



INFORME FINAL



**“Desarrollo químico y su validación (por CEMEX) de un cemento, un concreto y un mortero especial –resistente al biodeterioro – para asegurar que la infraestructura hidráulica utilizando estos materiales, garanticen su mejor funcionamiento y durabilidad”**

**PROYECTO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA Y CONVENIO DE CONFIDENCIALIDAD HC-1044.2**

## **INFORME FINAL**

**Participantes por CEMEX:**

**Arq. Bernardo Martínez Sánchez**  
**Gerente de Transferencia de Tecnología**  
**Ing. Quím. Daniel Ramos Rodríguez**  
**Desarrollo Tecnológico**  
**Ing. Lizeth Espinosa Pérez**  
**Durabilidad**  
**Quím. María G. Candelas Pons**  
**Gerente de Proyectos**

**Dr. Luis Emilio Rendon Díaz Mirón**  
**Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos**  
**Coordinación de Tecnología Hidráulica**  
**Diciembre de 2010**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 Objetivo General .....	5
2.2 Objetivos Específicos .....	5
<b>3 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>4 RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>8</b>
4.1 Descripción del proceso: .....	8
4.2 Proceso de biodeterioro en el concreto.....	8
4.3 Selección de la composición del cemento resistente. ....	9
4.4 El yeso (sulfato de calcio) como coadyuvante de fraguado.....	11
4.5 Elaboración de muestras para su caracterización y prueba .....	12
4.5.1 <i>Determinación de la cantidad de agua.</i> .....	14
4.5.2 <i>Registro de la cantidad de agua.</i> .....	15
4.5.3 <i>Se coloca una determinada cantidad de mortero en la mesa de prueba.</i> .....	15
4.5.4 <i>Se comprime el mortero y se aplana en la mesa de prueba.</i> .....	15
4.6 Elaboración de muestras para pruebas de trabajabilidad, fraguado, resistencia a la compresión y corrosión.....	17
4.6.1 <i>Se preparan muestras para cada una de las siguientes pruebas:</i> .....	17
4.6.2 <i>Adecuado manejo de las muestras</i> .....	18
<b>5 DOCUMENTOS Y PRODUCTOS GENERADOS CON EL PROYECTO .....</b>	<b>19</b>

## 1 ANTECEDENTES

Desde 1967, las autoridades del entonces Departamento del Distrito Federal trataron de solucionar en forma permanente el problema de las inundaciones en la ciudad de México, lo que motivó la construcción de un sistema de drenaje profundo, inaugurado en 1975. En la actualidad, el Sistema de Drenaje Profundo cuenta con más de 80 km de interceptores, además de los 50 km del Emisor Profundo. El sistema maneja los escurrimientos captados por los Interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente, y los conduce por el Emisor Central fuera del valle hasta el río El Salto. El interceptor Centro-Poniente auxilia al Interceptor del Poniente recibiendo parte de las crecientes que conduce este último; el Interceptor Oriente ayuda de la misma forma al Gran Canal.

El Distrito Federal, como la mayoría de las grandes ciudades de América Latina, utiliza la misma infraestructura para desalojar tanto las aguas residuales como las pluviales. Esto origina las condiciones ideales de humedad, temperatura y concentración de consorcios bacteriales para provocar un tipo de corrosión microbiológica conocida como: corrosión microbiológicamente inducida del concreto (CMIC). Dicha corrosión deteriora y pela el concreto, destruye las varillas, y debilita la estructura de los túneles. Aunado a esto, en época de lluvias, cuando la capacidad instalada es insuficiente y se presentan fuertes inundaciones, el aumento de caudales y la presión que ejercen provocan el debilitamiento de estructuras, fisuras, fugas de agua y fallas en los túneles que componen el sistema.

Después de 34 años, el drenaje profundo presenta los siguientes problemas: en determinados puntos, debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, hay pendientes que dificultan el flujo del agua; existe desgaste en el recubrimiento de los túneles y, en algunos casos, hay varillas expuestas.



Figura 1. Drenaje profundo de la ciudad de México (Notimex).

INFORME FINAL

En la figura 1 (Milenio, marzo 12, 2009) se aprecia el interior del drenaje profundo. Durante esta visita de inspección, la urgencia y necesidad de un recubrimiento que en verdad garantice la durabilidad en este tipo de reparación era evidente.

El objeto del presente proyecto (como se menciona adelante) consiste en exponer la necesidad de un recubrimiento especial en el drenaje profundo; un recubrimiento que en verdad garantice la durabilidad en este tipo de reparaciones.

El concreto puede parecer un material inverosímil para los avances científicos de hoy en día. De hecho, todo el concreto puede parecer igual. Ciertamente, el producto básico sigue siendo el mismo y ha permanecido sin cambios desde su invención.

Las características del concreto dependen en gran medida de la cantidad y la calidad de sus componentes, incluyendo el cemento Portland; su selección, composición y uso apropiado son importantes para diseñar, lo más económicamente posible, las características deseadas de cualquier tipo de concreto.

Por tal motivo se esbozan los siguientes objetivos:

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Desarrollo químico y su validación (por CEMEX) de un cemento, un concreto y un mortero especial – resistentes al biodeterioro – para asegurar que la infraestructura hidráulica utilizando estos materiales, garanticen su mejor funcionamiento y durabilidad –

### 2.2 Objetivos Específicos

- Sistematizar la información relacionada con la materia prima de Cementos Mexicanos a través del Centro Tecnológico del Cemento y el Concreto de CEMEX desarrollando una correlación entre esta materia prima y su composición para utilizarla como base en la obtención de cemento, concreto y un mortero especial –resistente al biodeterioro.
- Realizar un diagnóstico técnico de validación, identificando aquellas acciones que permitan coadyuvar al Centro Tecnológico del Cemento y el Concreto de CEMEX y recursos asociados en el proceso de validación de la tecnología transferida.
- Identificar y analizar los factores químicos naturales de la materia prima, causantes de la degradación del cemento.
- Jerarquizar y programar aquellos componentes de las materias primas y acciones que permitan disminuir el deterioro del cemento y productos asociados.
- Formular la composición ideal y acciones para la obtención con buena calidad y comportamiento del cemento objeto de este proyecto.

