

# NOTAS TÉCNICAS

## LOS CEMENTOS COMPUESTOS: UN EXTRAORDINARIO AVANCE EN LA TECNOLOGÍA DEL CEMENTO HIDRAULICO



© **INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN - INECYC**  
**Primera Edición: 2010**

Fuente: Nota Técnica escrita por el Ing. Raúl Camaniero

Coordinación: INECYC

Portada e Impresión: Imprenta NOCIÓN - Quito

INECYC entrega la serie “**Notas Técnicas**”, con el objeto de difundir la tecnología y el uso eficiente del cemento y hormigón. Ni los autores ni el Instituto, se hacen responsables por cualquier error, omisión o daño por el uso de esta información. Estos documentos no intentan suplir normas técnicas, prácticas constructivas ni los conocimientos y criterios de los profesionales responsables de la construcción de las obras.

ISBN: 978-9978-390-04-7

---

INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN - INECYC  
Avenida de los Shyris N 39 30 y El Telégrafo  
Teléfono (593 2) 246 75 11  
Fax (593 2) 245 75 08  
Quito - Ecuador  
[www.inecyc.org.ec](http://www.inecyc.org.ec)

# LOS CEMENTOS COMPUESTOS: UN EXTRAORDINARIO AVANCE EN LA TECNOLOGÍA DEL CEMENTO HIDRAULICO



Estocolmo 1.933

El legado a la humanidad del Cemento portland por parte de investigadores como John Smeaton, L. J. Vicat, Joseph Aspdin y otros permitió el desarrollo acelerado de la industria de la construcción. Creo que se podrían marcar dos eras claramente diferenciadas: desde el Neolítico hasta el siglo 19 donde el aglomerante universal era la cal y eventualmente el yeso y desde ese siglo hasta nuestros días donde prevalece el cemento hidráulico.



Presa Hoover E.U. 1.936



Perforación de un túnel



Salginatobel, Suiza, 1.930

En el siglo 20 se construyeron miles de obras con hormigón: puentes, presas, carreteras, aeropuertos, túneles, edificios, etc. En 1.950 ya se producía en el mundo entero alrededor de 400 millones de  $m^3$  de hormigón. Para 1.960 la producción rebasaba los

mil millones de  $m^3$ . En el año 2.000 se fabricaron 1.670 millones de toneladas de cemento hidráulico. En el 2.008 se consumieron 2.808 millones de toneladas (con una tonelada de cemento se fabrica alrededor de 3  $m^3$  de hormigón).



Puente ferroviario sobre el río Paraguay, 1.947

En los años 30's, siendo la tecnología del hormigón aún muy joven, los calculistas entusiasmados por las propiedades mecánicas inmediatas que presenta este material, proyectan períodos de diseño de 60 años y mayores y con este criterio se construyen muchísimas obras en los EE.UU. y los países industrializados.

Sin embargo, en los años 70's ya se observan numerosas construcciones deterioradas y con fallas prematuras, algunas demuestran tener muy poca resistencia a los sismos; pero se consideran como casos excepcionales producidos por errores en el diseño, materiales defectuosos y/o procedimientos de construcción inadecuados.



Pero las fallas son generalizadas y se presentan en diferentes tipos de obras de hormigón en muchos países. En Norteamérica, el National Materials Advisor Board (Junta Consultiva Nacional sobre Materiales), investiga el asunto e informa que: “alrededor de 253.000 tableros de puentes de menos de 20 años de edad sufrían algún grado de deterioro y se presentaban 35.000 nuevos casos cada año”. Se reportaron situaciones similares en el Canadá y en otros países en túneles submarinos recién construidos. En la mayoría de los casos, el diseño estructural, los materiales empleados y los procedimientos de construcción utilizaron los conocimientos y la tecnología más avanzada de la época.

Como sucede con frecuencia en estos casos, la respuesta de los constructores de puentes fue la de emplear resistencias a la compresión más elevadas. Esto, lejos de constituir una solución, más bien agravó el problema. De acuerdo a una investigación realizada por el National Cooperative Highway Research Program (Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras), más de 100.000 tableros de puentes de hormigón sufrieron rajaduras transversales en toda su altura, espaciadas de 1 a 3 metros, antes que el hormigón tuviera un mes de edad.

