diseño"., México D.F., 2013

También realizamos pruebas de resistencia a la fractura en compresión en muestras de cemento con Wolastonita (silicato), siguiendo uno de los procedimientos de preparación del aditivo; es decir, molienda 20Hr's y suspensión del polvo en agua potable de la red.

Las pruebas de compresión hechas en muestras de cemento básico y en muestras de cemento con Wollastonita,

al igual que en el caso del TCP, muestra niveles de endurecimiento superiores a los del cemento básico; de hecho al final (37 días) se observa que el porcentaje de endurecimiento es de casi el 10%. En este caso, se decidió continuar utilizando como aditivo al TCP.

En la siguiente tabla, se resumen las pruebas mecánicas realizadas en las diferentes mezclas y los análisis fisicoquímicos correspondientes.

En la siguiente tabla, se resumen las pruebas mecánicas realizadas en las diferentes mezclas y los análisis fisicoquímicos correspondientes.

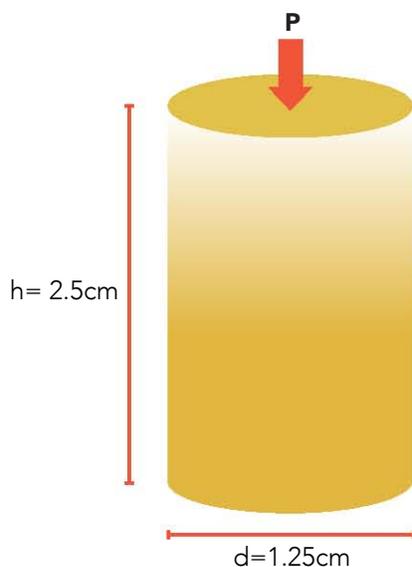
Tabla 5. Lote de muestras a analizar						
	Prueba de Compresión	Prueba de Flexión de 3 puntos	Microscopia Electrónica de Barrido	Difracción de Rayos X XRD	Espectroscopia Infrarroja FTIR	Análisis Termo Gravimétrico
Cemento Básico (CB)	X	X	X	X	X	X
Cemento con TCP Natural (C-TCP)	X					
Cemento con TCP Natural Tamizado (C-TCP-T)	X					
Cemento con TCP Natural con Molienda Mecánica (C-TCP-M)	X	X	X	X	X	X
Cemento con TCP y Molienda Mecánica en Baño Ultrasonico con Filtro de 8 micras (C-TCP-Md)	X					
Cemento con Wolastonita (C-W)	X					
Cemento con Wolastonita y Molienda Mecánica (C-W-M)	X					
Cemento con Hidroxiapatita Grado Reactivo (CHdap)	X					

## 3.4 Técnicas de Caracterización

### 3.4.1 Pruebas Mecánicas

La resistencia a la compresión de la probeta, utilizando la fórmula  $f_c = P/A$ , donde  $f_c$  es la resistencia a la compresión,  $P$  es la carga máxima aplicada al

especímen y  $A$  es el área, se obtuvo dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área promedio de la sección. (Ver Figura 21)



$$f_c = \frac{P}{A}$$

**P** = Carga axial aplicada al cilindro (KN)

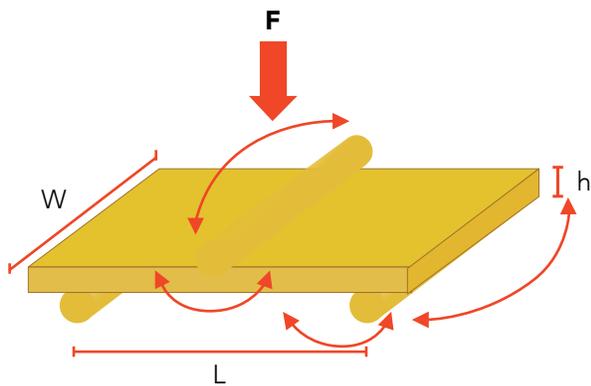
**A** = Área de cilindro (mm<sup>2</sup>)

Figura 21. Cálculo de la resistencia a la compresión efectuada a las probetas.

En el caso de las pruebas de flexión de 3 puntos las probetas se preparan en forma de un paralelepípedo, de sección transversal rectangular. Al aplicar la carga en tres puntos causando flexión, actúa una fuerza que provoca tensión sobre la superficie, opuesta al punto

medio de la probeta. La fractura iniciará en este sitio.

A continuación se describe la expresión utilizada para calcular su resistencia a la flexión.



$$\text{Resistencia a la Flexión} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

donde:

**L** = Distancia entre los dos puntos de apoyo

**F** = Carga a la fractura

**w** = Ancho de la probeta

**h** = Altura de la probeta

Figura 22. Cálculo de la resistencia a la flexión efectuada a las probetas.

El registro de los resultados se clasifica de la siguiente manera:

- |   |   |
|---|---|
| a) Clave de identificación del espécimen.                           | f) Carga máxima en N (Newton).  |
| b) Edad nominal del espécimen.                                      | g) Esfuerzo a la compresión N/mm <sup>2</sup> (Newton / milímetro al cuadrado).   |
| c) Diámetro y altura en centímetros, con aproximación a milímetros. | h) Esfuerzo máximo a la ruptura en Compresión, calculada con MPa (Mega Pascales). |
| d) Área de la sección transversal en mm <sup>2</sup>                |   |
| e) Masa del espécimen en gramos.                                    |   |

En las siguientes figuras 23 y 24 aparecen los dispositivos para las pruebas a Compresión y Flexión en Tres Puntos.

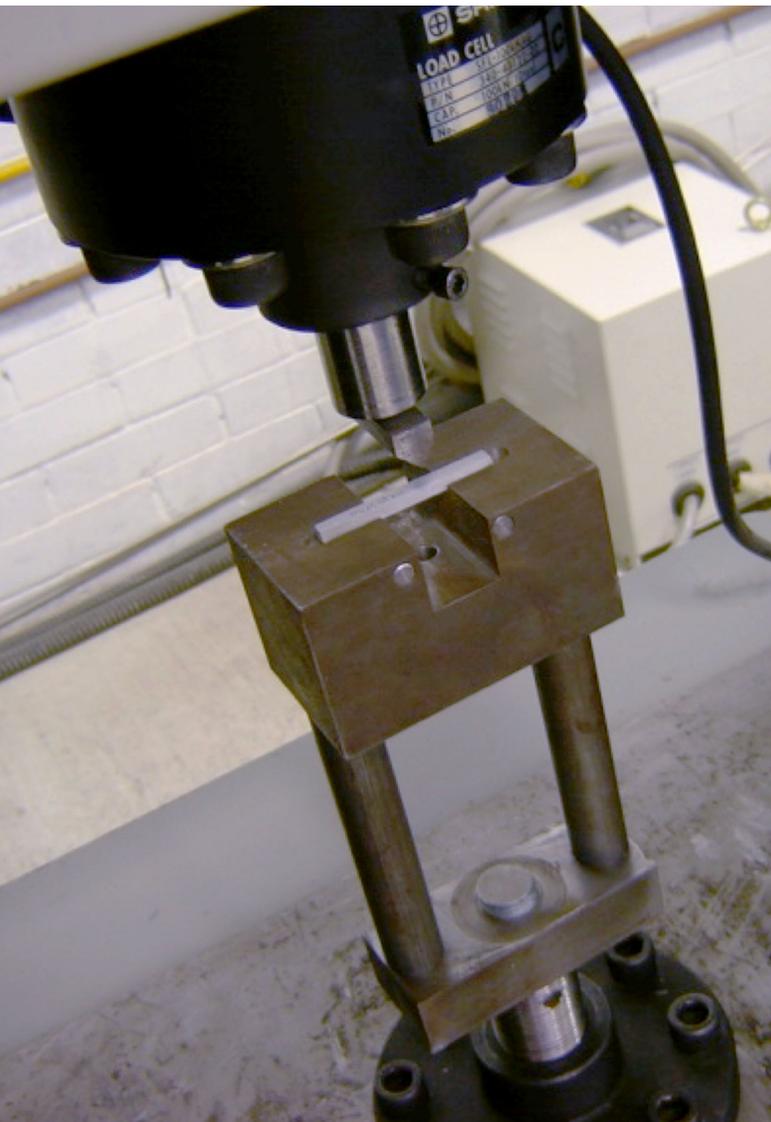


Figura 23 y 24. Prueba de Compresión y Prueba a Flexión en Tres Puntos realizada en la Máquina de Pruebas Universal SHIMADZU.

En cada caso se ensayaron tres diferentes probetas, se reporto el promedio del esfuerzo máximo a la fractura. En la

figura 25 aparece la máquina empleada; Máquina de Pruebas Universal SHIMADZU, Mod. AG-100 KNG.



Figura 25. 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, Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales.

### 3.4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido (MEB) es el mejor método adaptado al estudio de la morfología de las superficies. A diferencia de un microscopio óptico que utiliza fotones del espectro visible, la imagen entregada por el MEB se genera por la interacción de un haz de electrones que “barre” un área determinada sobre la superficie de la muestra.

La técnica esencialmente consiste en hacer incidir en la muestra un haz de electrones. Este bombardeo de electrones provoca la aparición de diferentes señales que, captadas con detectores adecuados, proporcionan información acerca de la naturaleza de la muestra.<sup>[32]</sup> La señal de electrones secundarios se aprovecha para obtener una imagen de la morfología superficial de la muestra.

También se puede obtener una imagen con la señal de electrones retrodispersados en donde se pueden distinguir cualitativamente zonas con elementos químicos de distinto número atómico. El impacto de los electrones en la muestra, también produce una señal con la cual se obtiene un espectro de rayos X (EDX o EDS) que contiene información sobre la composición de elementos químicos en la muestra.<sup>[32]</sup>

Las imágenes y el microanálisis de las muestras, se tomaron en un Microscopio Electrónico de Barrido de Ultra-Alta Resolución JSM-7800F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope. (Ver figura 26)

Figura 26. Microscopio de Barrido JEOL, en sesión de micrografías para cemento



### 3.4.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Los Rayos-X, descubiertos en 1895 por Wilhelm Roentgen (1845-1943), son ondas electromagnéticas con longitud de onda muy corta (del orden de  $10^{-10}\text{m} = 0.1\text{nm} = 1\text{Å}$ ). En 1913, Max von Laue (1879-1960) sugirió que la disposición regular de los átomos en un cristal, cuya separación es del orden de  $10^{-10}\text{m}$ , podría actuar como una rejilla de difracción tridimensional

para Rayos-X. Experimentos posteriores confirmaron su predicción. Los patrones de difracción son complicados, a causa de la naturaleza tridimensional de un cristal. A pesar de ello la técnica de difracción de Rayos-X es inestimable para estudiar estructuras cristalinas y para comprender la estructura de la materia y la composición de minerales.<sup>[33]</sup>

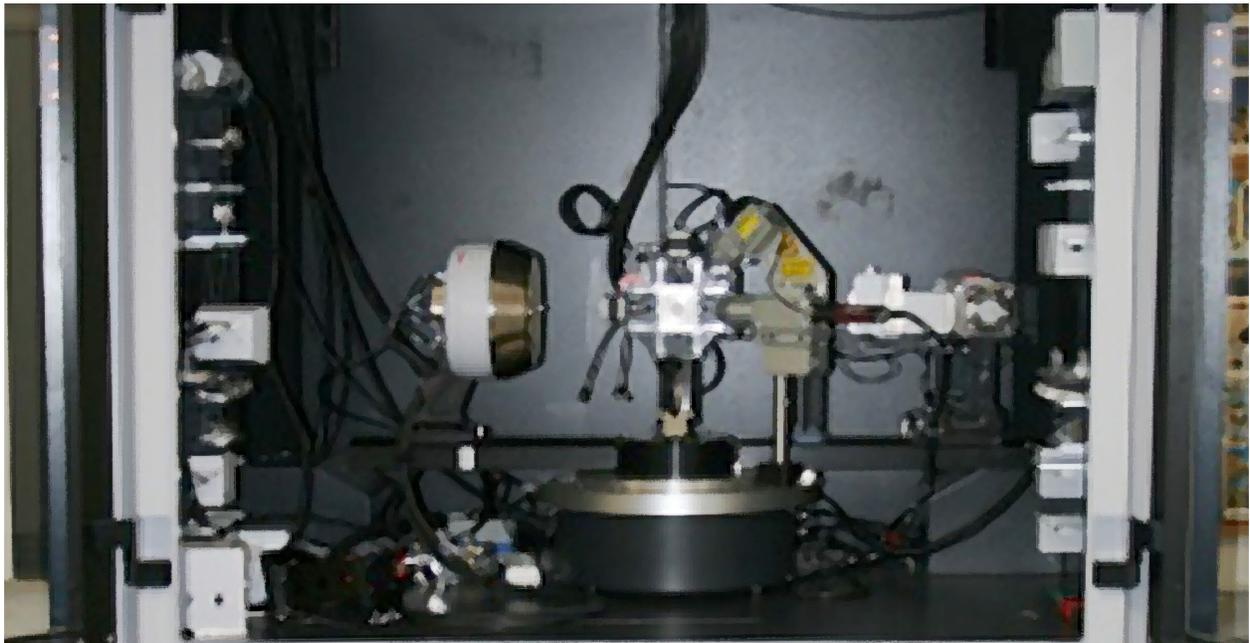


Figura 27. Difractómetro D8-Discover.

<sup>32</sup>. ITESM. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). [http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM\\_ICP.pdf](http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM_ICP.pdf)

<sup>33</sup>. Jewet S. Física II: Texto Basado En Cálculo; México, Ed. Thomson; 2004

Los experimentos de difracción de rayos X, se realizaron en polvos de las mezclas de cemento, en diferentes momentos del proceso de endurecimiento. El equipo empleado fue un Difractómetro marca Bruker, modelo D8-Discover, el cual puede operar usando un tubo de

molibdeno (Mo) o cobre (Cu). Además, tiene configuraciones de medición en reflexión y transmisión con haz monocromático de molibdeno. En ambas configuraciones la muestra puede estar a temperaturas entre la ambiente y los 1000 grados Celsius. (Figura 27)

### 3.4.4 Espectroscopia Infrarroja (FTIR)

La radiación infrarroja, corresponde a ondas electromagnética situada entre la región visible (más allá de la parte roja) y la región de microondas. El número de onda de una línea del espectro es directamente proporcional a la variación de energía existente de los niveles energéticos de los diferentes estados vibracionales en que pueden existir los átomos o moléculas; en esta espectroscopia suele considerarse  $\text{cm}^{-1}$  como una unidad de energía.

La Espectroscopia Infrarroja, se basa en reglas de selección cuánticas y en el hecho de que la oscilación o vibración que presentan los átomos que conforman una molécula, tiene una frecuencia de la misma magnitud que la de la radiación infrarroja por lo que se da una absorción resonante de la energía de la radiación por parte de las moléculas. El espectro infrarrojo es

el registro del porcentaje de la radiación absorbida por una sustancia en función del número de onda de la radiación infrarroja incidente. El espectro de absorción, se obtiene por la irradiación con luz infrarroja de sucesivas frecuencias y por la medida simultánea de la intensidad de la radiación transmitida. Un espectrógrafo consta de tres partes fundamentales. La fuente emisora de radiación infrarroja continua, el sistema dispersivo que se encarga de separar la radiación según su longitud de onda y proporciona haces a frecuencias conocidas, y un detector que mide la intensidad de cada uno de estos haces de radiación infrarroja para ser posteriormente transformados en una señal eléctrica que da finalmente el espectro.<sup>[34]</sup>

Los análisis de Infrarrojo fueron realizados con el siguiente equipo: Nicolet Nexus 670 FT-IR. (Ver figura 28)

---

<sup>34</sup> . Michele R.Derrick Dusan Stulik James M. Landry. Infrared Spectroscopy in Conservation Science. TheGettyConservationInstitute Los Angeles. USA. 1999



Los análisis de Infrarrojo fueron realizados con el siguiente equipo: Nicolet Nexus 670 FT-IR.

Figura 28. Equipo Nicolet Nexus 670 FT-IR.

### Preparación de muestras:

Los espectros de Infrarrojo (FTIR), se tomaron en transmisión elaborando pastillas al 1% del material a estudiar, mezclado con bromuro de potasio (KBr). Tanto el KBr como el material fueron pesados en una balanza analítica y posteriormente molidos en un mortero de ágata (Figura 29) para homogenizar

ambos materiales. Las pastillas (Figura 30) se fabricaron colocando el polvo previamente homogenizado en una pastilladora que fue sometida a una prensa hidráulica, realizando una precarga de 100 psi por 30s y después 3000 psi por 90s.