### 3 JUSTIFICACIÓN

El cemento Portland, principal constituyente del concreto, se desarrolló en los 1800 tempranos al calcinar piedra caliza con arcilla, obteniendo silicatos de calcio sintéticos. Los romanos antiguos ya también habían desarrollado su propio cemento y concreto a partir de ceniza volcánica (material calcinado naturalmente).

Durante la formación del concreto, el cemento Portland y el agua forman una masa aglutinante en la cual sucede una serie de reacciones; al endurecerse, conglomeran los agregados. La mayor parte de la consolidación ocurre en los primeros días y semanas; el proceso puede continuar por años mientras haya una poca humedad alrededor.

Esencialmente, el concreto se constituye por los mismos minerales que se utilizaban en 1825. Sin embargo, hoy en día al cemento Portland, en aras de la economía, se le mezcla con materiales que posean naturalmente propiedades adhesivas (puzolanas) a efecto de tener una especie de mezcla entre cemento Portland y cemento romano. El cemento Portland (silicatos sintéticos) no puede ser eliminado en su totalidad ni ser sustituido por materiales naturalmente puzolánicos; esto daría como resultado "cemento romano", no "cemento Portland".

En los cementos muy económicos se adiciona como relleno piedra caliza (que consiste en carbonato de calcio) muy finamente molida, material carente de propiedades puzolánicas pero que se agrega con la intención de reducir el costo del cemento Portland.

La preparación de cemento más elaborada hasta ahora, ha sido adaptar el proceso de fraguado del concreto a un conveniente tiempo de manejo. Esta propiedad del concreto "de fraguar con lentitud" se logra al adicionar sulfato de calcio (yeso) al cemento Portland. La fabricación del cemento se ha hecho de esta manera desde 1890.

Estos agregados de sulfato de calcio y de calcita molida en el cemento Portland han resultado perjudiciales cuando el concreto es utilizado en infraestructura hidráulica. El CMIC causado a la infraestructura de ese material por la actividad microbiana y los productos del metabolismo microbiológicos, principalmente ácido sulfúrico (por lo que también es conocida como "corrosión ácida"), es potenciado en el proceso destructivo del concreto.

Siempre se pensó que los materiales pétreos, tal como el concreto, durarían muchísimo tiempo pero, de pronto, en la infraestructura hidráulica surgió el concepto de que el concreto tiene vida limitada.

La CMIC ha provocado un gran dilema acerca de la durabilidad del concreto. Se ha intentado evitar el lento deterioro que la infraestructura hidráulica hecha de concreto sufre por este fenómeno con recubrimientos,

INFORME FINAL

bactericidas y aireación en los drenajes; sin embargo, solucionar el problema ha resultado demasiado costoso.

En algunos intentos se ha substituido parte del cemento Portland por residuos industriales, por ejemplo, cenizas residuales del carbón quemado en las centrales eléctricas y escoria de altos hornos, ambas reconocidas por sus propiedades puzolánicas. Estos materiales reactivos ayudan a hacer el concreto más fuerte y menos poroso, pero no detienen el efecto destructivo de las bacterias.

El IMTA se ha abocado al estudio de las causas, tratamiento y prevención del fenómeno CMIC, como parte de las actividades concernientes a la conservación de la infraestructura hidráulica en el país, particularmente de los sistemas de drenaje del país para tal objeto desarrollo un cemento resistente al biodeterioro que fue formalmente patentado y del cual ahora Cementos Mexicanos ha mostrado el interés en su fabricación y comercialización, debido principalmente a la obtención de los siguientes resultados:

## 4 RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1 Descripción del proceso:

La principal característica del cemento resistente al biodeterioro es su carencia de materiales atractivos a la actividad microbiana, que coadyuven al metabolismo microbiano a producir ácido sulfúrico, herramienta esencial, ejecutor de la corrosión ácida;

Para lograr esto, debe hacerse una cuidadosa selección de las materias primas;

Los sulfatos son un mineral común en la mayoría de las arcillas y tierras calizas que se utilizan como materia prima en la fabricación del cemento Portland.

En el cemento resistente debe evitarse la reacción siguiente:



Todo tipo de azufre es útil a las bacterias (aerobias o anaerobias) aun ellas lo almacenan como azufre elemental.

Es necesario cambiar los paradigmas:

- Los sulfatos ayudan a obtener clinker a temperaturas mas bajas;
- El sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) es necesario para obtener un fraguado controlado;
- La ettringita ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) es un mineral intrínseco del cemento.

### 4.2 Proceso de biodeterioro en el concreto.

El ácido sulfúrico es utilizado por la bacteria para disolver el hidróxido de calcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el silicato de calcio ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), lo que conlleva a la disolución del concreto.

El concreto, cuando es nuevo, tiene un pH relativamente alto, baja permeabilidad. Sin embargo, sin importar qué tan pequeños sean los poros, no se puede impedir el paso de los compuestos (de origen bioquímico) que disuelven el concreto (estos compuestos pueden estar constituidos de diferentes tipos de ácidos poliónicos, aparte del característico ácido sulfúrico).

#### **El proceso de biodeterioro no es un ataque químico directo**

Las bacterias trabajan dentro de un moco (biofouling) que las aísla del ambiente y donde producen el ácido sulfúrico, figura 2.