El deterioro de estructuras de hormigón se continúa presentando en nuestra época, ya adentrados en el siglo XXI. La razón fundamental está en que algunos tipos de daños se manifiestan solamente después de muchos años de construida la obra y, generalmente tienen un desarrollo lento. Periódicamente se presentan nuevas técnicas para reparar y rehabilitar obras, y en particular puentes que han sufrido deterioros. El costo de reparación y rehabilitación de las estructuras de hormigón se eleva, solo en los EE.UU., a algunos miles de millones de dólares.

La conclusión a la que se llegó con ese estudio fue evidente: no se conoce suficientemente la mecánica del desarrollo de la resistencia en el hormigón ni las causas de su deterioro; es necesario investigar para encontrarlas y buscar los mecanismos de contrarrestarlas y asegurar la durabilidad de las estructuras. Nace entonces una nueva tecnología que hoy la conocemos como “Patología del Hormigón”.

Garantizar la durabilidad debe ser la prioridad en cualquier tipo de obra civil. En el hormigón,



La reparación de estructuras es frecuente



Ahora las obras importantes como los puentes, llevan cámaras de registro en donde se monitorea permanentemente el comportamiento de la estructura.

lastimosamente, se le ha dado preeminencia a la resistencia a la compresión y, generalmente, es la única que se mide. En muchas estructuras, la resistencia a la compresión pasa a un segundo plano, como en los pavimentos, aunque algunas instituciones, por un concepto mal interpretado, siguen especificando resistencia a la compresión y módulo de rotura. Un pavimento, debe ser especificado por su resistencia a flexión (módulo de rotura MR) y ser evaluado en función de esta resistencia, a menos que previamente, en base a ensayos en laboratorio y utilizando los materiales a ser empleados en la obra, se haya determinado la relación con otra resistencia (tracción o compresión).

Pero, todas las propiedades mecánicas del hormigón, por elevadas que sean, no pueden contrarrestar ciertos agentes agresivos. Entonces, las estructuras de hormigón que se construyen no solo que deben diseñarse para ser resistentes a las solicitaciones inmediatas, sino que deben permanecer estables y resistentes durante toda su vida útil, soportando los agentes que atacan al hormigón: la intemperie, la carbonatación, los cambios climáticos, la acción de las aguas saladas, sulfatadas, ácidas, cloruros, desechos industriales, la reactividad álcali - sílice, etc., etc.

Hasta mediados del siglo pasado no se conocía o estaba en el plano de la investigación, la acción de la mayoría de los agentes agresivos. La tecnología actual ha desarrollado los mecanismos para contrarrestar esos agentes y los vamos a analizar con detalle. En esta primera entrega presentamos la acción de los sulfatos.

El azufre en sus múltiples formas se encuentra presente en todo el planeta y con mayor intensidad en los países con actividad volcánica pues es una sustancia que se proyecta con las erupciones. En el Ecuador, con volcanes en permanente actividad,

las sales de azufre están presentes en las llanuras de la Costa, del Oriente y todos los valles de la región Interandina.



Tungurahua



Reventador



Pichincha



Sangay

Entre las obras civiles, las hidráulicas, sanitarias, pavimentos rígidos y cimentaciones profundas parece que están expuestas a las peores condiciones de exposición a un sinnúmero de agentes altamente agresivos. Las plantas de tratamiento de aguas deben lidiar con aguas conteniendo sulfatos, a los que se suman los sulfatos utilizados en estas plantas; las obras sanitarias deben manejar aguas servidas con elevados contenidos de sustancias químicas producto de los desechos industriales, suelos sulfatados y humedad constante; las obras marítimas están sometidas a la acción de los cloruros, sulfatos y materia orgánica.

Las causas para que el hormigón sea vulnerable a esos agentes se encuentran en las materias primas y en el proceso de fabricación del cemento; este es el producto de la calcinación hasta un principio

de fusión (alrededor de 1.400 °C) de una mezcla rígidamente homogénea de calizas y arcillas, molida hasta convertirse en una fina harina conocida con el nombre de "crudo".