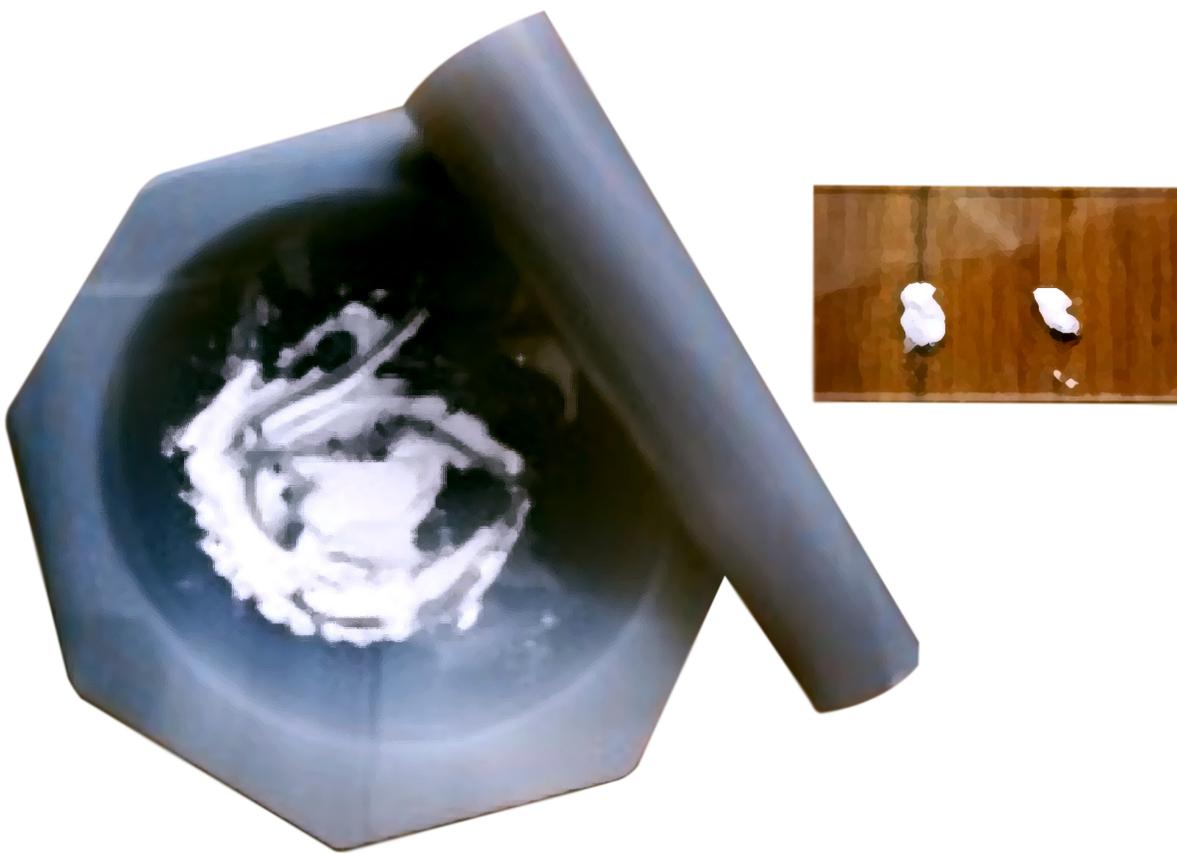


Figura 29. Mortero de ágata con KBr y muestras de Cemento Portland.



Figura 30. Pastilla elaborada para FTIR.

# IV. Análisis y discusión de resultados

Como se ha mencionado anteriormente el cemento Portland dentro de su composición contiene fases sólidas que reaccionan con agua<sup>[35]</sup>, es decir, el silicato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ; alita) y silicato dicálcico ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ; belita) y se utilizan a menudo para estudiar la hidratación del cemento.<sup>[36]</sup> En la literatura se reconoce generalmente que el fraguado y el endurecimiento del cemento, se deben a la formación de un silicato de calcio hidratado generalmente conocido como C-S-H, en puntos de contacto entre las

partículas de cemento.<sup>[37,38]</sup> La formación de C-S-H tiene lugar durante la hidratación de silicato tricálcico y silicato dicálcico por un proceso de disolución-precipitación.<sup>[39,40]</sup> Estos productos de hidratación son los que propician principalmente el endurecimiento, aunque también dentro de estos mecanismos de hidratación también se forman otras fases como la etringita ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) y portlandita (hidróxido de calcio;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). (ver figura 31)

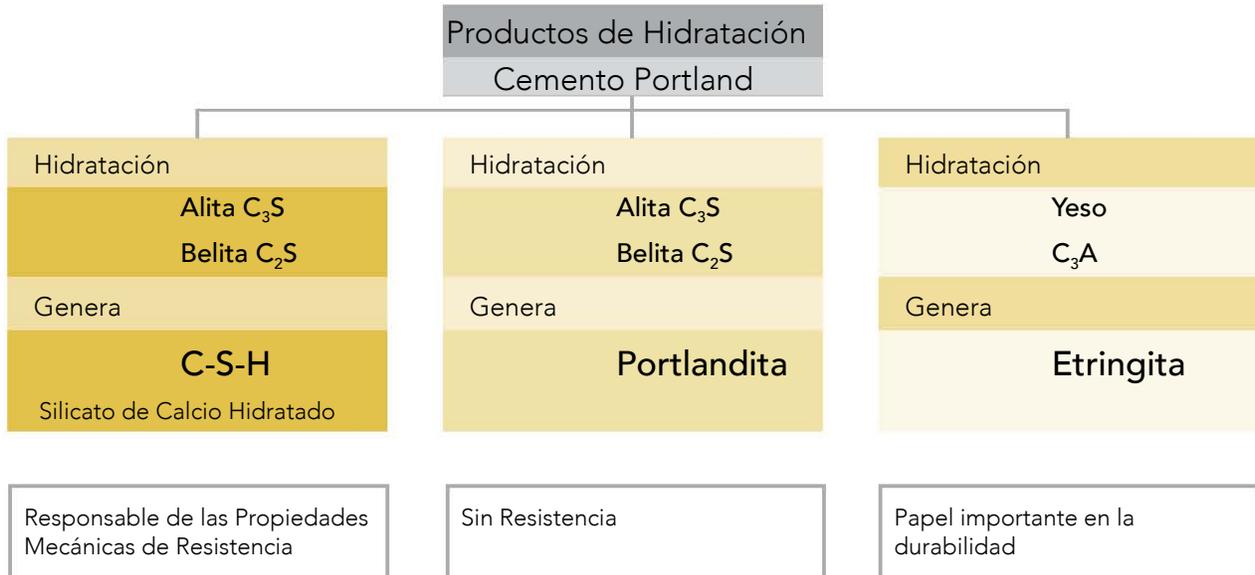


Figura 31 Productos de hidratación presentes en el cemento portland.

Tal como se cito en la sección de Procedimiento Experimental, el proceso de endurecimiento de las pastas de cemento con y sin TCP (fosfato tricálcico natural) preparadas con agua potable

de la red, se siguió a través de pruebas mecánicas de compresión y flexión en tres puntos. Mediante microscopia óptica y electrónica de barrido se observó la evolución de la microestructura a lo

<sup>35</sup>. Taylor, H. F. W. *Cement Chemistry*, 2nd ed.; Thomas Telford: London, 1997.

<sup>36</sup>. RILEM Committee 68-MMH, Task Group 3 Rev. *Mater. Constr.* 1977, 102 (17), 457-468.

<sup>37</sup>. Nonat, A.; Mutin, J.C. *Proceedings of the international RILEM Workshop on Hydration and Setting*, July 1991; Nonat, A., Mutin, J. C., Eds.; E & FN SPON: London, 1992; pp 171-191.

<sup>38</sup>. Jiang, S. P.; Mutin, J. C.; Nonat, A. *Cem. Concr. Res.* 1995, 25 (4), 779.

<sup>39</sup>. Barret, P.; Bertrandie, D. *J. Chim. Phys.* 1986, 765-775.

<sup>40</sup>. Barret, P.; Me'ne'trier, D.; Bertrandie, D. *Cem. Concr. Res.* 1983, 13, 725-738.

largo de 37 días y las fases hidratadas generadas durante el endurecimiento del cemento (figura 31), se rastrearon a

través de técnicas de difracción de rayos X y espectroscopia infrarroja.

## 4.1 Endurecimiento de las Pastas de Cemento simple y con TCP de origen natural, mezclados con agua potable

### 4.1.1 Pruebas de deformación a la fractura

---

En las figuras 32 y 33, aparece graficada la variación del esfuerzo máximo en compresión (en el punto de fractura) como función del tiempo transcurrido para el caso de ambos cementos. Los experimentos se hicieron a los 5, 7, 10, 14, 28 y 37 días; de acuerdo con la norma correspondiente (NMX-C-109-ONNCCE y ASTM C-39-86, Standard Method of Test "Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens").

La primera figura (32) corresponde al caso de cemento con y sin partículas submicrométricas de TCP (natural) mezclados con agua desionizada. Este experimento se hizo para comparar con los resultados reportados previamente ("Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas Submicrométricas")<sup>[41]</sup>, en donde la mezcla también se hizo con agua desionizada y con partículas submicrométricas de TCP grado reactivo de laboratorio.

El resultado es similar al obtenido en la investigación previa (ídem 41), es decir; a lo largo de todo el intervalo de endurecimiento, el cemento con TCP,

muestra un esfuerzo máximo a la fractura mas elevado que el cemento sin el aditivo, al final, llega a ser ligeramente superior en un 14% con respecto al cemento sin TCP.

### Proceso de Endurecimiento Cemento Basico y TCP

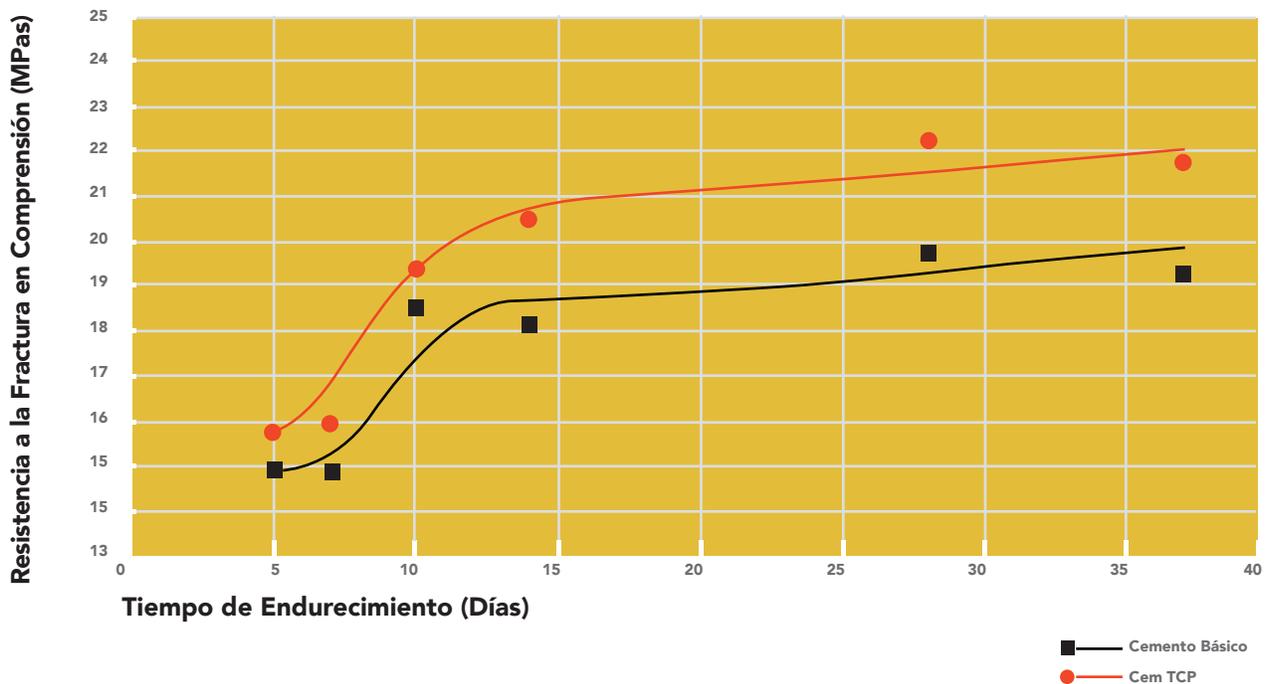


Figura 32 . Resistencia mecánica a la fractura de pastas de cemento simple y cemento con TCP, en ambos casos se utilizó agua desionizada para preparar la pasta.

41. Muciño Vélez Alberto., Tesis para obtener el Título de Maestro en Arquitectura, Titulada "CONCRETO NANOTECNOLÓGICO", Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas submicrométricas, México D.F. 2010.

La segunda (figura 33), muestra los resultados para mezclas hechas con agua potable de la red y TCP de origen natural. Como en el caso anterior, al final se obtiene mayor resistencia a la compresión en el cemento al cual se le incorporaron las partículas submicrométricas de TCP natural. Este resultado, de entrada, hace atractivo económicamente el empleo de

TCP natural para la obtención de pastas de cemento con mayor resistencia a la compresión.

El único inconveniente, tal vez siga siendo la obtención de las partículas submicrométricas, ya que por el momento solo se consiguen vía la molienda del producto natural.

### Proceso de Endurecimiento Cemento Básico y TCP

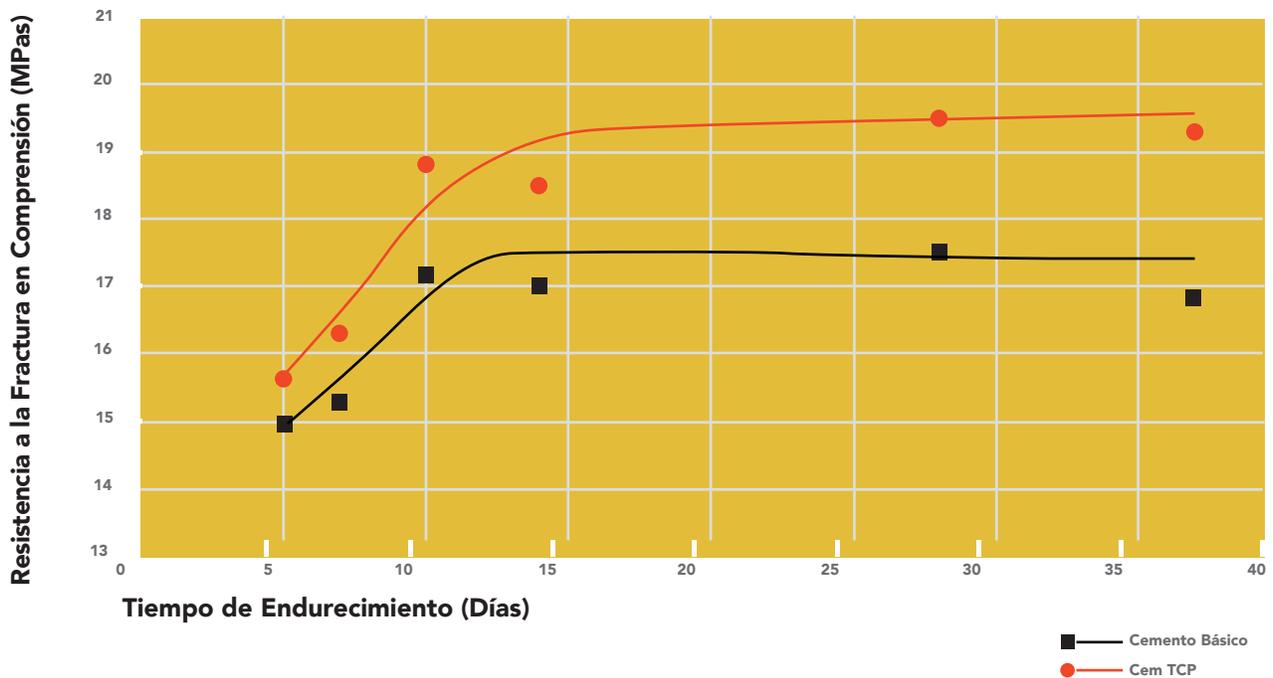


Figura 33 . Resistencia mecánica a la fractura de pastas de cemento simple y cemento con partículas submicrométricas de TCP, en ambos casos se utilizó agua potable de la red para preparar la pasta.

Puesto que los productos de construcción basados en cemento (pasta, mortero y concreto) son vulnerables a los procesos de deterioro físico-químico asociados con el agua, es muy importante mantener su calidad. Actualmente la Norma Oficial Mexicana NOM C-122 (ASTM C-94), establece que si el agua no procede de una fuente de suministro de agua potable, modificara las propiedades físico-químicas de las mezclas de concreto, específicamente en la fabricación de elementos de concreto armado debido a que el acero de presfuerzo se puede ver también afectado por la cantidad de sales o materia orgánica dentro del líquido.

En esta investigación, el TCP agregado a las pastas de cemento con agua potable de la red genera mayor resistencia a la compresión, sin embargo, se deberá investigar si este aditivo no influye con el tiempo en algunos procesos de deterioro, este es un punto importante a considerar para el desarrollo de futuras mezclas.

En la Figura 34 aparece la gráfica correspondiente a las pruebas de flexión en tres puntos. En ella se observa que en el intervalo de 5 a 14 días, en ambos sistemas (cemento sin y con TCP) hay un

incremento significativo en el esfuerzo a la fractura, sin embargo, en ambos casos las pastas de cemento presentan un decremento pronunciado en su resistencia a los 28 y 37 días.

En este caso, en algún momento (10-14 días), el cemento con TCP muestra mayor resistencia a la flexión que el cemento sin TCP.

Dado que el cemento endurecido es un material cerámico compuesto, su resistencia a la fractura en compresión es mucho mayor que su resistencia a la fractura en flexión (casi 20 veces en este caso); sin embargo, este tipo de prueba nos da una idea de la fuerza de adherencia generada por la red de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Cabe aclarar que durante una prueba flexión, una sección de la probeta es sometida a esfuerzos de tensión.

En la siguiente parte de la tesis se tratan las posibles causas del comportamiento mecánico a través del análisis microscópico y espectrográfico de las muestras ensayadas mecánicamente. El análisis se centrará en el caso de las muestras deformadas en compresión.