INFORME FINAL

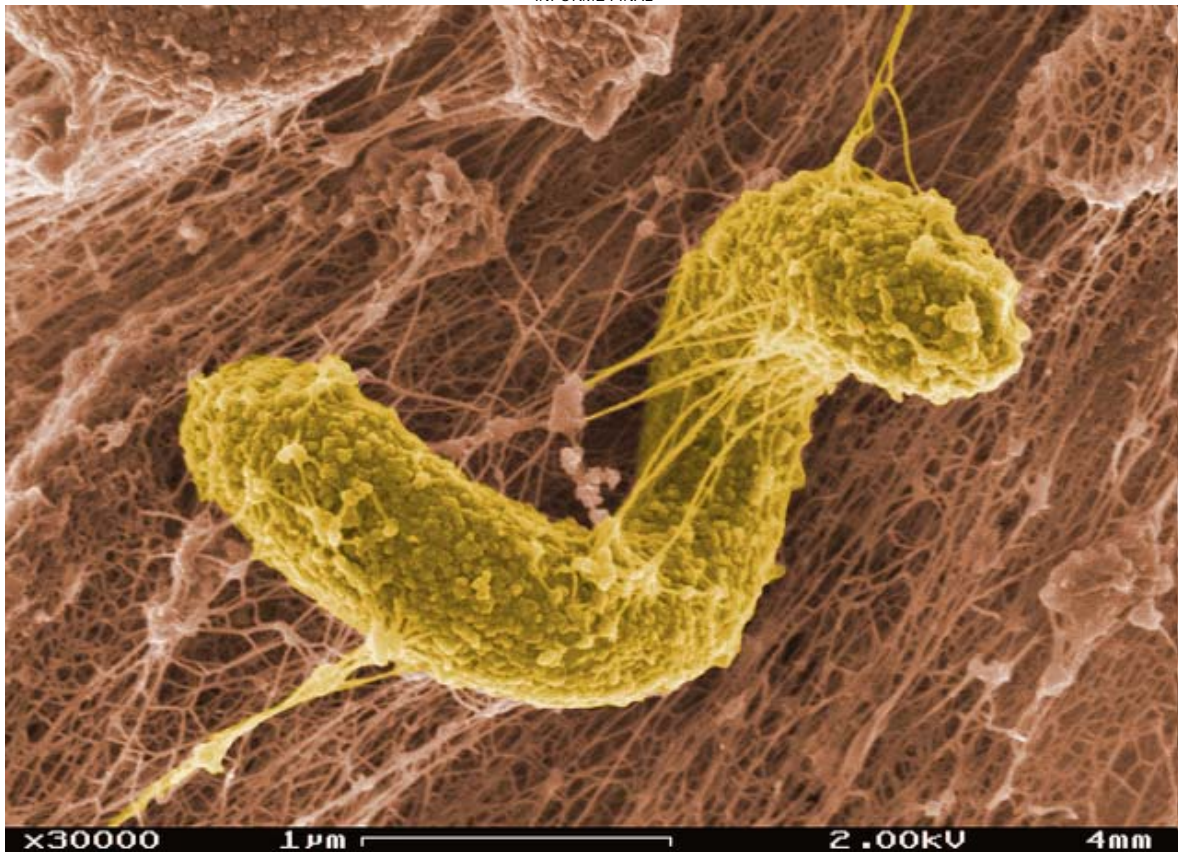


Figura 2. Bacteria de aproximadamente 2 micrómetros de tamaño

- En presencia de aguas residuales, altas concentraciones de *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Acidithiobacillus ferrooxidans* bacterias acidófilas disuelven el concreto a pHs de entre 0.5 y 1.0 para extraer el azufre.
- *Acidithiobacilli* “la bacteria acidófila del azufre” se caracteriza por dos cepas “*thiooxidans*” (oxidante de azufre) y “*ferrooxidans*” (oxidante de hierro) y solo vive en la presencia de azufre (thio).
- El proceso de corrosión es catalizado en presencia de minerales de hierro, por lo tanto el contenido de hierro debe reducirse, cuando el azufre no sea eliminado totalmente.

#### 4.3 Selección de la composición del cemento resistente.

Se selecciona la materia prima;  
Se forma el pellet y se clinkeriza;  
Se muele con SiO<sub>2</sub> como carga;

INFORME FINAL

Se adiciona durante el molido 2.5% de talco como coadyuvante de fraguado;

Se puede utilizar hasta un 20% de material puzolanico (sin azufre).

Ejemplo de una composición de Clinker y Cemento.

Cemex, propuso una composición utilizada en Atotonilco:

DATOS REPRESENTATIVOS  
PLANTA ATOTONILCO  
Enero - Julio 2010

### Parámetro

#### Clínker Atotonilco

#### Análisis Químico

SiO <sub>2</sub>	% 20.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 5.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 3.1
CaO	% 65.5
MgO	% 1.5
SO <sub>3</sub>	% 2.2
Na <sub>2</sub> O	% 0.4
K <sub>2</sub> O	% 0.5
<b>Módulos de Control</b>	
FSC	97
MS	2.6
MA	1.6

Esta composición esta demasiado elevada en azufre

#### 4.4 El yeso (sulfato de calcio) como coadyuvante de fraguado.



Figura 3. Molino de clinker para hacer cemento.

#### El yeso puede substituirse por talco $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$

- El Silicato de Magnesio (como talco)  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , agregado durante la molienda del clinker, ha probado ser un excelente coadyuvante del fraguado, debido a que;
- El Talco es un agregado hojoso, formado por filosilicatos, su estructura se caracteriza por el apilamiento de capas lo cual se traduce en una serie de "hábitos" típicos (hojosos o escamosos) además es un material blando y poco denso (típico de los filosilicatos bilaminares);
- Como precaución debe seguirse la recomendación general de no sobrepasar el 5% de Silicato de Magnesio en la composición general del cemento, para evitar el efecto de expansión.

En realidad el efecto de expansión es debido a la presencia de MgO obtenido durante la calcinación del clinker.