Mina de arcilla



Piedra caliza

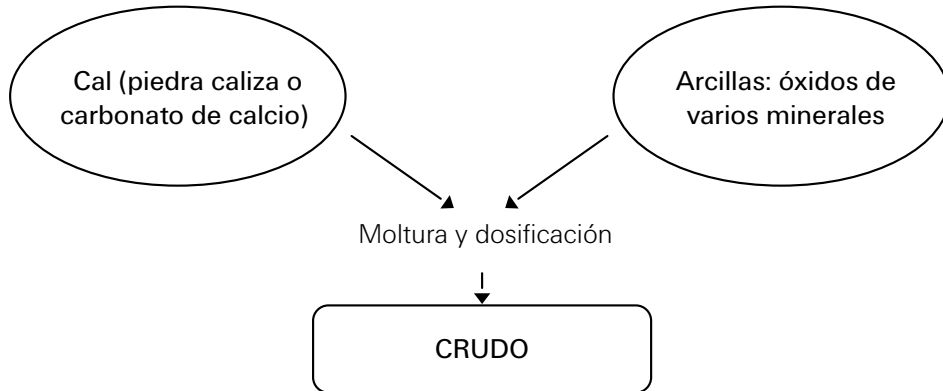


Mina de caliza

En el proceso de cocción, se combina la cal con los óxidos de la arcilla y se forman sales solubles que tienen propiedades cementantes: silicatos,

aluminatos, ferroaluminatos de calcio y una treintena más de componentes.

### Esquemáticamente



Calcinación a alrededor de 1.450 °C



**CLINKER PORTLAND**

+

CAL LIBRE  
1 a 2 %



Yeso mineral

Después de la molturación del clinker con pequeñas adiciones de yeso tenemos cemento portland ordinario o como se lo conoce universalmente "**opc**"

Todos los cementos portland que se fabrican tienen al menos un 1 % de cal libre que ya ocasiona problemas.

Pero lo más crítico se produce al momento de fabricar hormigón o mortero, cabe decir cuando



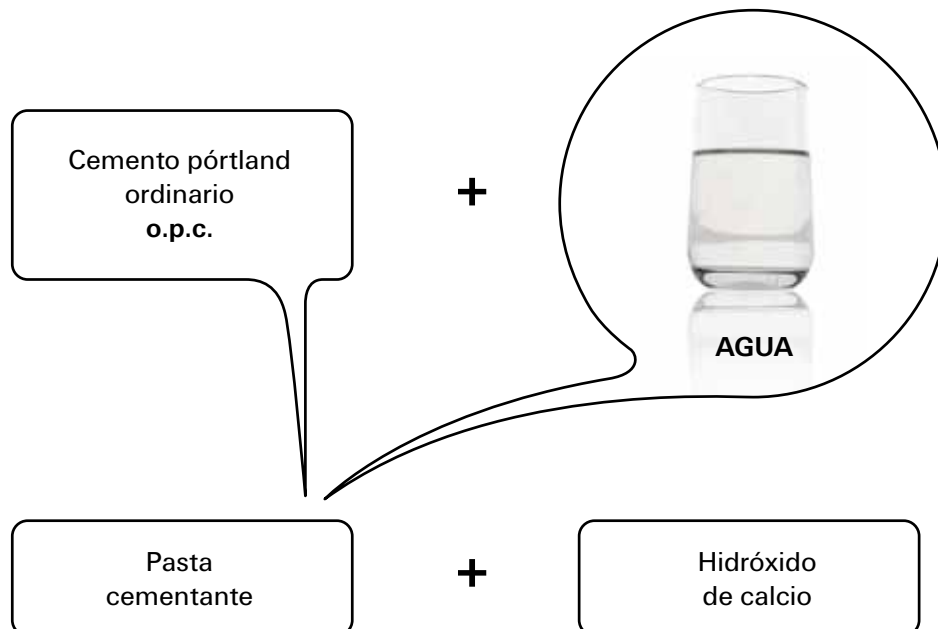
Molino de cemento

se pone en contacto el agua con el cemento; comienzan las reacciones químicas que dan lugar a la pasta cementante, pero en el proceso se libera otra

cantidad de cal en forma de hidróxido de calcio y esta es considerable: hasta un 25 % de la masa del cemento.