## Proceso de Endurecimiento Cemento Básico y TCP Pruebas de Flexión de 3 puntos

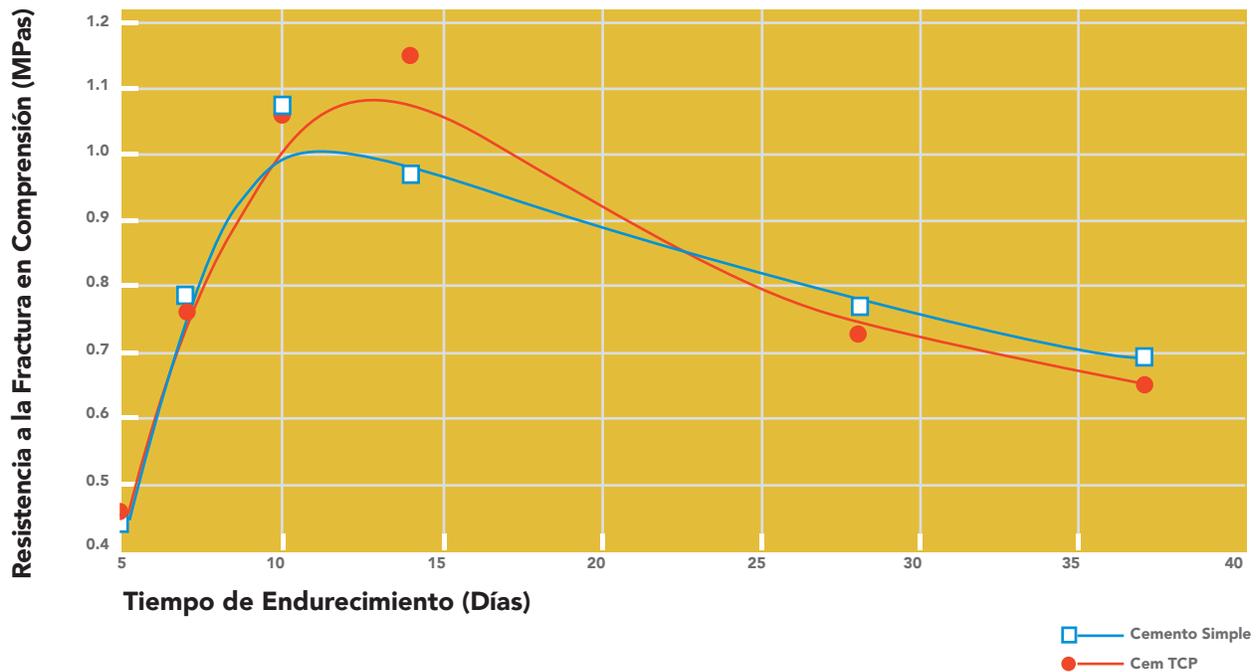


Figura 34 Resistencia a la flexión de pastas de cemento simple y cemento con partículas submicrométricas de TCP.

### 4.1.2 Microscopia Óptica

Para describir la morfología y distribución de los productos de hidratación presentes en las pastas de cemento, se recurrió a examinarlas con un microscopio óptico estereoscópico. Las imágenes obtenidas se procesaron posteriormente por medio del programa ImageJ, este programa permite por medio de contrastes de

color o de tonos de gris, tener una visión global del tamaño y distribución de las regiones hidratadas y no hidratadas de las muestras de cemento (ver en Portland Cement Association<sup>[42]</sup> (2004)).

En este se hizo un análisis cualitativo de las diferencias observadas entre

las muestras de cemento al final del endurecimiento (37 días). En las figuras 35 y 36 mostramos las imágenes correspondientes al cemento simple y al cemento con TCP respectivamente. En ambos casos, las imágenes etiquetadas como B corresponden a la imagen óptica ya procesada. Al compararlas, es evidente que al final, el cemento con TCP muestra una fracción mayor de fases

hidratadas de menor tamaño y con una distribución más homogénea.

Estas diferencias en distribución, número y tamaño de los productos de hidratación entre los dos tipos de cemento analizado, deben estar relacionadas con el mayor endurecimiento observado en las muestras de cemento con TCP al final e inclusive, a lo largo de todo el período de endurecimiento.

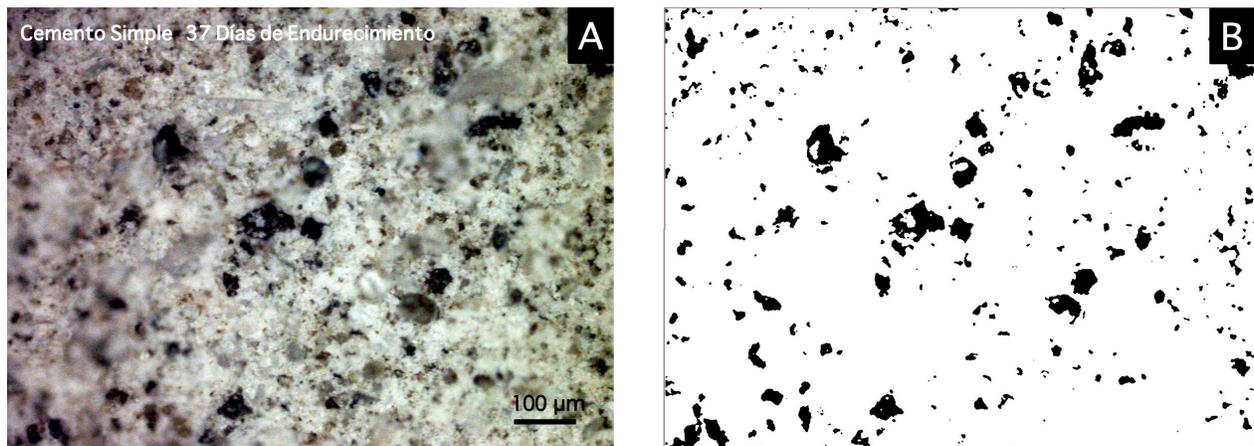


Figura 35. Imágenes de microscopía óptica para determinar los productos de hidratación en pastas de cemento simple a 37 días de endurecimiento. La imagen A es la original tomada por el microscopio óptico junto con la escala en micras y en la imagen B se resaltan los productos de hidratación como resultado del procesamiento por medio del programa ImageJ .

<sup>42</sup>. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese y Jussara Tanesi. Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004. La Asociación de Cemento Portland (PCA) es una entidad sin fines lucrativos, que trabaja por medio de publicaciones para la educación y retroalimentación de profesionales cualificados.

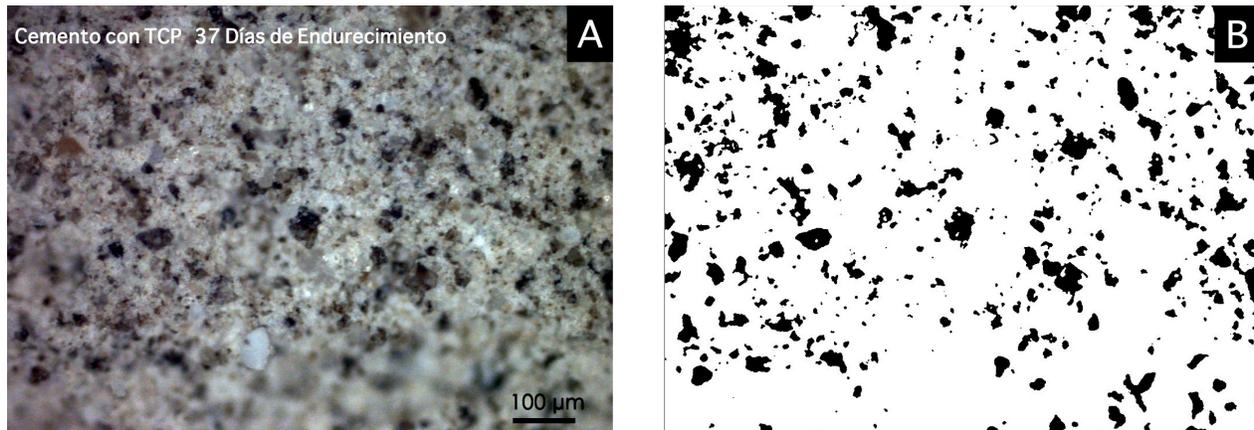


Figura 36. Imagen óptica para determinar los productos de hidratación en pastas de cemento con TCP a 37 días de endurecimiento. La imagen A corresponde a la original tomada con el microscopio óptico junto con la escala en micras y en la imagen B se resaltan los productos de hidratación después del procesamiento por medio del programa ImageJ .

### 4.1.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Las observaciones realizadas por MEB, permiten hacer un análisis mas detallado de la morfología de las fases hidratadas, y de su distribución y tamaño en rangos de amplificación mucho mayores que la microscopía óptica. En esta sección, mostramos imágenes de MEB tomadas en ambos tipos de cemento (con y sin TCP) correspondientes a periodos de endurecimiento de 5, 7, 14, 28 y 37 días.

Los primeros estudios del proceso de hidratación de pastas de cemento, muestran que el silicato de calcio hidratado (CSH) crece a partir de la

disolución de las partículas de silicato tricálcico (alita) y silicato dicálcico (belita) con agua. En este proceso se forman masas aisladas no cristalinas con formas de rosetas adheridas a las partículas de ambos silicatos. También se observan estructuras cristalinas tabulares asociadas la presencia de portlandita y finalmente formas aciculares también cristalinas que se atribuyen a la etringita. En particular, durante el proceso de hidratación, el gel que se forma alrededor de ciertos granos parece hidratarse mas lentamente, esto indica que ese gel se esta formando alrededor silicato dicálcico.<sup>[43,44]</sup>

En la figura 37 se identifican los productos de hidratación tanto en cemento simple como en cemento con TCP, generados en el transcurso de los primeros 5 días de endurecimiento. En la muestra de cemento simple (figura A), la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y el silicato tricálcico hidratado ( $\text{C}_3\text{S}$ ) aparecen como las fases de hidratación más abundantes. Estas mismas fases están presentes en el cemento con TCP (figura

B), y se observa que existe la formación de una fase más que es la etringita. Al comparar ambas imágenes, pareciera que desde el principio la cinética de crecimiento de las fases hidratadas es diferente, por ejemplo, la pasta que contiene TCP, genera productos de hidratación más definidos y distribuidos más homogéneamente desde el principio.

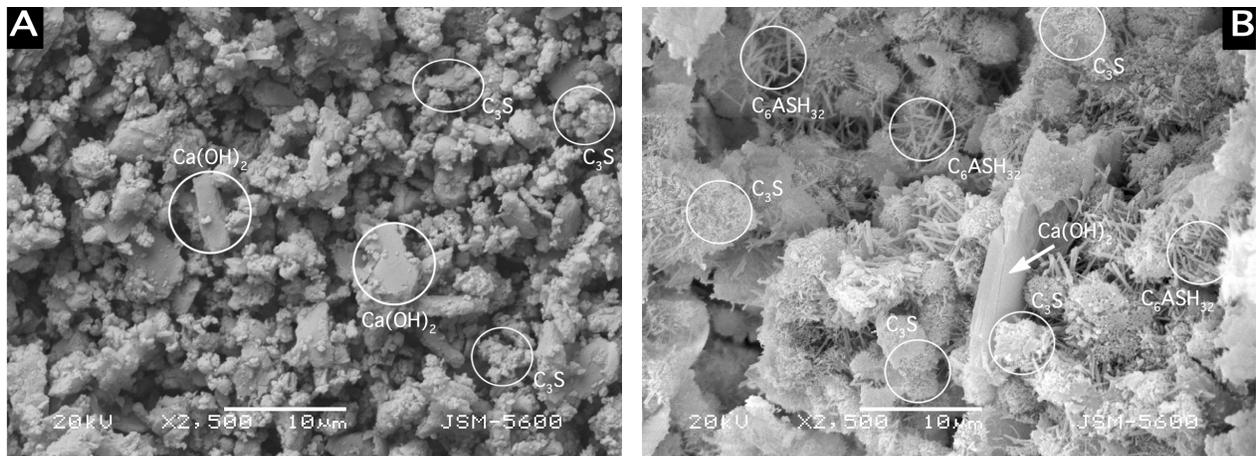


Figura 37. Micrografías de pastas de cemento a 5 días de endurecimiento, imagen A cemento simple e imagen B cemento con aditivo TCP. Se enmarcan los productos de hidratación Silicato Tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y Etringita ( $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$ ).

<sup>43</sup>. Copeland, L.E. and Schultz, E.G. (1962). *J. PCA Res. Dev. Ser. 4*(1).

<sup>44</sup>. Crudem, A., in *4th ISCC*, Vol. 2, p. 615 (1962).

La figura 38 muestra las imágenes de MEB correspondientes a los otros periodos de endurecimiento (7, 14 y 28 días).

El esquema de crecimiento es similar al de 5 días, es decir distribución homogénea y mayor definición de fases hidratadas, solo a 28 días, las microestructuras detectadas empiezan a mostrar mayores semejanzas. Se aprecia la abundancia y mayor definición de las formas tubulares y aciculares asociadas a la Portlandita y a la Etringita en la imagen de la pasta con TCP correspondiente al periodo de 28 días de endurecimiento.

En resumen, las imágenes microscópicas ópticas y las obtenidas mediante microscopia electrónica de barrido parecen indicar que de alguna forma, la adición de partículas submicrométricas de TCP natural favorece una distribución más homogénea de los productos de hidratación en las pastas de cemento, en particular las que corresponden al gel CSH responsable de la consolidación y resistencia mecánica de las pastas.

A continuación se abordaran los resultados del análisis obtenido mediante técnicas espectroscópicas: Difracción de rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja.(FTIR).

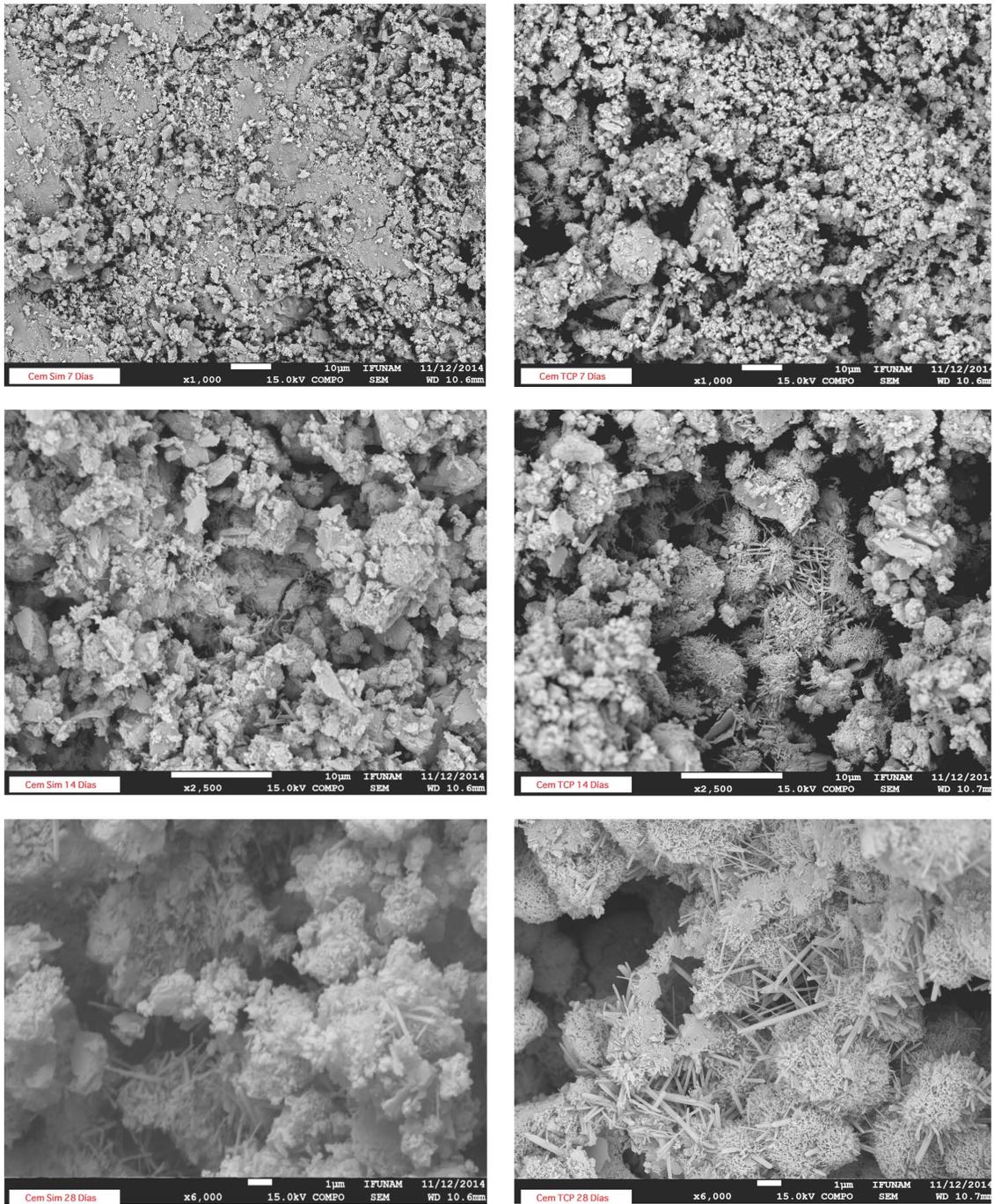


Figura 38. Micrografías de pastas de Cemento Simple y Cemento con TCP a 7, 14 y 28 días de endurecimiento.

#### 4.1.4 Difracción de rayos X (DRX)

La identificación de las fases cristalinas presentes en las pastas de cemento con y sin TCP, y la evaluación de la variación del porcentaje relativo de las mismas durante el proceso de endurecimiento, se hizo mediante empleo de la técnica de Difracción de rayos X (DRX) en

muestras pulverizadas obtenidas de las mismas probetas que se ensayaron mecánicamente.