Notación de la química del cemento:

INFORME FINAL

**Alita:**  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  en términos de óxidos es  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . El CaO se expresa como C y el  $\text{SiO}_2$  como S. El compuesto entonces se expresa C3S.

**Belita:** Similarmente,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  es  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , y se expresa C2S:

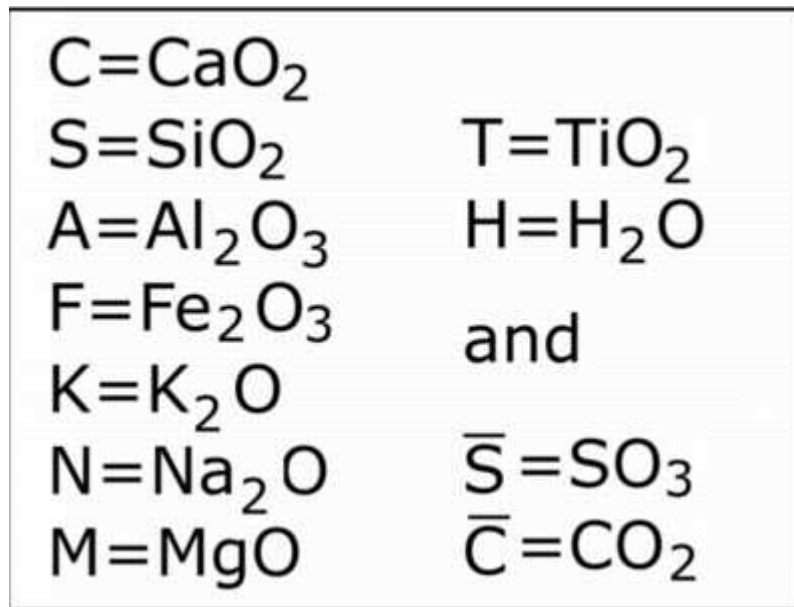


Figura 4. Notación corta de los elementos del cemento.

#### 4.5 Elaboración de muestras para su caracterización y prueba

El mortero es similar al concreto, contiene cemento, agua y agregados, con la diferencia que en el mortero el único agregado presente es arena silica. Esta arena esta caracterizada y graduada, en el mortero estándar 20% de la masa del mortero consiste en cemento *Portland* en algunas ocasiones por conveniencia económica 20% del cemento es reemplazado por fly ash que es un residuo de la combustión del carbón y que consiste principalmente de dióxido de silicio (tanto amorfo como cristalino) y oxido de calcio.

En el mortero resistente a la CMIC consiste principalmente de arena y cemento CPO.

Por acuerdo con CEMEX se puede utilizar fly ash debido a que este material no contiene azufre ni compuestos de azufre.

El fly ash requiere menos agua que el cemento *Portland*, lo que puede incrementar el esfuerzo a la compresión.

Si este fuera el caso la evaluación del mortero comienza con la determinación del agua de mezclado.



INFORME FINAL



Ingredientes para un kilogramo de mortero

Determinación del agua de mezclado.- La proporción de arena a cemento es 4 partes de arena por una de cemento, en la parte de cemento se puede sustituir hasta 20% de cemento por fly ash.

Al preparar un kilogramo de mortero utilizamos 243 g de agua como primera aproximación.

Después de pesar el agua se agrega el agua al recipiente de mezclado y sobre el agua se agregan el cemento y el fly ash.

Se registra el tiempo en que la mezcla de cemento y fly ash es adicionada.

Cuando ha comenzado el mezclado, se adiciona la arena.



Se agrega el agua



Se agrega el cemento

INFORME FINAL



Se toma el tiempo de mezclado



Ya mezclando se agrega la arena



El Mortero es mezclado perfectamente.

#### 4.5.1 Determinación de la cantidad de agua.

Se utiliza una pequeña mesa que eleva y deja caer una cantidad conocida de mortero, unas 25 veces durante esta prueba el mortero fluye, se aplanan y extiende hasta formar una masa circular (en forma de tortilla), el diámetro de la tortilla se mide y se compara con el diámetro inicial de la muestra. El incremento en tamaño se expresa en porcentaje del tamaño inicial; para la mayoría de los morteros el flujo requerido es de

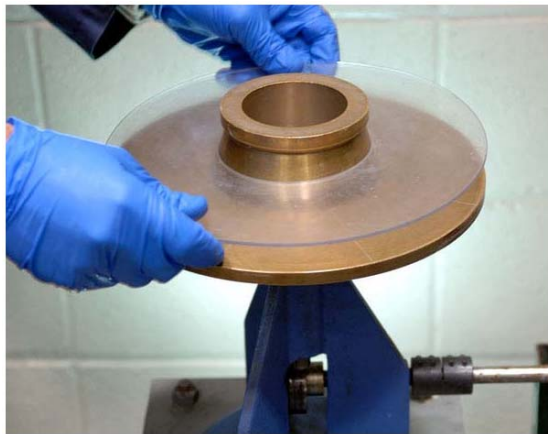
INFORME FINAL

110%. La prueba de flujo se repite, usando una preparación fresca de mortero cada vez hasta que se obtiene el flujo requerido.

#### 4.5.2 *Registro de la cantidad de agua.*

La cantidad de agua que se requirió para la prueba es registrada;

Una vez teniendo la cantidad ideal para el mortero, tenemos la formula de acuerdo a la cantidad de fly ash que se pretende utilizar y se puede proceder a otras puebas, a la prueba de compresión



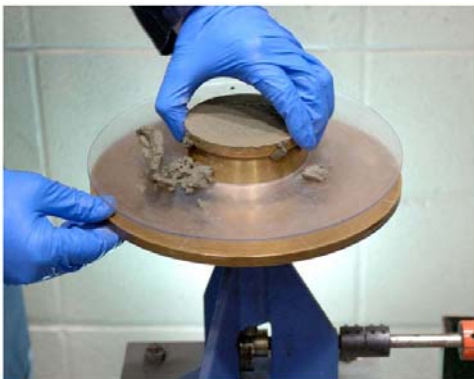
#### 4.5.3 *Se coloca una determinada cantidad de mortero en la mesa de prueba.*



#### 4.5.4 *Se comprime el mortero y se aplanan en la mesa de prueba.*



INFORME FINAL



Una vez que se tiene la cantidad correcta se desmolda



El golpetear de la mesa (25 veces) aplana el mortero



INFORME FINAL

Hasta formar un disco



El flujo requerido es de 110% del diámetro inicial.