Las eflorescencias en el hormigón se producen cuando la estructura está sujeta a la humedad. El agua disuelve las sales solubles del cemento (cal) o de los materiales granulares y arrastra por las porosidades capilares esas sales hasta salir a la superficie. Allí el agua se evapora y deja las manchas sobre la superficie del hormigón. Estas son blanquecinas si las sales son de cal o grises si son de otra naturaleza.



La cal libre provoca algunos problemas al hormigón desde unos elementales, hasta otros muy complejos y peligrosos:

- Siendo un material muy soluble en el agua, es arrastrado fácilmente fuera del hormigón (lixiviación de la cal) provocando las eflorescencias y dejando al hormigón poroso, con el riesgo de ingreso de sustancias agresivas.
- Cuando la cal absorbe humedad, incrementa considerablemente su volumen, "se hincha" y cuando se seca se contrae provocando la "inestabilidad de volumen" del hormigón.
- La cal es una sustancia química muy "amigable"; se combina fácilmente con cualquier otro componente. Esta es la razón por la cual, en el proceso de fabricación del cemento reacciona con todos los óxidos que componen la arcilla. Si se encuentra con sales de azufre (sulfatos), que en nuestro país es muy abundante, se forma sulfato de calcio (yeso) con incrementos de volumen del orden del 18 %. Esto significa el deterioro progresivo de cualquier estructura que empieza en el recubrimiento y termina destruyéndola.



- Si se da una fatal coincidencia del encuentro de hidróxido de calcio, sulfato y aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) se puede producir **etringita**. La expansión de esta sal, medida por Bogue y Lerch es de un 227 % !!!!!, es decir la destrucción total de cualquier estructura de hormigón.

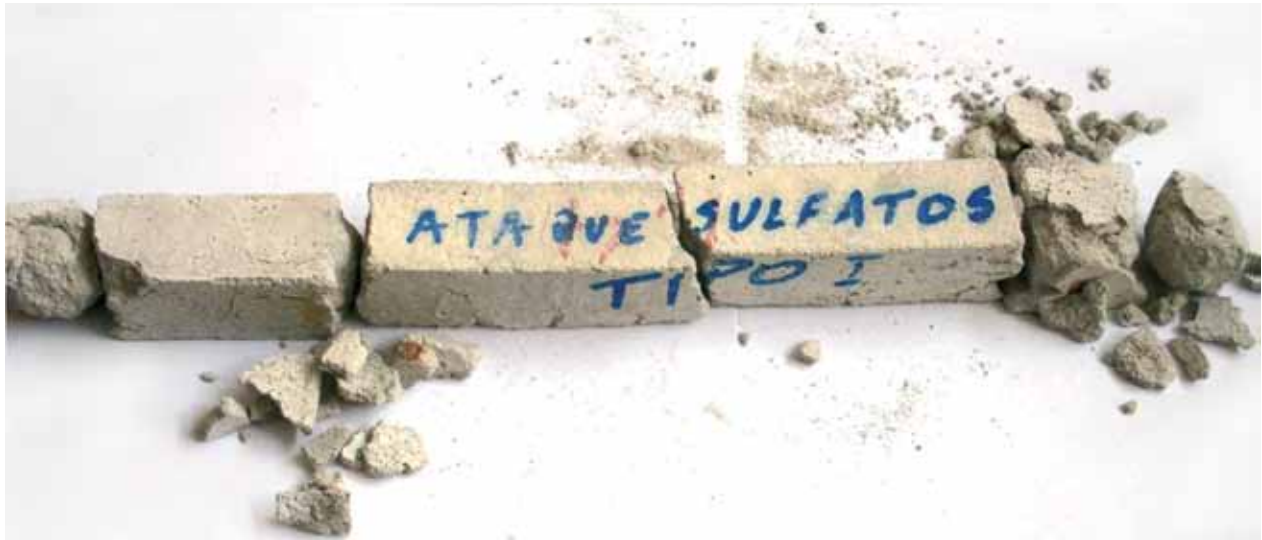
Existen numerosos ejemplos de fallas estructurales producidas por estas acciones, los ensayos de laboratorio confirman y ratifican esos riesgos. En laboratorio se fabrican barras de mortero de cemento con arena de sílice normalizada y se las somete a una solución de sulfato de sodio durante 180 días. Periódicamente se extraen las barras y se las mide para determinar su deformación.