Como en el caso del análisis por microscopia electrónica de barrido (MEB), los difractogramas muestran

#### Difractogramas a 5 Días de Endurecimiento

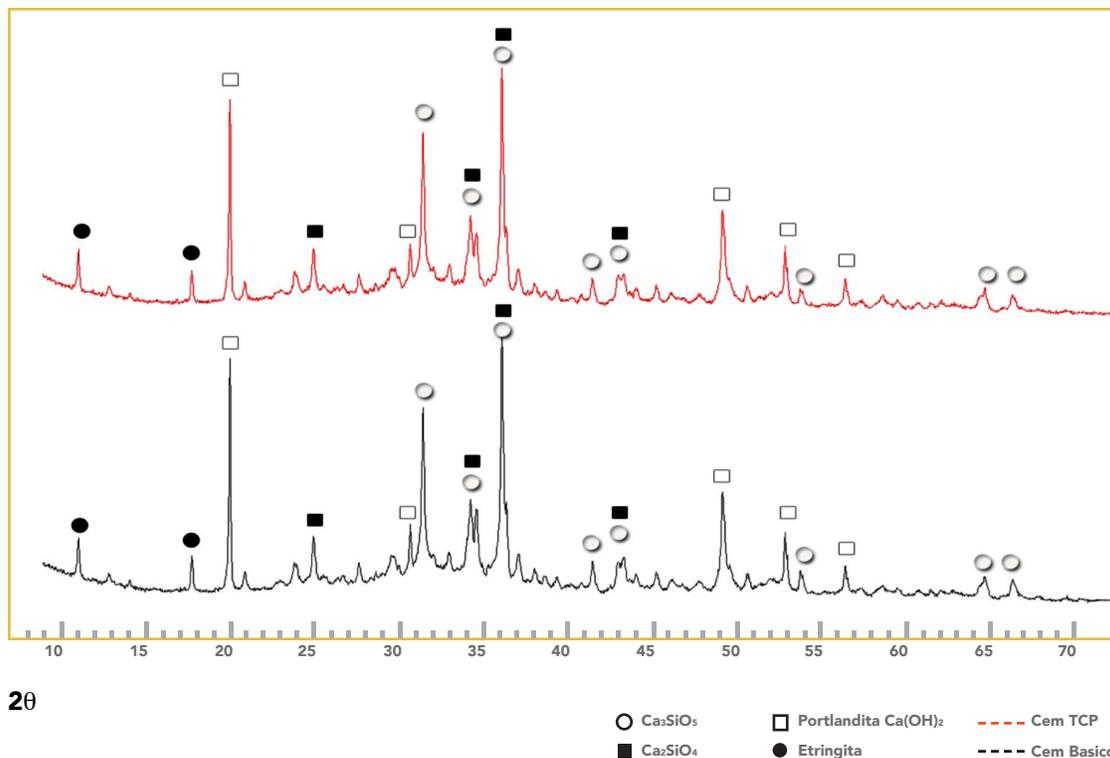


Figura 39. Rayos X practicados a 5 días de endurecimiento a muestras de Cemento Básico y TCP.

que desde el principio y hasta el final del proceso de endurecimiento, todas las fases cristalinas correspondientes al Cemento Portland Ordinario están presentes tanto en las muestras con TCP como en las de cemento simple, lo cual indica que durante el periodo analizado, la transformación de los reactivos  $C_3S$  y  $C_2S$  fue parcial (véase las figuras 39 y figura

40). Además también se detectaron las fases hidratadas con estructura cristalina, Portlandita y Etringita. Infortunadamente, mediante esta técnica no es posible identificar la fase amorfa hidratada CSH, aunque en principio, si se puede estimar de manera indirecta el porcentaje generado de esta fase, aunque para esto es necesario aplicar minuciosamente la

### Difractogramas a 37 Días de Endurecimiento

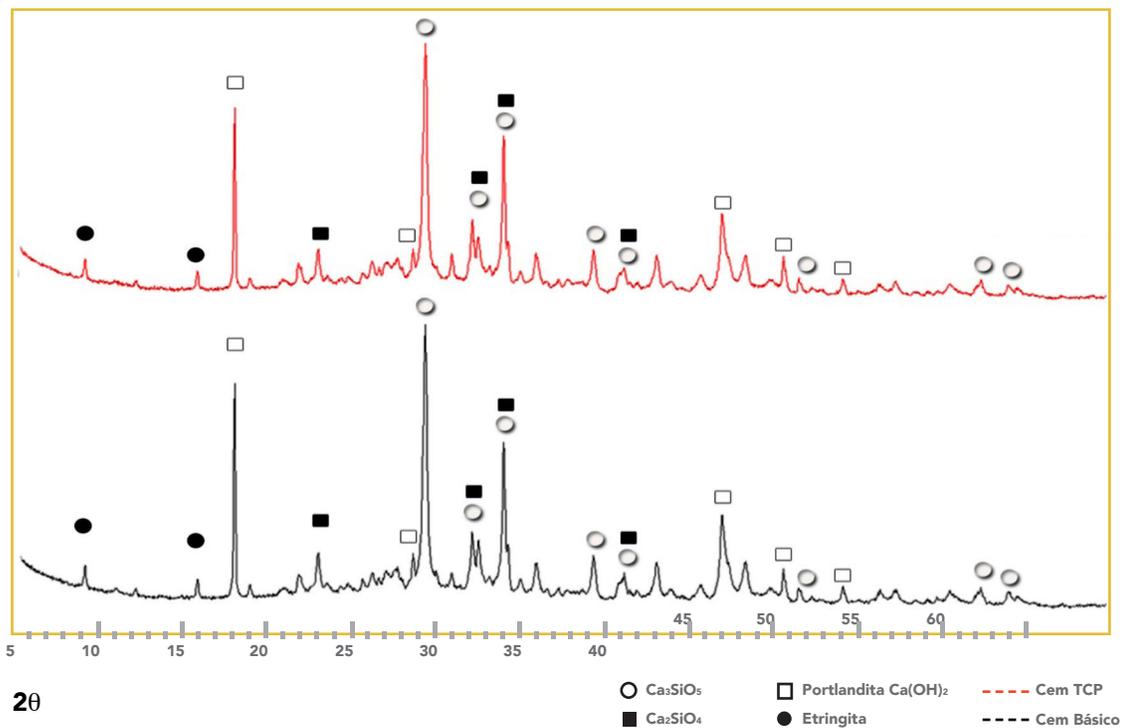


Figura 40. Difractogramas de las muestras de Cemento Básico y TCP a 37 días de endurecimiento.

técnica de refinamiento Rietveld a los difractogramas asociados a los diferentes intervalos de endurecimiento.<sup>[45]</sup>

Como referencia, en la Tabla 6 se enlistan los datos difractométricos necesarios para la identificación de las fases cristalinas, es decir, las posiciones  $2\theta$  (ángulo dos teta) de los picos difractados asociados a las diferentes fases minerales detectadas. Estos datos se obtuvieron del banco de datos del ICDD (The International Centre for Diffraction Data)<sup>[46]</sup>. En la tabla aparece toda la información relevante de las fases cristalinas identificadas tanto de las fases reactivas como de los productos de la hidratación.

En ninguna de las muestras analizadas de cemento con TCP se detectó por este método, alguna fase cristalina adicional

a las esperadas, aunque no descartamos que a nivel nano-métrico, se hayan formado diferentes tipos de hidratos de silicio CSH, cuya detección requiere del empleo técnicas de microdifracción más sofisticadas.<sup>[47]</sup>

Con la finalidad de ilustrar "cualitativamente" la variación relativa de las fases cristalinas durante el endurecimiento de las muestras de cemento con y sin TCP, aplicamos el método de Proporción Relativa de Intensidad (PRI o RIR).<sup>[48]</sup> Con este método, a partir del área de los picos correspondiente a determinadas fases, se puede calcular los porcentajes relativos de cada una con respecto a otra que se toma como referencia.

---

<sup>45</sup>. K.L. Scrivener, T. Fußmann, E. Gallucci, G. Walenta, E. Bermejo. Quantitative study of Portland cement hydration by X, (2004), Cement and Concrete Research, 34, 1541-1547.

<sup>46</sup>. El Centro Internacional de Difracción Data® (ICDD®) es una organización científica sin fines de lucro dedicada a la recopilación, edición, publicación y distribución de datos de difracción de polvo para la identificación de materiales cristalinos. Extraída de la página <http://www.icdd.com>, fecha de consulta febrero de 2015.

<sup>47</sup>. I.G. Richardson. The calcium silicate hydrates. (2008), Cement and Concrete Research, 38, 137-158.

<sup>48</sup>. C. Suryanarayana, M. Grant Norton. X-Ray Diffraction, A Practical Approach, New York, 1998.

Tabla 6 Fases cristalinas detectadas en las pastas de cemento con y sin TCP							
Nombre Químico	Nombre Mineralógico	Formula Química	Nomenclatura Cementera	Sistema Cristalino	Código del ICDD	Picos 2θ	Ref #
Silicato Tricálcico	Alita	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	$\text{C}_3\text{S}$	Monoclinica	00-086-04 02	30.06 32.21 32.54 33.25 34.32	(1)
Silicato Dicálcico	Belita	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	$\text{C}_2\text{S}$	Monoclinica	00-033-03 02	30.97 32.54 34.32	(2)
Hidróxido de Calcio	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	P	Hexagonal	00-044-14 81	34.07	(3)
Trisulfo-aluminato de calcio	Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	E	Rombohedral	00-041-14 51	34.32	(4)

Referencias:(1) Mumme, W.G., Neves Jahrb 1995; (2) Jost u. A. (1982); (3) Martín K., Mc Carthy G. 1992; (4) Goetz Neunhoeffler and Neubauer 2006.

En la figura 41, mostramos la variación de la fracción relativa del silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) con el tiempo de endurecimiento; tanto para el cemento simple como para el cemento con TCP. En la misma figura, también incluimos la variación de la Portlandita, correspondiente a los dos tipos de cemento.

Del análisis de esta figura queda claro que tanto en el cemento simple como en el cemento con TCP (imágenes A y

B respectivamente), la fracción relativa del  $\text{C}_3\text{S}$  disminuye con el tiempo de endurecimiento. Esto se debe a que en esta etapa, el proceso de hidratación de este silicato prevalece, aunque a un ritmo menor, tendiendo a la saturación después de los 28 días, cuando la formación de la fase amorfa C-S-H ha concluido. [ídem 45]

Lo mismo sucede en ambos tipos de cemento con la fase cristalina Portlandita

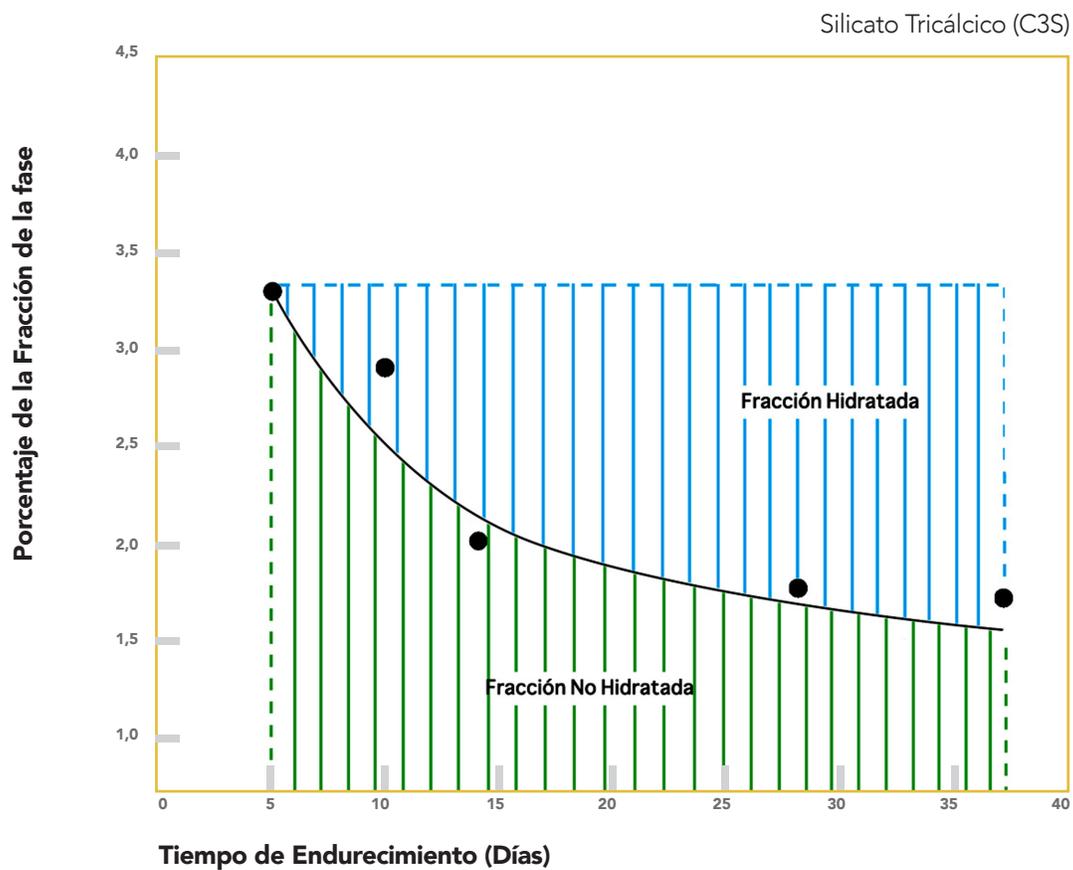
(Ca(OH)<sub>2</sub>). Por arriba de los 28 días se completa el proceso de transformación.

El silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), sigue un patrón parecido al silicato tricálcico.<sup>[idem 45]</sup> Como era de esperarse, este proceso de

saturación en la formación de las fases hidratadas, que son las que consolidan a la pasta de cemento, coincide con la saturación en el endurecimiento observado en ambos tipos de cemento (con y sin TCP).

A

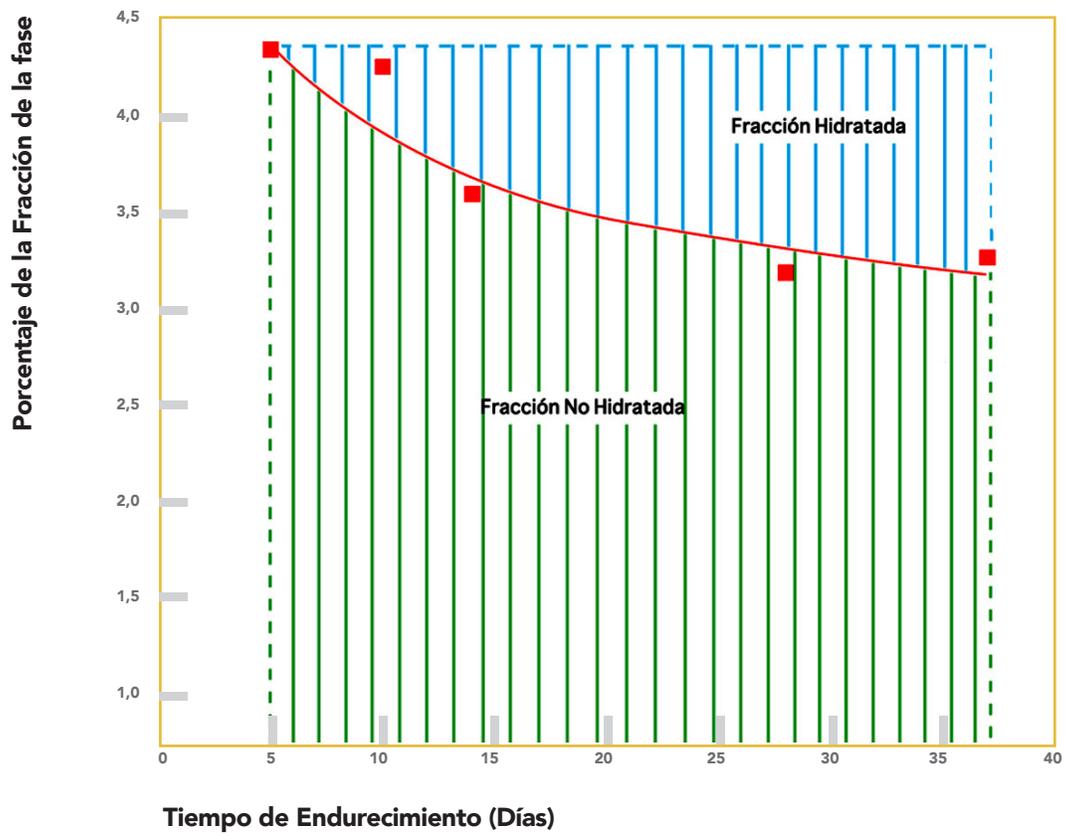
## Cemento Simple



B

## Cemento con TCP

Silicato Tricálcico (C3S)





### Cemento con TCP

Silicato Tricálcico (C3S)

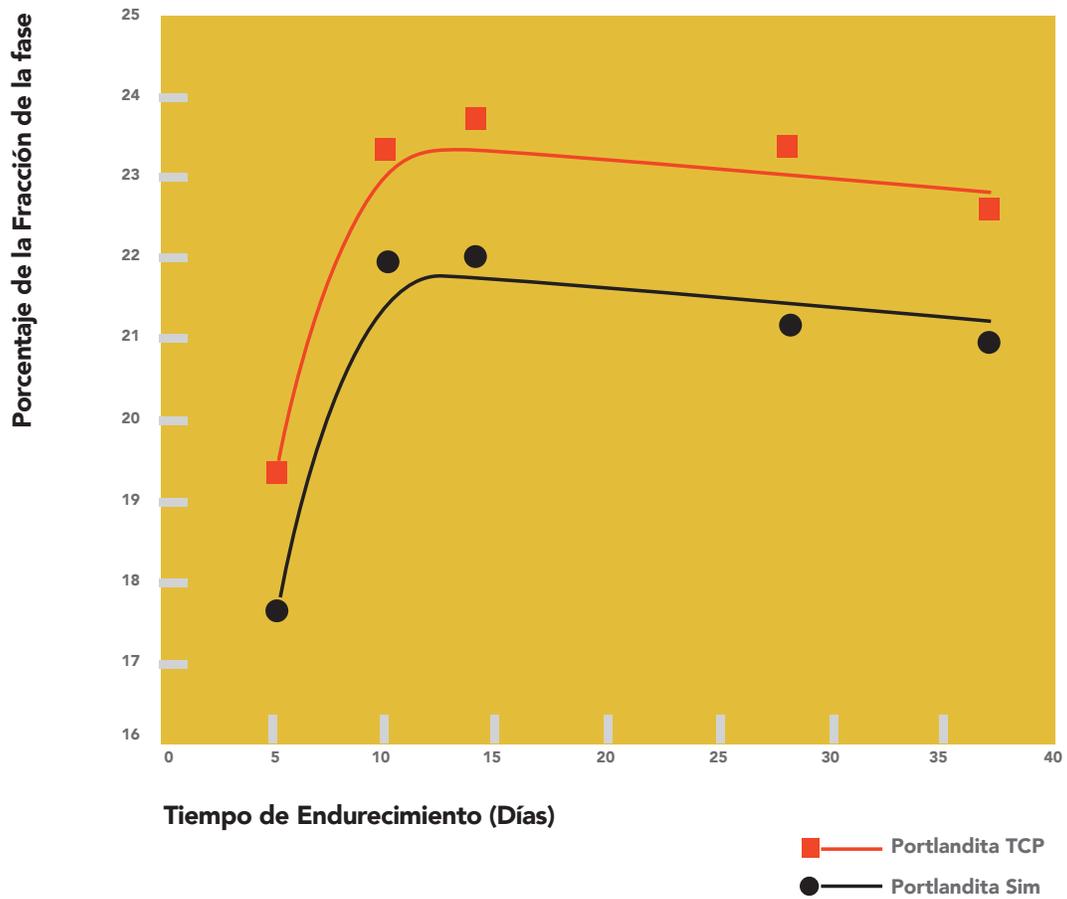


Figura 41. Variación de la fracción de silicato tricálcico con el tiempo de endurecimiento (imágenes A, B). Variación de la fracción de Portlandita con el tiempo de endurecimiento.