Con esto se tiene la cantidad de agua requerida y la formulación final del mortero.

#### **4.6 Elaboración de muestras para pruebas de trabajabilidad, fraguado, resistencia a la compresión y corrosión.**

##### **4.6.1 Se preparan muestras para cada una de las siguientes pruebas:**

- Trabajabilidad, que consiste en determinar si la pasta tiene la correcta plasticidad, viscosidad y fluidez para que pueda ser colada, moldeada o lanzada a la forma final de trabajo.
- Fraguado, que consiste en determinar si la pasta endurece sin perder la forma en la que ha sido formada.
- Resistencia, que consiste en determinar la resistencia mecánica a diferentes tiempos de fraguado.
- Corrosión microbiológicamente inducida (biodeterioro).

INFORME FINAL



Ejemplo de muestras

#### 4.6.2 Adecuado manejo de las muestras

- ➔ Establecer un programa de pruebas.

## 5 DOCUMENTOS Y PRODUCTOS GENERADOS CON EL PROYECTO

1. Descripción del proyecto por CEMEX;
2. Memoria Técnica clínker de atotonilco;
3. Minuta del 7 de octubre de 2010;
4. Minuta del 14 de octubre de 2010;
5. Minuta del 3 de diciembre de 2010;
6. Informe de actividades del 2010 de CEMEX.

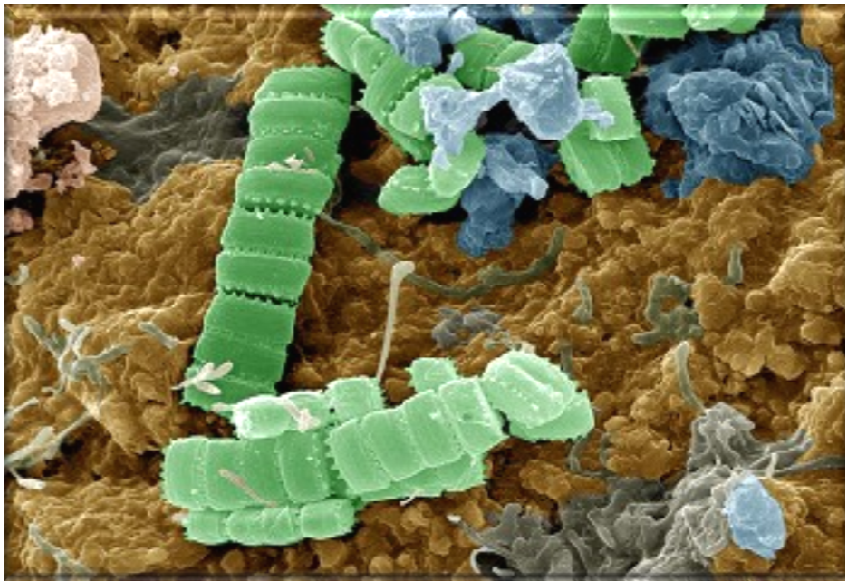


# **Desarrollo de un concreto resistente al biodeterioro.**

## ¿Qué es el biodeterioro del concreto?



El biodeterioro que se presenta en los sistemas de drenaje de concreto se define como el estropicio causado a la infraestructura de ese material por la actividad microbiana y los productos del metabolismo microbiológicos, principalmente ácido sulfúrico, por lo que también es conocida como corrosión ácida o corrosión microbiológicamente inducida del concreto (CMIC), uno de los problemas más serios con los que nos enfrentamos hoy en día.



## Objetivo



El CTCC (Centro de Tecnología de Cemento y Concreto) en colaboración con el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) desarrollaran un cemento que sea capaz de resistir el daño por este tipo de ataca antes mencionado.

Se plantea hacer algunas modificaciones a la química ordinaria del cemento para así lograr que el este nos pueda brindar propiedades para tener concretos y morteros resistentes a la corrosión ácida.



## Matriz de trabajo



- 1.- Firma de convenio de confidencialidad CTCC CEMEX – IMTA.
- 2.-Intercambio de información técnica por parte de ambas empresa.
- 3.- Revisión de la química del clinker para su posterior modificación
- 4.- Revisión por parte del CTCC de las recomendaciones de modificación del clinker.
- 5.-Modificación del clinker.
- 6.-Elaboración de prueba de cemento resistente al biodeterioro
- 7.- Pruebas en mortero:
  - f´c, finura, densidad, tiempo de fraguado, análisis químico.
  - Ataque ácido
  - Ataque por sulfatos



## Matriz de trabajo



8.- Revisión de resultados por parte de ambos equipos de trabajo.

9.- Si es que el diseño de mortero nos da buenos resultados y solo hasta ese momento se procederá a elaborar mezclas de concreto para observar su comportamiento, las pruebas que se realizarán en concreto son las siguientes:

- $f'c$
- Tiempo de fraguado
- Ataque ácido
- Abrasión
- Todas las normalmente llevadas a cabo en estado fresco.

10.- Si el concreto ya es capaz de resistir el ataque por biodeterioro, se buscará hacer una prueba piloto con algún cliente.

11.- Transferencia de tecnología a las operaciones en conjunto con cementos.