Barra de mortero con cemento portland puzolánico tipo IP después de 180 días de inmersión en sulfato de sodio; deformación final: 0,04 % de la longitud inicial, (la norma considera tolerable hasta 0,10 %)



Aparato para medir la longitud de las barras de mortero



Barra de mortero con cemento portland ordinario (opc) después de tres semanas en solución de sulfato de sodio



Barras de mortero con cemento portland ordinario (opc) después de 5 semanas en solución de sulfato de sodio (prácticamente se disolvieron)

Buscando las soluciones al problema, los investigadores se encontraron con un producto milagroso: **la puzolana**; veamos qué es este material excepcional:

#### Definición del ACI y de la ASTM:

**Puzolana** - material silíceo o sílico aluminoso que por si solo posee muy poco o ningún valor cementante pero que finamente pulverizado y en presencia de agua, reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio, a temperatura ambiente, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

En otras palabras, la puzolana fija la cal, combinándose químicamente con ella, formando compuestos

cementantes y evitando que pueda reaccionar con cualquier agente agresivo como los sulfatos. Otra cualidad excepcional de este producto es que la reacción con la cal es tardía; empieza cuando se ha liberado el hidróxido de calcio y es lenta, liberando mucho menor calor de hidratación que el **opc** y aumentando la resistencia del hormigón con el paso del tiempo.

Se pueden emplear dos tipos de puzolana: la primera se obtiene de los depósitos naturales de las deyecciones volcánicas, en forma de espuma o pumicite, tobas, etc. Otra vez juegan un papel muy importante los volcanes. La segunda proviene de subproductos de la industria metalúrgica en forma de "cenizas volantes" (fly ash), microsílíce y escoria de altos hornos.

En América, la ASTM (American Society for Testing and Materials) y el ACI (American Concrete Institute) han contemplado las estructuras sometidas a la acción de los sulfatos.

**El Reglamento para Hormigón Estructural del ACI 318S-08**, en el Capítulo 4: "**Requisitos de Durabilidad**", define varias condiciones de exposición a las que pueden estar sujetas las estructuras y establece categorías de acuerdo a la severidad de la exposición. En la siguiente tabla se ha extraído la parte correspondiente a la acción de los sulfatos:

**Tabla 4.2.1**  
**Categorías y Clases de Exposición**

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
			Sulfatos solubles en agua (SO <sub>4</sub> ), en el suelo, % en masa	Sulfato (SO <sub>4</sub> ) disuelto en agua, ppm
S Sulfato	Leve	S0	SO <sub>4</sub> < 0,10	SO <sub>4</sub> < 150
	Moderada	S1	0,10 ≤ SO <sub>4</sub> < 0,20	150 ≤ SO <sub>4</sub> < 1.500 Agua de mar
	Severa	S2	0,20 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 2,00	1.500 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 10.000
	Muy severa	S3	SO <sub>4</sub> > 2,00	SO <sub>4</sub> > 10.000

La Tabla 4.3.1 del mismo capítulo del ACI 318S establece los requisitos que debe cumplir el hormigón expuesto a las clases de exposición señaladas arriba.

**TABLA 4.3.1**  
**Requisitos para el hormigón según la clase de exposición**

Clase de exposición	Relac. a/mc máx	f'c mínima MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Tipos de material cementante <sup>A</sup>			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150 (INEN 152)	ASTM C 595 (INEN 490)	ASTM C 1157 (INEN 2 380)	
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0,50	28	II <sup>B,C</sup>	IP(MS) IS(<70)(MS)	MS	Sin restricción
S2	0,45	31	V <sup>C</sup>	IP(HS) IS(<70)(HS)	HS	No se permite
S3	0,45	31	V + puzolanas o escoria <sup>D</sup>	IP(HS) + puzolanas o escoria <sup>D</sup> o IS(<70) (HS) + puzolanas o escoria <sup>D</sup>	HS + puzolanas o escoria <sup>D</sup>	No se permite

A Se pueden permitir combinaciones alternativas de materiales cementantes diferentes a los mencionados en la tabla 4.3.1 siempre que sean ensayados para comprobar la resistencia a los sulfatos y deben cumplirse los criterios de la tabla 4.5.1.

B Para exposición al agua marina, se permiten otros tipos de cemento portland con contenidos de hasta 10 por ciento de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) si la relación a/mc no excede 0,40.