### 4.1.5 Espectroscopia Infrarroja (FTIR)

El empleo de la Espectroscopia Infrarroja (FTIR) para el estudio de la hidratación de cementos y concretos data de hace muchos años.<sup>[49,50]</sup> Básicamente se emplea para identificar las distintas fases minerales e hidratadas contenidas en los cementos a partir de las bandas asociadas a los modos vibracionales de los átomos enlazados formando; grupos funcionales que forman parte de esos

minerales. Sin embargo, aún existe muchas discrepancias en la asignación de bandas de absorción infrarroja asociada a los diferentes productos de hidratación del cemento.

En esta investigación se encontró que en ambos casos (cemento con y sin TCP), los espectros de FTIR están constituidos por bandas anchas que indican la presencia

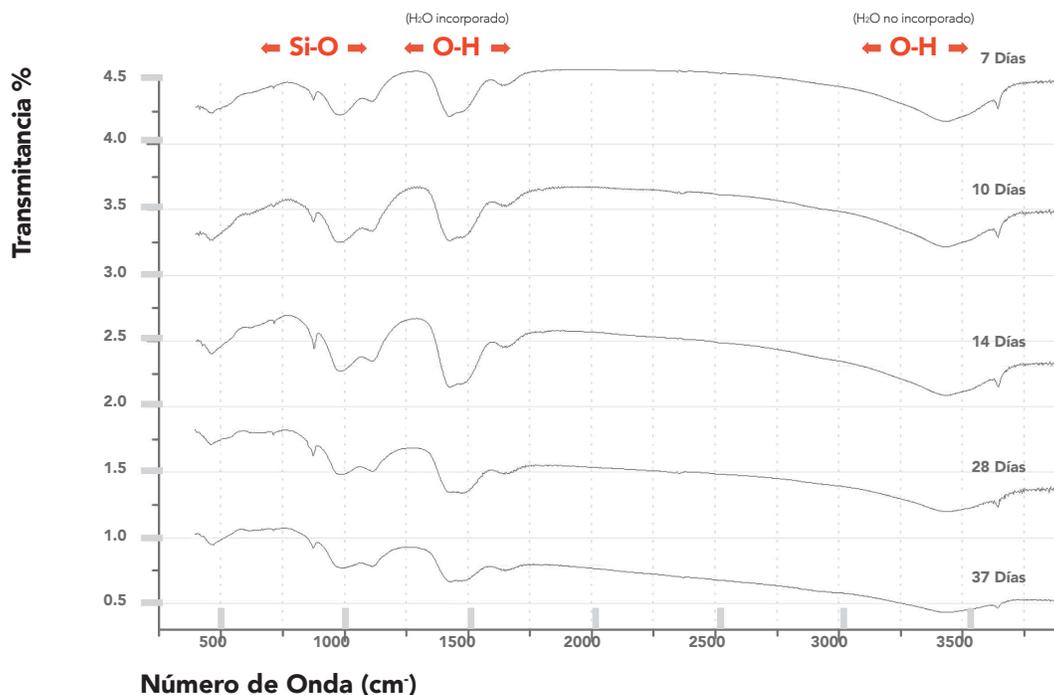


Figura 42. FTIR de cemento simple hidratado durante las diferentes etapas de endurecimiento. Se marcan las posiciones de las bandas asociadas a grupos funcionales de interés para la investigación.

de múltiples fases que evolucionan a ritmos diferentes durante la hidratación del cemento (Figuras 42, 43).

Por simplicidad, de acuerdo al modelo de partículas de CSH hidratadas propuesto por J. Allen<sup>[51]</sup>, figura 44, se realizó la interpretación de los espectros

infrarrojos. Cada región de la figura 44 se ha representado con la presencia de grupos funcionales que dan lugar a tres zonas en el espectro infrarrojo: la primera zona con modos vibracionales asociados a los enlaces Si-O de silicatos (intervalo 900-1000  $\text{cm}^{-1}$ ); la segunda zona con modos vibracionales asociados

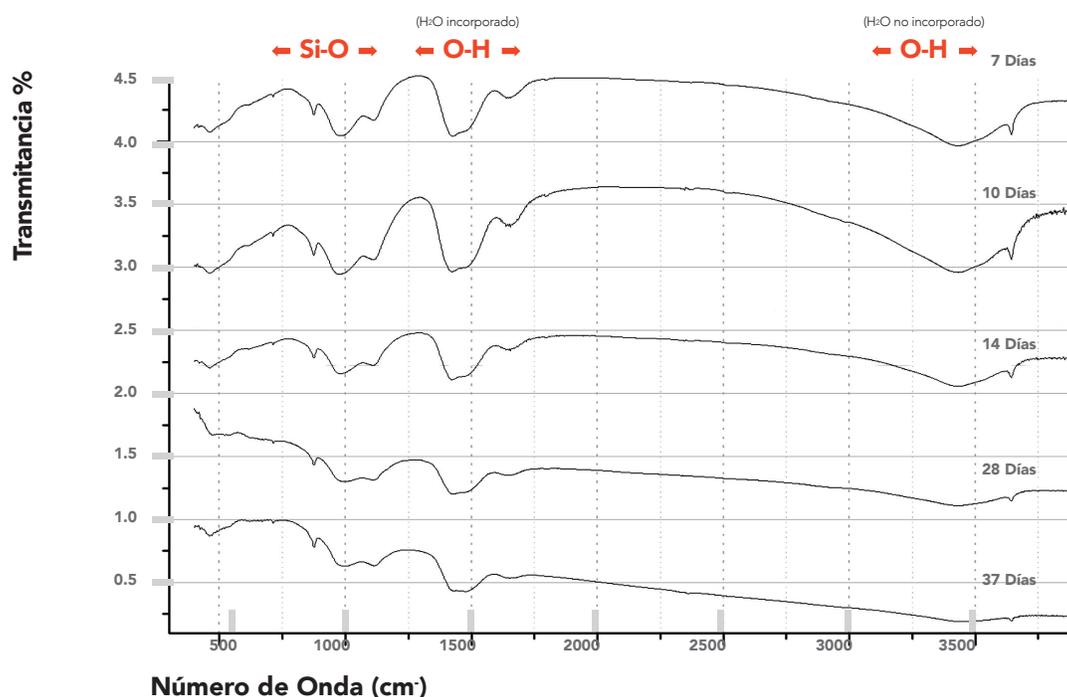


Figura 43. FTIR de cemento hidratado, con TCP de origen natural, durante las diferentes etapas de endurecimiento. Se observan bandas similares al espectro de cemento simple.

<sup>49</sup>. Vázquez, T. "Espectroscopía Infrarroja de algunos compuestos de interés en la química del cemento". Cuadernos de Investigación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1969.

<sup>50</sup>. S.N. Ghosh, S.K. Handoo. Infrared and Raman Spectral Studies in Cement and Concrete, (1980), Cement and Concrete Research, 10, 771-782.

a moléculas de agua y a modos vibracionales de moléculas de agua incorporadas en la red cristalina de las fases hidratadas (intervalo  $1400\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ )<sup>[52]</sup> y la tercera en estado capilar o parcialmente asociada a la estructura cristalina de los minerales (intervalo  $3200\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ ).<sup>[53]</sup>

Mediante un proceso de deconvolución de los espectros, es posible determinar los componentes de cada una de las bandas de un espectro infrarrojo, de este modo se puede rastrear la variación de cada una de ellas con el tiempo. Como ejemplo de este procedimiento, en la figura 45 se muestra el conjunto de componentes correspondientes al espectro tomado en la muestra de cemento simple con 7 días de endurecimiento. El programa empleado (Magic Plot) utiliza algoritmos

de ajuste de Gaussianas o Lorentzianas que sumadas reproducen un conjunto de picos.

En esta investigación se siguió la hidratación de los silicatos de calcio  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ , monitoreando la variación de la banda de  $949\text{ cm}^{-1}$  con el tiempo de endurecimiento. Esta banda esta asociada a modos vibracionales de enlaces Si-O en esos silicatos.<sup>[53]</sup> Este proceso de hidratación también se puede seguir de manera indirecta, monitoreando el ritmo de incorporación de las moléculas de agua a la red, cristalina o amorfa. Para esto empleamos la evolución de la banda de  $1645\text{ cm}^{-1}$  asociada a modos vibracionales del O-H en la red y la de  $3420\text{ cm}^{-1}$  que corresponde a vibraciones del O-H adsorbido o en sitios capilares de la pasta.<sup>[52]</sup>

---

<sup>51</sup>. J. Allen, J. Thomas, M. Jennings. Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement. *Nature Materials* 2007, Vol. 6, 311-316.

<sup>52</sup>. L. Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martin, L.M. Morales, S. Martínez-Ramírez. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials, in *Infrared Spectroscopy: Materials Science, Engineering and Technology*. T. Theophile ed. 25, April 2012, INTECH

<sup>53</sup>. H. Biricik, N. Sarier. Comparative Study of the Characteristics of Nano Silica, Silica Fume and Fly Ash Incorporated Cement Mortars. (2014) *Materials Research*, 17, 570-582.

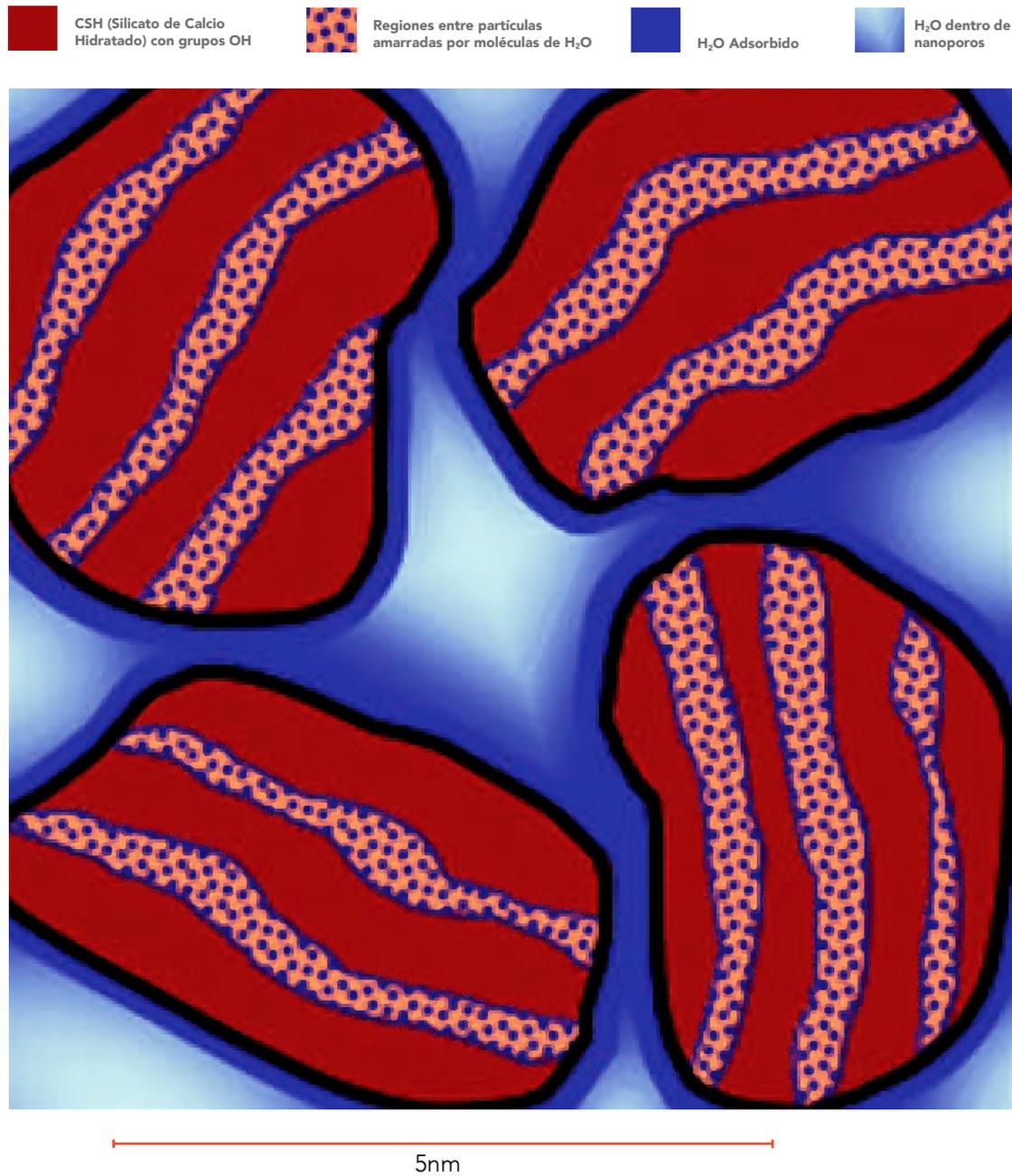


Figura 44. Representación esquemática de partículas de CSH (Silicato de Calcio Hidratado) con los diferentes tipos de H<sub>2</sub>O (agua) incorporados en su estructura durante los primeros estadios del proceso de hidratación. La identificación se hizo a través de técnicas de dispersión de alta resolución de neutrones y rayos X de bajo ángulo.<sup>[51]</sup>

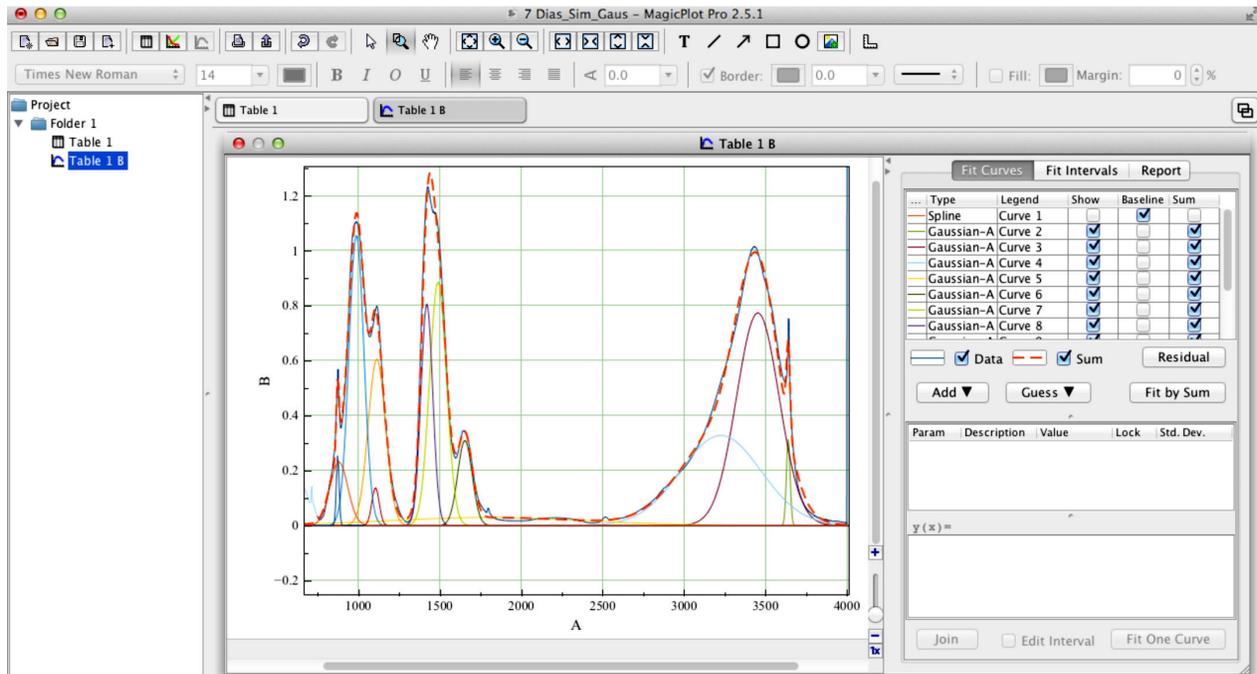


Figura 45. Deconvolución del espectro de 7 Días de Endurecimiento de Cemento Simple.