**DATOS REPRESENTATIVOS  
PLANTA ATOTONILCO**

Enero - Julio 2010

<b>Parámetro</b>		<b>Clinker Atotonilco</b>
<b>Análisis Químico</b>		
<b>SiO<sub>2</sub></b>	%	<b>20.9</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	<b>5.0</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	<b>3.1</b>
<b>CaO</b>	%	<b>65.5</b>
<b>MgO</b>	%	<b>1.5</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	%	<b>2.2</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	%	<b>0.4</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	%	<b>0.5</b>
<b>Módulos de Control</b>		
<b>FSC</b>		<b>97</b>
<b>MS</b>		<b>2.6</b>
<b>MA</b>		<b>1.6</b>



**Minuta del 7 de octubre de 2010**

**Proyecto de transferencia de tecnología  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – Cementos  
Mexicanos.**

**MORTERO RESISTENTE AL BIODETERIORO PARA RECUBRIR  
INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA**

**Participantes:**

- Bernardo Martínez Sánchez  
Gerente de transferencia de tecnología CEMEX
- I.Q. Daniel Ramos Rodríguez  
Transferencia de Tecnología CEMEX
- Dr. Luis Emilio Rendón Díaz Mirón  
Investigador IMTA

**Lugar de reunión el Centro Tecnológico del Cemento y el Concreto (CTCC)  
México, D.F.**

**Introducción:**

Desde 1967, las autoridades del entonces Departamento del Distrito Federal trataron de solucionar en forma permanente el problema de las inundaciones en la ciudad de México, lo que motivó la construcción de un sistema de drenaje profundo, inaugurado en 1975. En la actualidad, el Sistema de Drenaje Profundo cuenta con más de 80 Km. de interceptores, además de los 50 Km. del Emisor Profundo. El sistema maneja los escurrimientos captados por los Interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente, y los conduce por el Emisor Central fuera del valle hasta el río El Salto. El interceptor Centro-Poniente auxilia al Interceptor del Poniente recibiendo parte de las crecientes que conduce este último; el Interceptor Oriente ayuda de la misma forma al Gran Canal.

El Distrito Federal, como la mayoría de las grandes ciudades de América Latina, utiliza la misma infraestructura para desalojar tanto las aguas residuales como las pluviales. Esto origina las condiciones ideales de humedad, temperatura y concentración de consorcios bacteriales para provocar un tipo de corrosión microbiológica conocida como: Corrosión Microbiológicamente Inducida del Concreto (CMIC). Este tipo de corrosión se desarrolla en tres etapas.

En la primera, la reducción del pH se puede atribuir enteramente a un efecto químico, la reducción de sulfatos a sulfuro de hidrógeno:



En la segunda, los cambios paulatinos del pH son provocados por una secuencia microbiana de organismos neutrófilos y acidófilos; finalmente, en la tercera etapa, altas concentraciones de las bacterias *Acidithiobacillus thiooxidans* y *ferrooxidans* son asociadas con pH muy ácido de entre 0.5 y 1.0 en la superficie del concreto, que termina por disolverse, esto deteriora y pela al concreto, destruye las varillas, y debilita la estructura de los túneles. Aunado a esto, en época de lluvias se pueden presentar fuertes inundaciones, el aumento del caudal y la presión que ejercen provoca el debilitamiento de estructuras, fisuras, fugas de agua y fallas en los túneles que componen el sistema.

En 2005 se iniciaron los trabajos de inspección del Emisor Central del Drenaje Profundo, con el fin de conocer las condiciones físicas estructurales y de funcionamiento hidráulico. Después de 34 años, el sistema de drenaje profundo presenta los siguientes problemas: en determinados puntos, debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, hay pendientes que dificultan el flujo del agua; existe desgaste en el recubrimiento de los túneles y, en algunos casos, hay varillas expuestas.

### Objetivo de la reunión:

El objeto de la reunión consistió en discutir los pasos para desarrollar un mortero especial “resistente al biodeterioro” y utilizar este recubrimiento especial en el nuevo túnel colector oriente y obras conexas; que garantice su mejor funcionamiento y durabilidad.

### La información que se había provisto hasta ahora:

Clinker:		Clinker:	
SiO <sub>2</sub>	--- 21.57 %	GSC	--- 95.51 %
Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	--- 5.88 %	MS	--- 2.39 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--- 3.04 %	MA	--- 1.55 %
CaO	--- 65.81 %		
SO <sub>3</sub>	--- 0.12 %	Cemento:	
MgO	--- 2.52 %	Clinker	--- 79.41 %
Na <sub>2</sub> O	--- 0.31 %	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (talco)	--- 2.51 %
K <sub>2</sub> O	--- 0.74 %	SiO <sub>2</sub> (arena silica)	--- 18.07 %

Se discutió ampliamente sobre las características del clinker y del cemento:

El clinker de cemento Portland es un material nodular obscuro verdoso clinker; que se hace calentando una mezcla de calcita y arcilla a una temperatura de entre 1400 C -1500C. Los nódulos son molidos hasta un polvo muy fino ~7

micras para producir cemento, se le agrega una determinada cantidad de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) para controlar las propiedades de fraguado.

**El clinker de cemento Portland** contiene cuatro principales minerales:

**Alita, Belita, Aluminato, Ferrita.**

El balance total se alcanza normalmente con sulfatos alcalinos y otras impurezas menores. El contenido de minerales que se muestra generalmente está sujeto a una amplia variación.

Un análisis químico del clinker es normalmente dado en forma de óxidos - una composición ejemplo típico puede ser:

Ejemplo de un análisis típico de clinker (óxidos % en peso).										
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	LOI	IR	Total
21.5	5.2	2.8	66.6	1.0	0.6	0.2	1.0	1.5	0.5	98.9

Cal libre = 1.0% CaO

El balance se alcanza típicamente con pequeñas cantidades de óxidos de titanio, manganeso, fósforo y cromo.