C Se permiten otros tipos de cemento como el tipo III o tipo I en exposiciones clase S1 o S2 si el contenido de C<sub>3</sub>A es menor al 8 ó 5 por ciento, respectivamente.

D La cantidad especificada de puzolana o escoria que se debe usar, no debe ser inferior a la cantidad que haya sido determinada por experiencia en mejorar la resistencia a sulfatos cuando se usa en hormigones que contienen cemento tipo V. De manera alternativa, la cantidad especificada de puzolana o escoria que se debe usar no debe ser menor a la cantidad ensayada según la ASTM C 1012 (INEN 2503) y debe cumplir con los requisitos de 4.5.1.

N/A No aplica

El ACI 318, también permite utilizar las combinaciones alternativas de materiales cementantes siempre que se hayan realizado comprobaciones en laboratorio

y los valores de expansión máxima alcanzados en barras de mortero estándar, sean los que se indican en la tabla que se muestra a continuación.

**TABLA 4.5.1**

**Requisitos para establecer la conveniencia de las combinaciones de materiales cementantes expuestos a sulfatos solubles en agua**

Clase de exposición	Expansión máxima al ser ensayada usando ASTM C 1012 (INEN 2 503)		
	A 6 meses	A 12 meses	A 18 meses
S1	0,10 por ciento		
S2	0,05 por ciento	0,10 por ciento <sup>A</sup>	
S3			0,10 por ciento

<sup>A</sup> El límite de expansión a los 12 meses solo se aplica cuando se ha rebasado el límite a los 6 meses.

Es necesario resaltar que los cementos compuestos solos o con la adición de puzolanas artificiales, son capaces de contrarrestar hasta las condiciones más severas de exposición a sulfatos (S3).

Experiencias locales, mediante ensayos de laboratorio rígidamente controlados han demostrado que el cemento portland puzolánico tipo IP fabricado en el país puede contrarrestar eficazmente acciones moderadas de sulfatos y con la adición de un pequeño porcentaje de microsílíce, inclusive acciones severas.

Para que la acción de la puzolana sea efectiva, es necesario cumplir con una de las condiciones más importantes para garantizar la calidad de un

hormigón: **el curado**. En la definición de puzolana se enfatiza que la reacción química cal – puzolana se realiza **en presencia de agua**, entonces es de vital importancia mantener el curado de las estructuras el más largo período de tiempo que sea practicable pero que en ningún caso puede ser menor a 7 días. Descuidar este aspecto perjudica doblemente al hormigón: por una parte la puzolana no puede fijar la cal combinándose con ella, dejando al hormigón vulnerable a la acción de agentes agresivos y por otro lado, la puzolana permanece dentro del hormigón como un relleno inerte sin contribuir con el cemento a unir las partículas, ni incrementar la resistencia del hormigón.

## BIBLIOGRAFÍA

ASTM - American Society for Testing and Materials.  
Volúmenes: 04.01; 04.02  
ACI - American Concrete Institute  
Wikipedia - La Enciclopedia Libre de Internet  
Departamento de Ensayo de Materiales.- Facultad de Ingeniería, Universidad Central  
Asefa - Agresividad del Suelo hacia Estructuras de Hormigón.  
Ataque Químico  
Cementos Minetti - Acción de los Sulfatos  
S. Martínez - Ramírez; M. T. Blanco - Varela: Instituto de

Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja  
Wikilibros - Patología de la Edificación. Estructuras de Hormigón  
Infotécnica Loma Negra - ¿ARS para Todos los Ambientes Agresivos?  
Ma C. Angel Martínez I. Fontao Orosa, et al. - Patologías del Hormigón - Geogaceta  
Ponce de Maio María Beatriz - La Durabilidad del Hormigón; Intemin - Segemar  
CIATH Argentina - Procesos Químicos de Deterioro del Hormigón  
Construmática - Suelos Agresivos.



ISBN 978-9978-390-04-7



9 789978 390047

[www.inecyc.org.ec](http://www.inecyc.org.ec)

***inecyc***  
INSTITUTO ECUATORIANO  
DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN

Av. de los Shyris N 39-30 y El Telégrafo  
Teléfono: (593-2) 246 75 11  
Fax: (593 2) 245 75 11  
Quito - Ecuador