La figura 46 da cuenta de la evolución de la banda de  $949\text{ cm}^{-1}$  con el tiempo de endurecimiento. Como era de esperarse, su intensidad disminuye con el tiempo y como en el caso de los rayos X, parece

llegar también a un punto de saturación cuando se alcanza el endurecimiento máximo de ambas pastas de cemento, con y sin TCP.

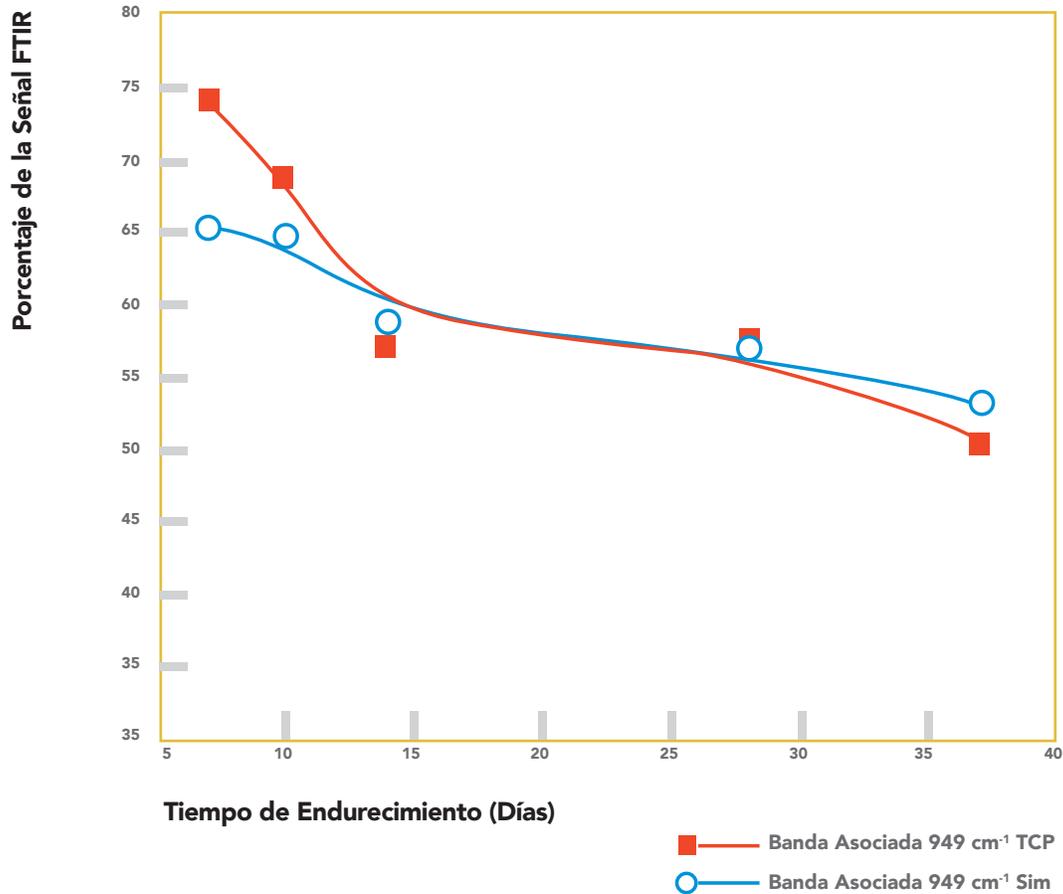


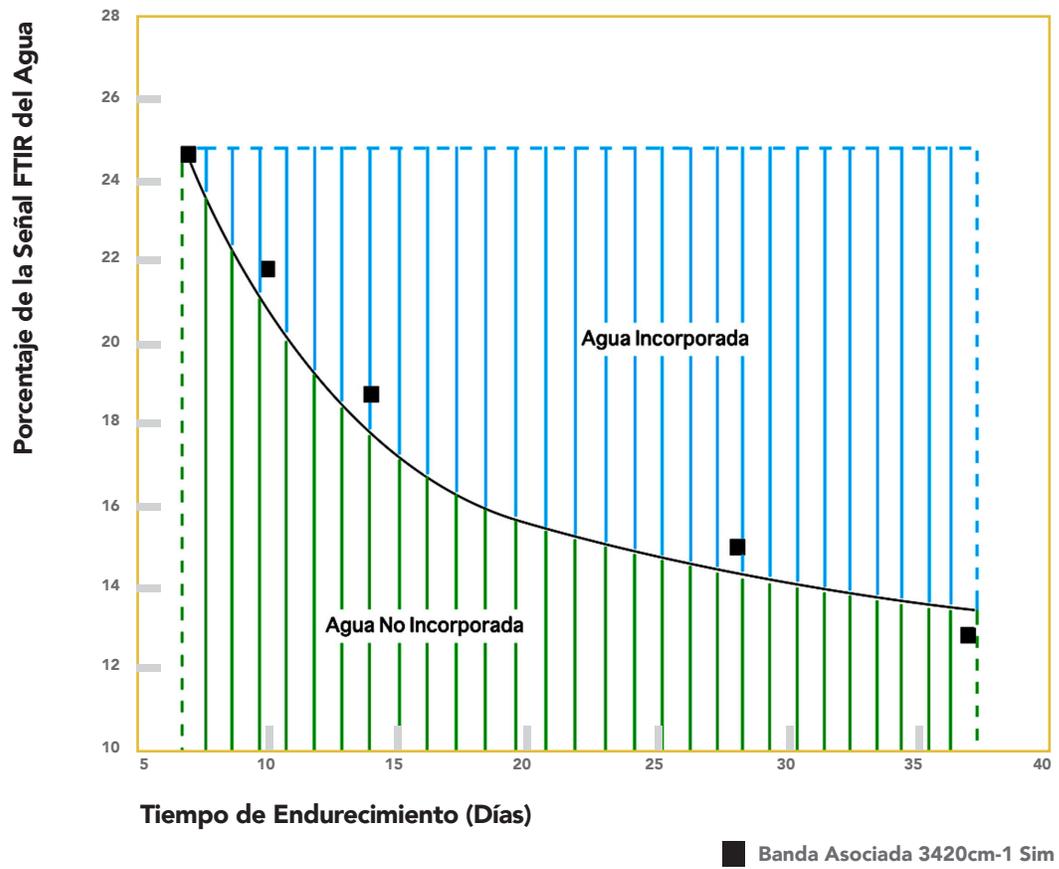
Figura 46. Evolución de la banda de 949 cm<sup>-1</sup> asociada a modos vibracionales de los silicatos de calcio C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S.

En cuanto a la banda asociada al agua adsorbida o en sitios capilares, la de 3420 cm<sup>-1</sup>, también se observa una disminución continua en su intensidad, tendiendo a la saturación con el tiempo en ambos tipos de pasta de cemento

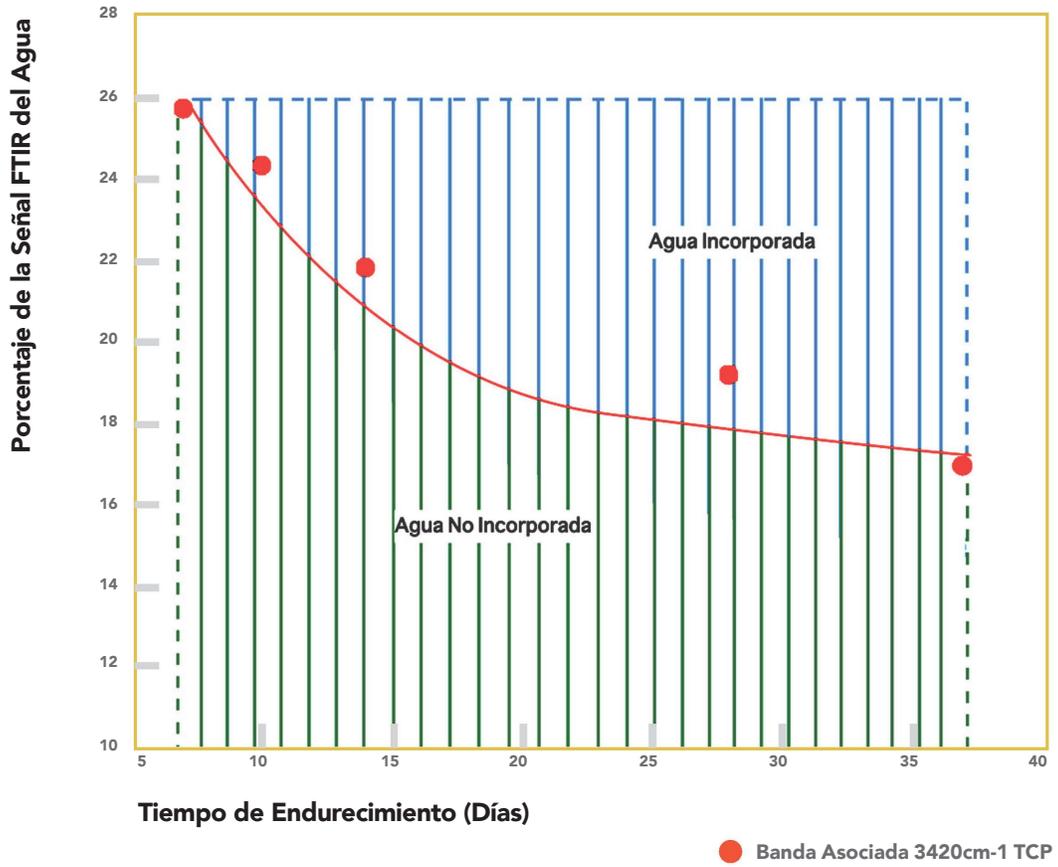
(figura 47 A y B). Por el contrario, la fracción de agua incorporada en la red, crece continuamente hasta alcanzar la estabilización aproximadamente a los 15 días (figura 47 C).

A

Cemento Simple



**B** Cemento con TCP



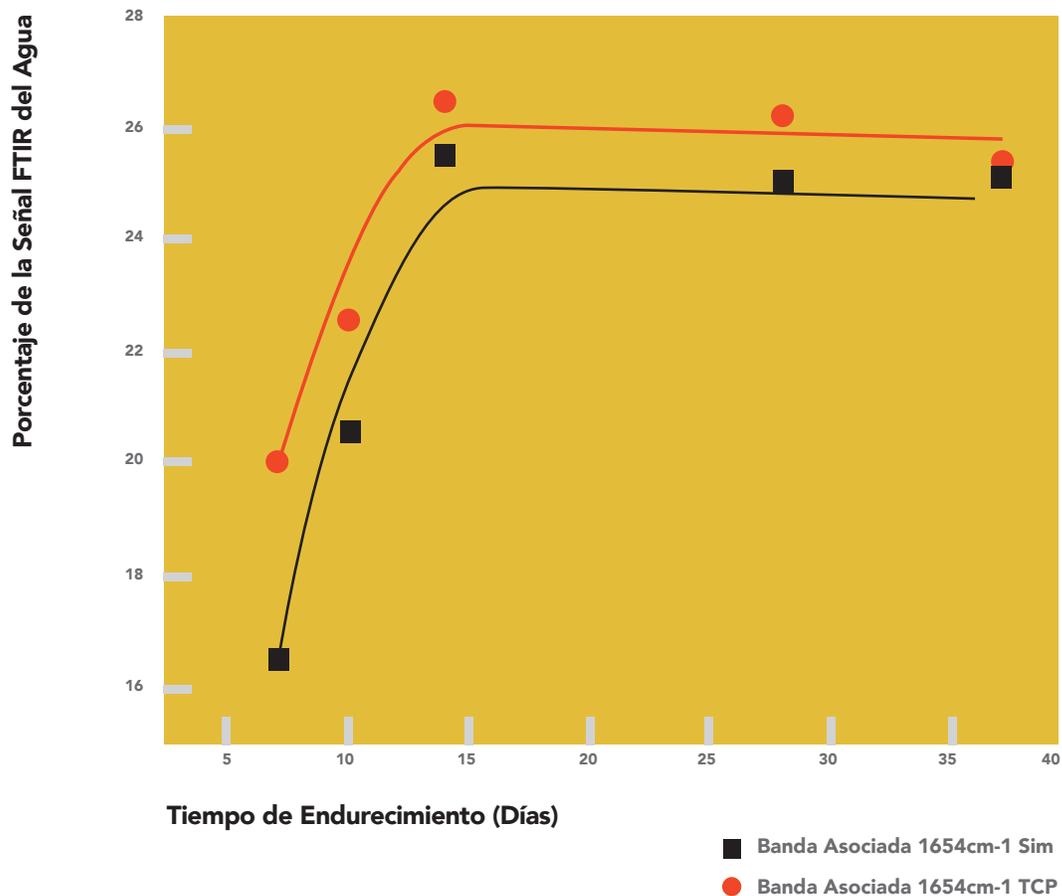


Figura 47. Evolución de las bandas de 3420 y 1654 cm<sup>-1</sup> con el tiempo de endurecimiento. La primera asociada a agua adsorbida o en sitios capilares y la segunda a modos vibracionales del agua incorporada en la red.

Estos resultados concuerdan con lo observado en las curvas de resistencia mecánica a la fractura en compresión, al parecer el proceso de endurecimiento

se estabiliza por arriba de los 15 días en ambos tipos de pasta de cemento como consecuencia de la saturación del proceso de hidratación de los silicatos.

Solo agregaremos que en conjunto, las bandas ajustadas a los espectros infrarrojos que obtuvimos en este estudio, ocupan esencialmente las mismas posiciones para ambos tipos de pasta de cemento (con y sin TCP), solo se observan variaciones en sus intensidades relativas. Es decir, la adición de partículas sub-micrométricas de TCP no genera grupos funcionales adicionales a los detectados en el cemento simple. Sin embargo, en la fase hidratada de

los silicatos (CSH), a nivel nanométrico, podrían estar presentes grupos con iones de fósforo incorporado y tal vez algunas otras estructuras amorfas adicionales generadas alrededor de las partículas TCP. Para averiguar esto, se tendría que hacer un estudio detallado de las zonas hidratadas de las pastas mediante técnicas espectroscópicas de alta resolución espacial, como por ejemplo, la microscopía Raman.

#### 4.1.6 Resistencia Mecánica: Caso Wollastonita

La Wollastonita es un mineral natural que en la industria del cemento, se usa principalmente como material puzalónico agregado al Cemento Portland convencional. Recientemente se ha venido explorando su posible aplicación como material sustituto de los cementos convencionales, debido a su capacidad cementante y a su bajo costo.<sup>[54]</sup>

También se ha encontrado que al agregarla en forma de fibras micrométricas (superior al 10% en peso) a productos

hechos de cemento como morteros y concretos, la resistencia a la fractura se incrementa considerablemente.<sup>[55]</sup>

En esta investigación se empleó wollastonita como aditivo en forma de partículas submicrométricas que se obtuvieron mediante la molienda del mineral natural. La intención era explorar si el efecto de endurecimiento detectado en los cementos con partículas de TCP también se presentaba en este caso.

---

<sup>54</sup> . Ransinchung GD, Kumar V. Investigations on Pastes and Mortars of Ordinary Portland Cement Admixed with Wollastonite and Microsilica 2009.

<sup>55</sup> . V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, B. Mobasher. Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites, 2014.

En la figura 48 se muestran los resultados experimentales obtenidos a partir de pruebas de compresión hechas en muestras de cemento simple y con partículas submicrométricas de Wollastonita. Claramente, como en el caso del TCP, las probetas con Wollastonita muestran niveles de endurecimiento superiores a los del cemento básico, así

que, podemos suponer que en este caso operan procesos de endurecimiento similares a los generados por las partículas de TCP, dada la pequeña cantidad de aditivo agregado al cemento ( $\approx 1\%$  peso de partículas de Wollastonita). El análisis mediante técnicas espectroscópicas y de microscopía se ha dejado para investigaciones posteriores.

### Proceso de Endurecimiento Cemento Basico y Wollastonita

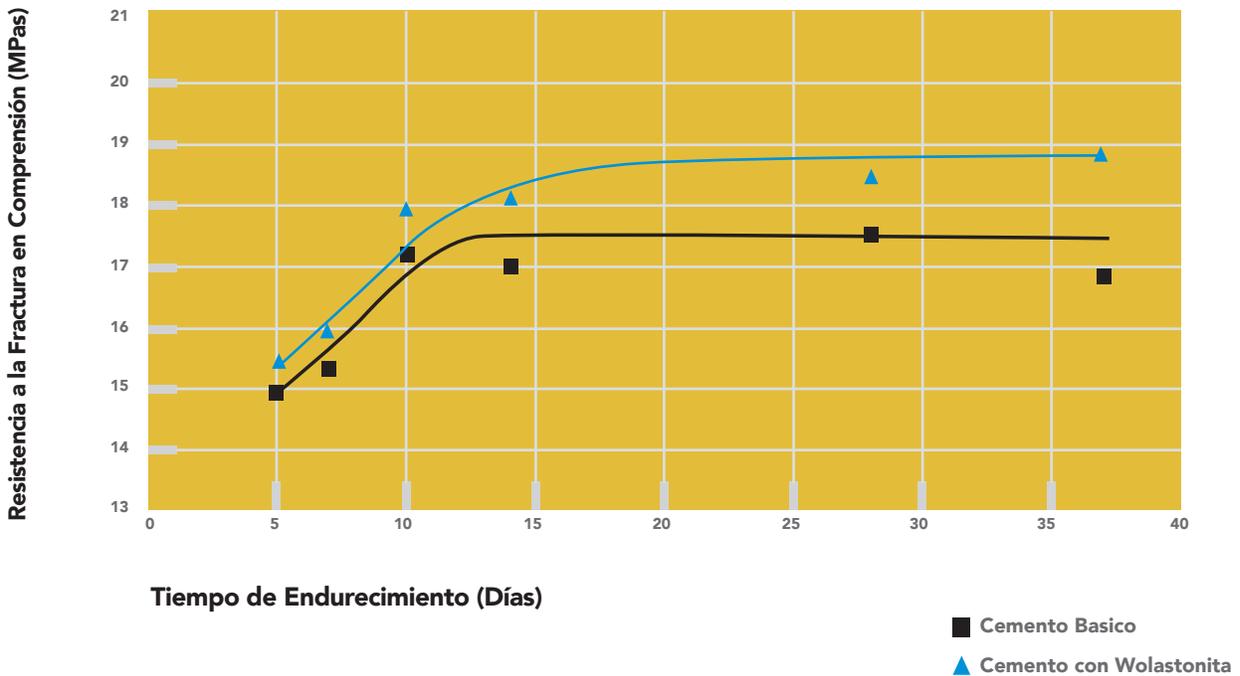


Figura 48. Resistencia mecánica de pastas de cemento simple y cemento con partículas submicrométricas de Wollastonita, en ambos casos se utilizó agua potable de la red para preparar la pasta.