Se discutió sobre el proceso de biodeterioro:

La corrosión que se presenta en los albañales de concreto es una consecuencia del proceso natural por el cual se recicla el azufre en el medio ambiente. Este proceso de corrosión conocido como corrosión microbiológicamente inducida del concreto (CMIC) puede iniciarse con la reducción de los sulfatos presentes en el azolve del drenaje, generando sulfuro de hidrógeno que puede muy bien ser convertido por las bacterias en ácido sulfúrico. Este ácido es la herramienta que la bacteria utiliza para disolver el medio en donde se encuentra el azufre.

Existen bacterias y organismos que utilizan el azufre en su metabolismo, de manera similar a como lo hacen otras bacterias y organismos que utilizan oxígeno. El ciclo del azufre consiste en la formación cíclica de sulfuro de hidrógeno, sulfatos y azufre elemental. Este proceso se presenta en los sistemas de drenaje porque algunos de los organismos unicelulares presentes en las aguas residuales degradan la abundante materia orgánica, utilizando como fuente de energía los procesos de oxidación-reducción del azufre.

Las especies sulfato reductoras más activas son las bacterias *Desulfovibrio* y la *Thiobacillus*, ésta última actualmente denominada *Acidithiobacillus*.

Conclusiones:

1ra.- Que la información con que se cuenta hasta ahora es académica y teórica, ya que se desconoce si el cemento resistente al biodeterioro cumplirá con los estándares de:

Manejabilidad;

Fraguado;

Etc.

2da.- Es necesario hacer muestras en laboratorio para efectuar pruebas de biodeterioro en material de CEMEX.

3ra.- Se concluye que una buena decisión es utilizar algún clinker de fabricación normal y ver como se encuentra con respecto a la composición ideal.

4ta.- Es necesario evaluar la viabilidad por parte de cementos para producirlo industrialmente.

5ta.-Se solicita por parte del CTCC a la gente de cementos, apoyo para definir si algún clinker cumple con las características antes mencionadas, o si es viable que nos proporcionen una muestra de 20kg de este clinker de fabricación especial.

6ta. Además será necesario evaluar el mortero frente a un ataque ácido común y corriente.

México, D.F., 14 de octubre de 2010

## Minuta de la reunión con IMTA

### **Asistentes:**

CTCC Daniel Ramos Rodríguez

IMTA Dr. Luis E. Rendón Díaz Mirón

El día de hoy, se llevó a cabo una reunión para definir los puntos a seguir en el proyecto del “Concreto Resistente al Biodeterioro”

### **I. Los aspectos revisados fueron los siguientes:**

- 1) Envío de presentaciones presentadas por parte del Dr. Rendón.
- 2) Comunicar al Dr. Rendón que la muestra de clinker se esta haciendo en Monterrey, y sería enviada en las semanas próximas.
- 3) Una vez hechas las muestras se someterán al ataque microbiológico.
- 4) Se habló del esatus de la patente que tiene el IMTA en trámite ante el IMPI.
- 5) Se resuleven algunas dudas a Daniel Ramos sobre el tema del biodeterioro.

### **II. Acciones a seguir:**

- 1) Recibir la muestra y realizar la mezcla de los componetes propuestos por el Dr. Emilio.
- 2) Someter las muestras al ataque microbiologico bajo un protocolo ya muy estritco donde se evalúe: perdida de peso, perdida de resistencia, como etapa inicial.
- 3) Finalmente se evaluaran los resultados para determinar si alguna es viable para realizarla en concreto y evaluar mas popiedades tanto en estado fresco como en edurecido.

México D.F., a 03 de Diciembre de 2010

Dr. Luis Emilio Rendón:

Por medio de la presente le comento que ya hemos recibido la muestra de clinker modificado por parte del área de cementos, programaremos los cubos lo más pronto posible para comenzar a realizar las pruebas en campo.

Agradezco toda la información técnica que nos ha dejado en sus visitas, para nosotros es fundamental conjuntar toda la información posible.

Confío en que obtendremos muy buenos resultados en las pruebas que realizaremos.



---

**Atentamente**

**I. Q. Daniel Ramos Rodríguez**  
Investigador Júnior  
Transferencia de Tecnología  
CTCC CEMEX Concretos  
[daniel.ramosrd@cemex.com](mailto:daniel.ramosrd@cemex.com)  
Tel. 56 26 83 11

## Estado de avance de la validación de la innovación tecnológica:

**“Cemento, concreto y mortero resistentes a la corrosión microbiológicamente inducida del concreto, también conocida como biodeterioro del concreto”.**

### **Antecedentes.**

Existe un interés creciente en desarrollar materiales sustentables y mitigar el impacto ambiental en procesos de producción; Siendo el cemento Portland uno de los materiales más señalados, Cementos Mexicanos (Cemex) se ha avocado para desarrollar varios cementos y concretos con estas características: sustentables, de baja emisión de gases invernadero, resistentes al intemperismo, etc.

En general que:

- contribuyan a la eficiencia energética de los edificios
- reduzcan el efecto isla de calor urbano y las fluctuaciones de temperatura durante el día
- soporten condiciones climáticas extremas
- reduzcan la resistencia al rodaje en carreteras y contribuyan a mejorar el rendimiento de combustible en los autos, en comparación con el asfalto
- requieran poco o ningún mantenimiento durante su ciclo de vida

### **Introducción.**

Desde 1967, las autoridades del entonces Departamento del Distrito Federal trataron de solucionar en forma permanente el problema de las inundaciones en la ciudad de México, lo que motivó la construcción de un sistema de drenaje profundo, inaugurado en 1975. En la actualidad, el Sistema de Drenaje Profundo cuenta con más de 80 km de interceptores, además de los 50 km del Emisor Profundo. El sistema maneja los escurrimientos captados por los Interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente, y los conduce por el Emisor Central fuera del valle hasta el río El Salto. El interceptor Centro-Poniente auxilia al Interceptor del Poniente recibiendo parte de las crecientes que conduce este último; el Interceptor Oriente ayuda de la misma forma al Gran Canal.