## 4.2 Discusión de Resultados

Las líneas de investigación más relevantes asociadas a la nano-modificación de materiales para la construcción basados en cemento, involucran el empleo de nano-cerámicas y/o nanotubos de carbón.<sup>[20]</sup>

A su vez, las nano-cerámicas que se emplean en este proceso pueden ser inertes o activas. Las primeras solo tienen la función de rellenar las cavidades que se forman durante el fraguado de la pasta de cemento y las segundas influyen en el proceso de hidratación y/o en el desarrollo de la microestructura de la pasta, esta última, está íntimamente relacionada con su resistencia mecánica. A este procedimiento de modificación de pastas de cemento, se le conoce también como "Siembra de nano-partículas activas". Para entender el efecto que las nano-partículas activas tienen en la modificación de las pastas de cemento, a continuación presentamos una descripción breve del proceso de consolidación del cemento al mezclarlo con agua.

En general, el proceso de consolidación de las mezclas de cemento con agua (pasta de cemento) consta de dos etapas, el fraguado y el endurecimiento. Durante

el fraguado, la hidratación de las partículas de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) o alita, sucede en periodos que van de minutos a horas.

En las partículas de alita mostradas en la figura 48 poli-cristalinas, se observa una distribución heterogénea de sitios alta y baja reactividad, es decir, con alta y baja energía inter-facial (figura 49). Por este motivo, cuando la partícula de alita se pone en contacto con agua, las primeras zonas hidratadas se distribuyen de manera discontinua sobre su superficie (imagen b). Los sitios de baja reactividad inicial se empiezan a disolver, en general en fronteras de grano o dislocaciones que emergen a la superficie, en este momento el ritmo de hidratación crece considerablemente, aquí, se empiezan a formar los núcleos de CSH (silicato de calcio hidratado) y CH (hidróxido de calcio). A partir de este punto, el fraguado de la mezcla cemento-agua se acelera.

Durante el endurecimiento (periodos de días) el ritmo de hidratación de la alita disminuye y compite con la hidratación del silicato dicálcico ( $C_2S$ ) o belita. En conjunto, la hidratación de la alita y la belita llevan a la pasta de cemento de un estado viscoelástico moldeable a un

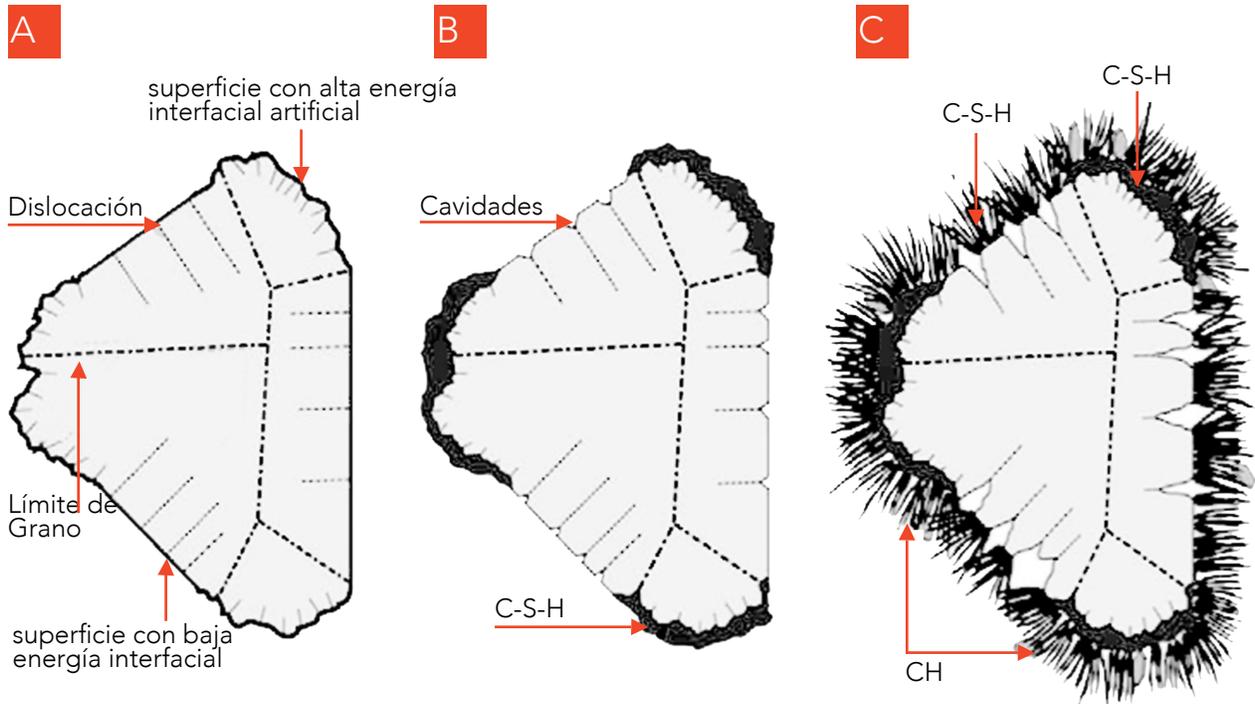


Figura 49. Representación esquemática del proceso de hidratación de una partícula de silicato tricálcico o alita. <sup>[57]</sup>

estado de consolidación que le permite actuar como material estructural de carga.

Como ya mencionamos, la consolidación (fraguado y endurecimiento) de las pastas de cemento puede ser alterado

fácilmente con la siembra de nano-partículas cerámicas activas. Por ejemplo, la "siembra" de nano-partículas de CSH (< 4% en peso) modifica notablemente la microestructura de la alita y de la pasta de cemento. <sup>[58]</sup>

<sup>56</sup> . Michael Kutschera, Luc Nicoleau, and Michael Bräu. Nano-optimized construction materials by nano-seeding and crystallization control. In Nanotechnology in Civil Infrastructure. Michael Kutschera, Luc Nicoleau, and Michael Bräu (Eds.) Springer, pp. 175-205

<sup>57</sup> . Patrick Juilland , Emmanuel Gallucci , Robert Flatt , Karen Scrivener. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. (2010), Cement and Concrete Research, 40, 831-844.

<sup>58</sup> . J. J. Thomas, H. M. Jennings, J. J. Chen. Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement. (2009), J. Phys. Chem C, 113, 4327-4334.

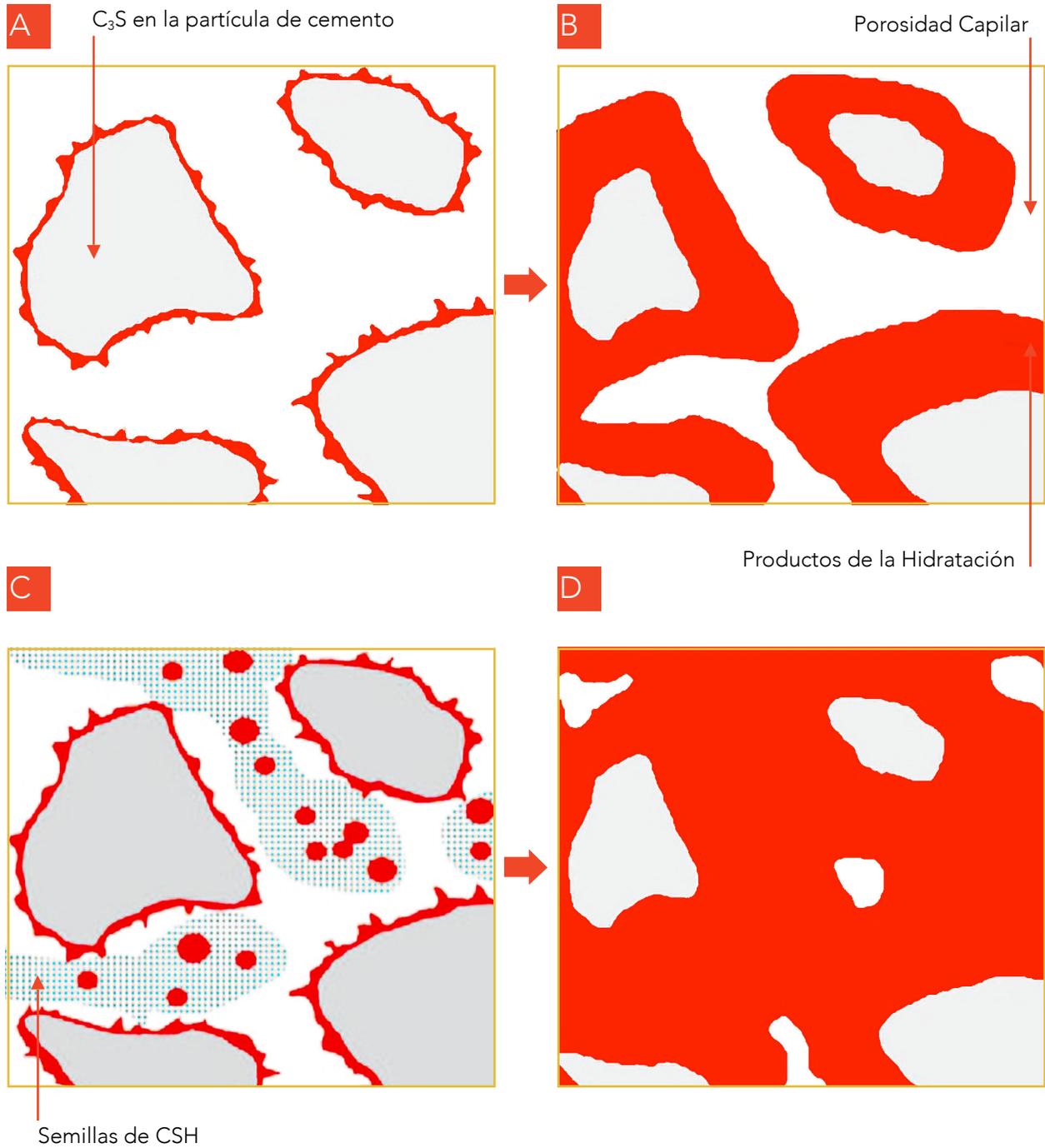


Figura 50. Representación esquemática de la hidratación de la alita o cemento con y sin la "siembra" de nano-partículas de C-S-H.<sup>[idem58]</sup>

El inicio de la hidratación se da como ya se describió arriba, conforme esta avanza, se forma la fase amorfa CSH que da lugar a el "amarre" paulatino de los granos de alita y belita, sin embargo, el volumen ocupado por los productos de hidratación es inferior al que inicialmente ocupa la mezcla de cemento con agua, en consecuencia, al final, el material consolidado presenta inevitablemente un cierto porcentaje de cavidades y poros que afectan la resistencia mecánica de la pasta (imagen a y b de la figura 50). Por otro lado, la "siembra" de nano-partículas de CSH,

además de acelerar la reacción, da lugar a una distribución mas homogénea y abundante de los productos de hidratación (imágenes c y d de la figura 50). Como consecuencia de esto, el porcentaje de poros y cavidades es menor lo que se traduce en una mayor resistencia a la compresión de la pasta.

Los resultados experimentales de esta investigación indican que es muy probable que se este en el caso de cementos modificados por la "siembra de nano-partículas cerámicas activas, en este caso de TCP y Wollastonita, ya que:

Alamezcla de Cemento Portland Ordinario, le agregamos partículas sub-micrométricas obtenidas por la molienda de minerales naturales de TCP y Wollastonita, en proporciones del 1% en peso.

En ambos casos la resistencia mecánica a la compresión de probetas de cemento con TCP y Wollastonita es superior a la de las probetas fabricadas con cemento simple.

El análisis por microscopía óptica y electrónica indican que en las muestras

con TCP la distribución de productos de hidratación es mas abundante y homogénea.

Los análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR) y por difracción de rayos X (DRX) no indican la presencia de fases adicionales a las esperadas durante el proceso de fraguado y endurecimiento de las pastas, aunque no descartamos la presencia de diferentes tipos de hidratos de CSH a nivel nano-métrico.

Adicionalmente, se encontro que es posible usar materiales de origen natural para incrementar la resistencia del

Cemento Portland Ordinario mezclado con agua potable de la red.

# Conclusiones

---

El análisis de los resultados de la presente investigación nos lleva a las siguientes conclusiones:

■ La adición de partículas sub-micrométricas de TCP y Wollastonita de origen natural en proporciones del 1% en peso, a cemento portland ordinario y agua potable de la red, incrementa su resistencia mecánica en compresión por arriba del 10% con respecto a la pasta de cemento sin aditivos.

■ El análisis mediante microscopía óptica y electrónica de barrido de la microestructura de las pastas preparadas con partículas de TCP, indica que se obtiene una distribución más homogénea y más abundante de

los productos de hidratación a lo largo de la muestra.

■ El análisis de las muestras de pasta de cemento con y sin partículas de TCP mediante difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja, indica que en ambos casos se genera el mismo tipo fases cristalinas y amorfas, es decir, no se observan fases adicionales que pudieran ser detectadas mediante estas técnicas. Con ello, aparentemente los aditivos se incorporan a la pasta de cemento sin reaccionar con el cemento.

■ Los resultados experimentales anteriores indican que es muy probable que el aditivo genere el relleno de cavidades dentro de su microestructura, por medio de la “siembra de nanopartículas cerámicas activas”, en este caso de TCP y Wollastonita.

■ El empleo de materiales naturales para preparar las partículas submicrométricas de TCP y Wollastonita y de agua potable de la red hacen económicamente competitivo el procedimiento para obtener pastas de cemento con mayor resistencia mecánica a la compresión.

■ El uso de aditivos en ocasiones es prácticamente necesario en la elaboración de concretos, pues se requieren por condiciones de temperatura o por una rápida ejecución en la obra.

■ La relación agua cemento es el principal factor que se debe cuidar en el diseño de mezclas, ya que afecta de manera directa, teniendo efectos negativos sobre el  $f'c$  (resistencia a la

compresión) de diseño, así como las condiciones futuras del concreto.

■ Un factor muy importante a tomar en cuenta es la temperatura ambiental y la humedad relativa para el fraguado del concreto, ya que afectan directamente a la mezcla. En la realización de esta investigación no se estudio el efecto de fraguado, lo cual es un factor a considerarse en futuras investigaciones.

■ Los estudios se realizaron a la edad de 5, 7, 14, 28 y 37 días para conocer sus características y el desarrollo de resistencia en función del tiempo en que el cemento alcanza su máxima resistencia.

De acuerdo con el estudio correspondiente al análisis experimental del uso de Fosfato Tricálcico (TCP) como aditivo para incrementar la resistencia mecánica del cemento y en base a los resultados obtenidos, se dan a conocer propuestas prácticas en la cuales se pretende establecer casos de aplicación que puedan implementarse a través de esta investigación.

## Interpretación Práctica A

■ El uso de aditivos en el concreto, como lo es el TCP, puede conseguir reducir el tiempo de decimbrado en las obras de construcción; ya que se espera alrededor de 28 días para quitar la cimbra, lo cual económicamente en tiempo de ejecución puede beneficiar al sector de la construcción.

En relación a los resultados que se obtuvieron en la fase experimental (Ver Figura 51) se pudo observar que la resistencia en el caso de TCP así como en el de la Wollastonita, desde los primeros días presentan una resistencia superior al cemento tradicional, lo cual puede aprovecharse para quitar la cimbra desde los 14 días aproximadamente.

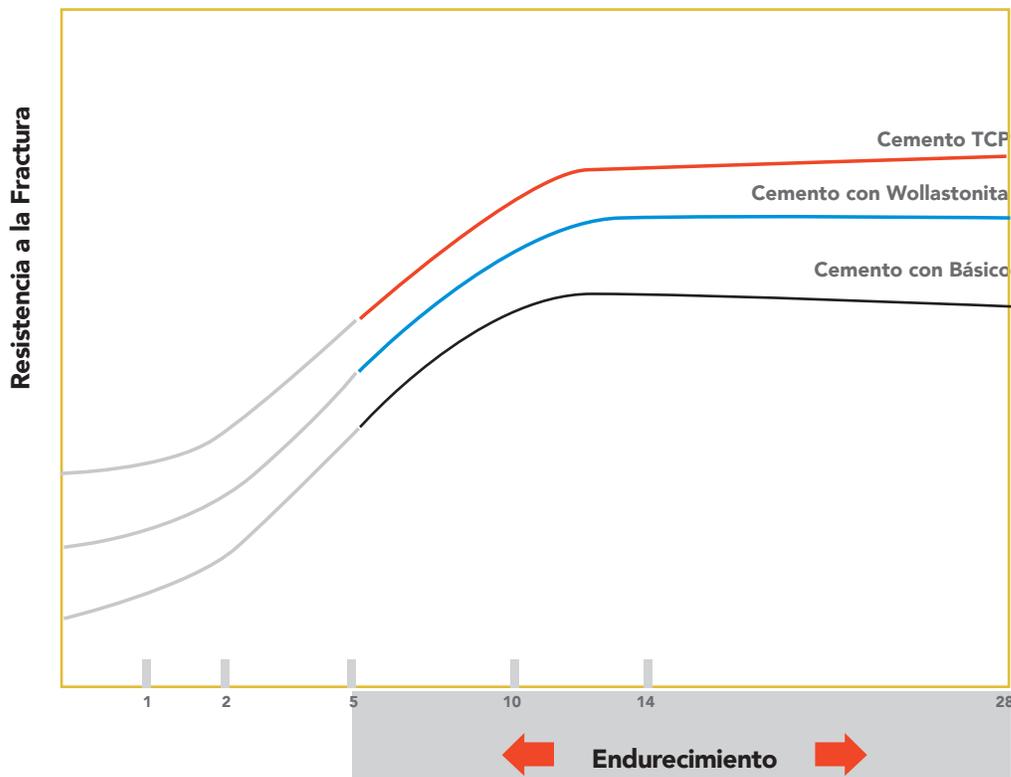


Figura 51. Evolución del periodo de endurecimiento de cemento básico con respecto a los cementos con TCP y Wollastonita.