El Distrito Federal, como la mayoría de las grandes ciudades de América Latina, utiliza la misma infraestructura para desalojar tanto las aguas residuales como las pluviales. Esto origina las condiciones ideales de humedad, temperatura y concentración de consorcios bacteriales para provocar un tipo de corrosión microbiológica conocida como: corrosión microbiológicamente inducida del concreto (CMIC). Dicha corrosión deteriora y pela el concreto, destruye las varillas, y debilita la estructura de los túneles. Aunado a esto, en época de lluvias, cuando la capacidad instalada es insuficiente y se presentan fuertes inundaciones, el aumento de caudales y la presión que ejercen provocan el debilitamiento de estructuras, fisuras, fugas de agua y fallas en los túneles que componen el sistema.



CEMEX a través del Centro de tecnología Cemento y Concreto ha firmado con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua un convenio de confidencialidad con el objeto de validar la innovación tecnológica: Cemento Portland, mortero y concreto resistentes a la CMIC.

Tenemos interés para validar en conjunto este nuevo producto y en analizar esta transferencia de tecnología para de ser posible implementarla en nuestro sistema de producción, después si los resultados son favorables planeamos producirlo industrialmente, considerando que será un beneficio enorme a la infraestructura hidráulica del país.

### **Objetivo.**

#### Objetivo General

Desarrollo químico y su validación de un cemento, un concreto y un mortero especial – resistentes al biodeterioro – para asegurar que la infraestructura hidráulica utilizando estos materiales, garanticen su mejor funcionamiento y durabilidad –

#### Objetivos Específicos

Armonizar la información del cemento fabricado por Cementos Mexicanos a través de su Centro de Tecnología Cemento y Concreto desarrollando una correlación entre las materia prima y su composición para utilizarla como base en la obtención de una materia prima ideal para elaborar un cemento, concreto y un mortero especial – resistente al biodeterioro.

Realizar un diagnóstico técnico de validación, identificando aquellas acciones que permitan coadyuvar al Centro de Tecnología de Cemento y Concreto y recursos asociados en el proceso de validación de la tecnología transferida.

Identificar y analizar los factores químicos naturales de la materia prima, causantes de la degradación del cemento.

Jerarquizar y programar el uso de aquellos componentes de las materias primas y acciones que permitan disminuir el deterioro del cemento y productos asociados.

Formular la composición ideal y acciones para la obtención con buena calidad y comportamiento del cemento objeto de este proyecto.

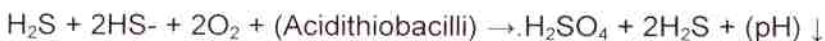
### **Estado de avance.**

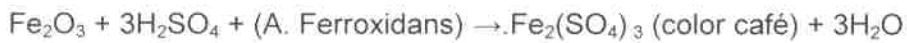
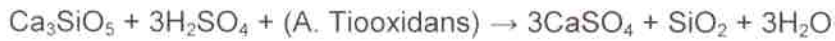
La principal característica del cemento resistente al biodeterioro es su carencia de materiales atractivos a la actividad microbiana, que coadyuven al metabolismo microbiano a producir ácido sulfúrico, herramienta esencial, ejecutor de la corrosión ácida;

Para lograr esto, debe hacerse una cuidadosa selección de las materias primas;

Los sulfatos son un mineral común en la mayoría de las arcillas y tierras calizas que se utilizan como materia prima en la fabricación del cemento Portland.

Todo tipo de azufre es útil a las bacterias (aerobias o anaerobias) aun ellas lo almacenan como azufre elemental, y es utilizado para la producción de ácido sulfúrico:





El ácido sulfúrico es utilizado por la bacteria para disolver el hidróxido de calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el silicato de calcio ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), lo que conlleva a la disolución del concreto.

El concreto, cuando es nuevo, tiene un pH relativamente alto, baja permeabilidad. Sin embargo, sin importar qué tan pequeños sean los poros, no se puede impedir el paso de los compuestos (de origen bioquímico) que disuelven el concreto (estos compuestos pueden estar constituidos de diferentes tipos de ácidos poliónicos, aparte del característico ácido sulfúrico).

#### Composición bajo ensayo.

#### Clinker:

SiO <sub>2</sub>	---	21.57 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	5.88 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	3.04 %
CaO	---	65.81 %
SO <sub>3</sub>	---	0.12 %
MgO	---	2.52 %
Na <sub>2</sub> O	---	0.31 %
K <sub>2</sub> O	---	0.74 %
GSC	---	95.51 %
MS	---	2.39 %
MA	---	1.55 %

#### Cemento:

Clinker	---	79.41 %
Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (talco)	---	2.51 %
SiO <sub>2</sub> (arena silica)	---	18.07 %

#### Maximo 20% de Silice.

Se han recibido muestras de clinker modificado por parte del área de cementos y se ha programado el desarrollo de pruebas:

- Cubos de mortero como etapa inicial, se probaran bajo condiciones de ataque reales para determinar su resistencia al ataque microbiológico.
- Si los resultados son favorables se realizaran mezclas en concreto para obtener los siguientes datos: Trabajabilidad, Fraguado, Resistencia a la compresión, f'c

Las pruebas de resistencia al biodeteriuro serán programadas para marzo de 2011.

En lo que respecta al resultado de las pruebas y graficas obtenidas Cementos Mexicanos se reserva el privilegio de no desglosarlos.

Atentamente.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Bernardo Martínez Sánchez', written in a cursive style.

Arq. Bernardo Martínez Sánchez  
Gerente Transferencia de Tecnología