## Interpretación Práctica B

Los elementos de concreto, se emplean en la actualidad debido a que son durables a largo plazo, en algunos casos pueden disipar calor o disminuyen secciones estructurales lo cual hace que los elementos constructivos sean adaptables en el diseño del espacio. Y los factores involucrados en el diseño de los elementos constructivos son: el factor de carga, propiedades mecánicas del concreto (compresión y flexión principalmente), configuración de cargas (horizontales y/o verticales) y posibles deformaciones en la estructura como lo son agrietamientos o fisuras.

En el caso de esta investigación el factor que se investigo fue el de las propiedades mecánicas, en pastas de cemento por ser un material principal en el diseño de las mezclas. En este diseño intervienen los factores de compresión ( $f'c = 100\text{kg/cm}^2$ ,  $150\text{kg/cm}^2$ ,  $200\text{kg/cm}^2$ ,  $300\text{kg/cm}^2$ , etc.) que dependen estrechamente de la materia prima que es el cemento, de aquí el interés por investigar elementos que puedan modificar las propiedades mecánicas. El cemento es un material que seguirá utilizandose y por el momento la alternativa viable para disminuir el impacto ambiental que provoca es crear aditivos que aumenten la resistencia mecánica del material y así procurar reducir el consumo de este en la construcción.

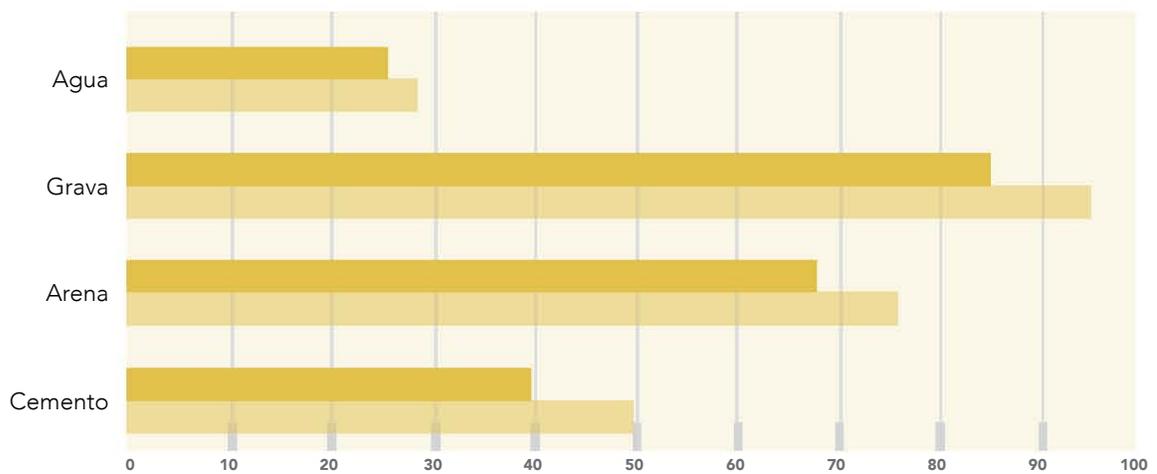
Para modificar el factor de resistencia en las mezclas de concreto es necesario conocer la microestructura del cemento así como las diferentes reacciones que se producen durante el periodo de hidratación. En este trabajo se planteó aumentar la resistencia del cemento, como etapa inicial y observar en que contribuye la modificación de dicha resistencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos por las pruebas de esfuerzo-deformación (ver capítulo de análisis y discusión de resultados, pruebas de deformación a la fractura) en la cual el aumento es de un 10% en relación a una pasta de cemento simple, se estima que esta disminución pueda verse reflejada en una mezcla que ya contenga los agregados (arena y grava).

Se muestra a continuación la relación que tendría que emplearse:

Por ejemplo si se pretende obtener una resistencia a la compresión de  $200\text{ kg/cm}^2$ , la relación de los materiales es la siguiente: 50 kg. de cemento, 4 botes de arena (76 lts.), 5 botes de grava (95 lts.) y  $1\frac{1}{2}$  botes de agua (28.5 lts.). Si se emplea la disminución del 10%, que es la resistencia que se obtiene al agregarle TCP al cemento, disminuye el consumo del cemento como de los agregados e inclusive del agua. (ver figura 52)

### Comparación de Mezclas de Concreto con Cemento Basico y Cemento TCP



	Cemento	Arena	Grava	Agua
Cemento con TCP	40 kg.	68 Lts.	85 Lts.	25.5 Lts.
Cemento Basico	50 kg.	76 Lts.	95 Lts.	28.5 Lts.

Figura 52. Gráfica comparativa de mezclas de concreto con un cemento básico y uno con cemento adicionado con TCP. En la cual se disminuye el 10% de la cantidad de cemento como en los agregados debido a que existen mayor resistencia a la fractura con mezclas adicionadas con TCP.

El costo por kilogramo de Fosfato Tricalcico es alrededor de 40 pesos y de la wollastonita es de 80 pesos. Como se describió en el capítulo de Procedimiento Experimental, se opto por TCP, ya que es el de menos costo en el mercado.

Pero si se consume un saco de cemento que tiene 50 kg. se consumen 50 gramos de aditivo. Por lo tanto si se consume el cemento con el aditivo el precio por saco seria alrededor de \$122 pesos con fosfato tricalcico y \$124 pesos empleando wollastonita. Estos planteamientos se diseñaron contemplando que el efecto del endurecimiento se presente también en morteros como en concretos.

Los casos de estudio planteados con anterioridad nos hace suponer que el adicionar Fosfato Tricálcico en el cemento, puede ser un elemento viable para contrarrestar los efectos que tiene este material en la actualidad, como lo son el impacto al medio ambiente por la cantidad de emisiones que se generan para producir este material. El continuar con investigaciones en las cuales se estudien los efectos de este mineral con la adición de morteros y concretos permitiran en un futuro diseñar mezclas que proporcionen efectos que sigan contribuyendo a la construcción sin generar la demanda de más recursos para producir este material.

## Recomendaciones

- Para completar el presente estudio, será necesario investigar el efecto de la adición de este tipo de partículas durante las primeras horas de hidratación de las pastas de cemento.
- Se puede extender este estudio y sus métodos, al caso de otros productos de cemento como morteros y concreto, así como explorar el efecto de la adición de otro tipo de partículas de origen natural que puedan o no reaccionar con iones de calcio y silicio en presencia de agua.
- Desarrollar un proceso de molienda industrial de este tipo de minerales que genere partículas sub-micrométricas a bajo costo.
- De los resultados obtenidos también surgen preguntas que permiten plantear líneas de investigación básicas que en esencia, forman parte del ámbito de la Ciencia e Ingeniería de Materiales.
- Es muy importante realizar el análisis de los agregados y tener conocimiento de sus características físicas y mecánicas, debido a que depende de la región de donde se obtienen estos agregados si se modifica el diseño de la mezcla.
- Es conveniente tener conocimiento de la temperatura y de la humedad relativa y aplicar en investigaciones posteriores (morteros o concretos) el curado que sea más conveniente dependiendo de las condiciones climáticas, ya que estas afectan de manera directa.
- Para continuar realizando investigaciones que refuerzen a la Arquitectura, se deben implementar pruebas de laboratorio que se apeguen a las normas y procesos vigentes en todas y cada una de las mezclas para lograr resultados óptimos y tener un criterio más certero que refuerze el aprendizaje para futuros arquitectos.
- Finalmente es necesario crear conciencia en la responsabilidad que tiene el arquitecto en promover el uso de materiales, debido a que en muchas ocasiones la construcción depende de diagnósticos interdisciplinarios para dar respuesta a las anomalías que pudiesen presentarse.

# Bibliografía

---

## Artículos Científicos

1. C. Adnan, (2003). Characteristic of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 585-593.
2. Aranda, De la Torre, Rietveld Quantitative Phase Analysis of OPC Clinkers, Cements and Hydration Products, 2012.
3. Barret, P.; Bertrandie, D. J. *Chim. Phys.* 1986, 765-775.
4. Barret, P.; Mene 'trier, D.; Bertrandie, D. *Cem. Concr. Res.* 1983, 13, 725-738.
5. Cardenas, A., I. Higuera-Ciapara, and Goycoolea, F. M. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution, *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, Vol 3., pp. 152-159
6. Carino, N. J., and Clifton, J. R., (1991). Prediction of cracking in reinforced concrete structures High-Performance Concrete: Research Needs to Enhance its Use, *Concrete International*, September. Vol. 2, pp. 25-36
7. Chandra, S. and Aavik, J. (1983). Influence of Black Gram (natural organic

material) additions as admixture in cement mortar and concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.13, pp. 423- 430.

8. C.P. Huang., *The Chemistry and Physics of Nano-Cement*, Maile Aiu Loyola Marymount University, 11 de Agosto de 2006.

9. C. Suryanarayana, M. Grant Norton. *X-Ray Diffraction, A Practical Approach*, New York, 1998.

10. H. Biricik, N. Sarier. Comparative Study of the Characteristics of Nano Silica, Silica Fume and Fly Ash Incorporated Cement Mortars. (2014) *Materials Research*, 17, 570-582.

11. I.G. Richardson. The calcium silicate hydrates. (2008), *Cement and Concrete Research*, 38, 137- 158.

12. Jewet S. *Física II: Texto Basado En Cálculo*; México, Ed. Thomson; 2004.

13. Jiang, S. P.; Mutin, J. C.; Nonat, A. *Cement and Concrete Research*. 1995, 25 (4), 779.

14. J. J. Thomas, H. M. Jennings, J. J. Chen. Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement. (2009), *J. Phys. Chem C*, 113, 4327-4334.

15. J. Péra, J. Ambroise, and M. Chabannet, *Transformation of Wastes into Complementary Cementing*

*Materials*, p. 459. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP199, ACI, Volume 2. 2001.

16. K.L. Scrivener, T. Fullmann, E. Gallucci, G. Walenta, E. Bermejo. Quantitative study of Portland cement hydration by X, (2004), *Cement and Concrete Research*, 34, 1541-1547.

17. Kosmatka, Steven H., *Portland Blended and Other Hydraulic Cements*, IS004, Portland Cement Association, 2001.

18. L. Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martin, L.M. Morales, S. Martínez-Ramírez. *Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials*, in *Infrared Spectroscopy: Materials Science, Engineering and Technology*. T. Theophile ed. 25, April 2012, INTECH.

19. Liu X, Ding C. Mechanism Of Apatite Formation On Wollastonite Coatings In Simulated Body Fluids. *Biomater*. 2004;25(10):1755-1761.

20. Michael Kutschera, Luc Nicoleau, and Michael Bräu. Nano-optimized construction materials by nano-seeding and crystallization control. In *Nanotechnology in Civil Infrastructure*. Michael Kutschera, Luc Nicoleau, and Michael Bräu (Eds.) Springer, pp. 175-205.

21. Michele R.Derrick Dusan Stulik James M. Landry. *Infrared Spectroscopy in*

Conservation Science. The Getty Conservation Institute Los Angeles. USA. 1999.

**22.** Nehdí M., Duquette J. y El Damatty A., (2003). Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1203-1212.

**23.** Nonat, A.; Mutin, J. C. Proceedings of the international RILEM Workshop on Hydration and Setting, July 1991; Nonat, A., Mutin, J. C., Eds.; E & FN SPON: London, 1992; pp 171- 191.

**24.** Okamura, H. (1997). Self-Compacting High Performance Concrete, *Concrete International*, American Concrete Institute, Vol. 19, No. 7, pp. 50-54.

**25.** Patrick Juilland , Emmanuel Gallucci , Robert Flatt , Karen Scrivener. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. (2010), *Cement and Concrete Research*, 40, 831-844.

**26.** Ransinchung GD, Kumar B, Kumar V. Investigations on Pastes and Mortars of Ordinary Portland Cement Admixed with Wollastonite and Microsilica 2009.

**27.** RILEM Committee 68-MMH, Task Group 3 Rev. Mater. Constr. 1977, 102 (17), 457-468.

**28.** S.N. Ghosh, S.K. Handoo. Infrared and Raman Spectral Studies in Cement and Concrete, (1980), *Cement and Concrete Research*, 10, 771-782.

**29.** Tang, Fulvio J., Optimization of Sulfate Form and Content, *Research Department Bulletin RD105*, Portland Cement Association, 1992.

**30.** V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, B. Mobasher. Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites, 2014.

**31.** Wang A., Zhang Ch., Sun W., (2003). Fly ash effects. The active effects of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 2057-2060.

**32.** Washa, George W., y Wendt, Kurt F., "Fifty Year Properties of Concrete (50 Años de Propiedades del Concreto)." *ACI Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Enero 1975, pags. 20 a 28.

**33.** Wood, Sharon L., Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete (Evaluación a Largo Plazo de las Propiedades del Concreto), *Research and Development Bulletin RD102*, Portland Cement Association, 1992, 99 páginas.

## Tesis de Grado

34. Abigail Flores Ledesma., Tesis profesional para obtener el título de Maestra en Ciencias Odontológicas, Titulada "Influencia de Wollastonita y Vidrio Bioactivo en las Propiedades Físicas de un Cemento Dental Tipo Portland"., México D.F., 2011.

35. Luis Enrique Carcamo., Tesis profesional titulada, "Revisión, Análisis y Aplicación de la Nanotecnología en la Generación y Mejora de Materiales Constructivos. Estudio de Morteros de Cemento con Adiciones de Nanosílice"., Valdivia-Chile, 2006.

36. Linda Rocío López Sánchez., Tesis profesional para obtener el título de Ingeniera de Minas y Metalurgista, Titulada "Residuos Mineros y la Generación de Drenaje Ácido: Pruebas de Laboratorio y su Aplicación en el Diseño"., México D.F., 2013.

37. Muciño Vélez Alberto., Tesis para obtener el Título de Maestro en Arquitectura, Titulada "CONCRETO NANOTECNOLÓGICO", Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con Partículas submicrométricas, México D.F. 2010.

## Libros

38. Aitcin, P-C. (2007) Binders for Durable and Sustainable Concrete. Modern Concrete Technology Series No. 16, CRC Press, Bacon Raton.

39. De La Rosa Medina Tomas, La Guerra por el cemento. Obras México, 2004, p.35-37.

40. Farías Ramón,(1998). Contaminantes, Quemando Nuestra Salud: La Incineración de Residuos Peligrosos en Hornos de Cemento, Conferencia dada en la Fundación para la Ciencia México-Estados Unidos, Monterrey.

41. Metha Kumar, Monteiro Paulo. (1998). Estructura, propiedades y materiales, México, IMCYC.

42. Neville M. Adams, (1999). Tecnología del Concreto, México, IMCYC.

43. P. C. ATtcin. Cement and Concrete Development from an Environmental Perspective, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21 \* Century, Edited by Odd Gj0rv and Koji Sakai, 2000, p. 210.

44. Sanjuán Barbudo, Miguel y Castro Borges, Pedro (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. IMCYC.

45. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese y Jussara Tanesi. Diseño y Control de Mezclas de concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

46. Taylor, H. F. W. Cement Chemistry, 2nd ed.; Thomas Telford: London, 1997.

47. Vázquez, T. "Espectroscopía Infraroja de algunos compuestos de interés en la química del cemento". Cuadernos de Investigación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1969.

48. World Business Council for Sustainable Development (2002). Toward a sustainable cement industry. Pág.1

## Direcciones Electrónicas

49. Cementos Cruz Azul, descripción de [http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo\\_II.html](http://www.cruzazul.com.mx/productos/tipo_II.html).

50. ITESM. Microscopio Electrónico de [http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM\\_ICP.pdf](http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM_ICP.pdf)

51. Lerch, William, The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes, Research Department Bulletin RX012, Portland Cement Association, [http://www.prtcement.org/pdf\\_files/RX012.pdf](http://www.prtcement.org/pdf_files/RX012.pdf), 1946.

52. 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>

53. Obras Web, Principales países productores de cemento, México. Obtenida el 29 de agosto de 2003, tomado de <http://www.obrasweb.com>

## Normas

**54.** ASTM C 1171-96(1999).Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Shock and thermal Cycling on Refractories. (1996). P.297-298

**55.** ASTM C187-04 (2004). "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", Pág. 305-99.

**56.** ASTM designation C109-04 83 ASTM (2004) "Standard Practice for Use of APágaratus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete".

**57.** Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999, "Características de los

Materiales". Parte 2. Materiales para Estructuras. Título 02. Materiales para concreto Hidráulico. Cap.001 Calidad del Cemento Pórtland. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Industria de la Construcción. Pág. 1-12.

**58.** Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-414-ONNCCE "Industria de la construcción – Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de pruebas". Ficha Técnica. Pág.1-3.

**59.** Norma Oficial Mexicana NOM C-122 (ASTM C-94).