



CONCRETO ADITIVOS PARA CONCRETO

CONSTRUYENDO CONFIANZA





CONTENIDO

4	Antecedentes
6	Plastificantes / Plastificantes retardantes
8	Retardantes
9	Estabilizadores
10	Superplastificantes
14	Acelerantes
20	Incorporadores de aire
22	Reductores de retracción
23	Inhibidores de corrosión
25	Impermeabilizantes
26	Activadores

ANTECEDENTES

EL OPUS CAEMENTICIUM ROMANO fue sin duda uno de los avances tecnológicos más importantes de la construcción en el mundo antiguo. Este concreto que tiene una estrecha similitud a nuestro CCR (Concreto Compactado con Rodillo) se constituyó en el soporte estructural de obras como el Coliseo, el Panteón o el Puente de la Guardia que se aprestan a cumplir los dos milenios.

El concreto de la antigüedad tenía como su ligante principal la cal viva o apagada, que los romanos buscaban de la mayor pureza posible. La transformación del óxido o hidróxido de calcio en carbonato de calcio (caliza), volvía a darse en el tiempo cuando el CO_2 de la atmósfera reaccionaba con el agua y con estos compuestos inestables. De esta manera la caliza que fue a través del fuego transformada en Cal, volvía con el tiempo a convertirse en la roca que fue.

El proceso de endurecimiento de los morteros y concretos de cal era extremadamente lento debido a que la reacción del CO_2 de la atmósfera, con los compuestos de calcio progresa muy lentamente (mm/año). Estos ligantes son los que se conocen como ligantes aéreos, puesto que endurecen con los elementos presentes en la atmósfera.

Sin embargo como bien lo describió el constructor retirado Marco Vitrubio hacia el año 27 a.c. en su libro /de la Arquitectura/, el Opus Caementicium podía aumentar la velocidad de endurecimiento e incluso endurecer bajo agua (sin presencia del aire), si se utilizaba un polvo que se encuentra en la Bahía de Nápoles y en las tierras circundantes al volcán Vesubio. Este polvo no es otra cosa que sílice inestable que se combina rápidamente con los compuestos de calcio y que da lugar entonces a lo que hoy en día llamamos ligante hidráulico, puesto que fragua y endurece bajo agua.

Este material y conocimiento se difundió a todo el mundo romano para construir acueductos, fortalezas, puentes, termas, puertos etc. La enorme infraestructura construida por este imperio debía mantenerse y repararse, de éste modo las preocupaciones por hacer obras mas durables que requieran la menor inversión económica para continuar su funcionamiento, fue igual que hoy, una preocupación constante.

En el caso particular de los canales elevados de agua, que hoy en día llamamos acueductos, debían ser estancos para minimizar las pérdidas del líquido que transportaban. Hoy existe evidencia que los recubrimientos interiores de estos canales elevados, se hacían en capas sucesivas de morteros cada vez mas finos y su acabado final lo constituían estucos. Para contribuir a la estanqueidad de estas estructuras se tiene noticia que se emplearon en algunos casos leche, sangre, manteca de cerdo y hasta huevos. Independientemente de la efectividad de estos aditivos para cumplir en este caso un papel imper-



meabilizante, vemos que son en extremo costosos y debieron usarse sólo en casos muy específicos. La mayoría de estas opciones casi culinarias, actuaban como incorporadores de aire y bloqueadores de poros. Estas prácticas sobrevivieron y para finales del siglo XVIII aún se empleaban para ayudar a morteros de mampostería (en casos muy excepcionales) a no lavarse por acción del mar, como lo fue el caso de la fortaleza de San Felipe de Barajas en Cartagena.

La necesidad de modificar las propiedades de un ligante con base en cal, han sido siempre una constante durante la historia de la construcción. De esta forma el Coronel Treussart (1829) describe como usó agua hirviendo para apagar la cal debido a que afirmaba que la velocidad de endurecimiento del mortero se acortaba y se lograba al final un material más resistente.

La popularización del concreto hecho con cemento Portland durante el último cuarto del siglo XIX y su extensa difusión durante el inicio del siglo XX, hizo que la industria química y de la construcción buscara soluciones para modificar las propiedades de este nuevo Opus Caementicium, de modo que el material se ajustara a las necesidades de los procesos constructivos y de las edificaciones. Es así como en la década de 1870 ya se identificaron compuestos que aceleran la hidratación y otros que la retardan. En el caso particular de los acelerantes se patentaron por primera vez en 1885 en Inglaterra. Reductores de agua basados en ácidos carboxílicos hidroxila-



1. Cubierta de 43 m de luz del Panteón - Roma (125 d.c.) Foto del Autor.
2. Opus Caementitium - Coliseo Romano - 80 d.c. Foto del Autor.
3. Teatro de Ostia Antica - 12 a.c. Foto del Autor.



dos fueron patentados en alemania en 1932¹⁾ y luego en 1939²⁾ por Kaspar Winkler. Igualmente uno de los trabajos iniciales sobre compuestos para controlar el fraguado y reducir la cantidad de agua en el concreto fue desarrollado en 1936 por Kennedy³⁾ quien describió los efectos de dispersión de pastas de cemento Portland cuando empleó sales de ácido ligno-sulfonado. Si la década de 1930 corresponde al momento de nacimiento de los plastificantes, el final de los 70's vieron la salida al mercado y la construcción de los superplastificantes. La mas notable de las fuentes iniciales sobre superplastificantes corresponde a las memorias de dos simposios que tuvieron lugar en Canadá en 1978⁴⁾ y en 1981⁵⁾.

La investigación no ha cesado un solo día, al final del siglo XX tiene lugar en Japón como evolución del mercado de pinturas el origen de los superplastificantes de ultra alto poder. Los polycarboxilatos son moléculas que multiplican por mas de 5 veces el tamaño de las moléculas originales de los superplastificantes (naftalenos, vinilos y melaminas). Son el producto de un enorme esfuerzo de investigación y que superan en desempeño

y hoy en costo (son mas eficientes) la generación anterior de superplastificantes. Los polycarboxilatos resuelven viejos problemas asociados con la plasticidad del concreto y nos permiten correr los límites de reducción de agua y pasta hacia niveles que hace apenas unos años atrás ni siquiera soñabamos.

Sin duda la química y el trabajo de aquellos dedicados a la investigación molecular, nos seguirán dando sorpresas las próximas décadas, somos los usuarios del concreto y aquellos quienes diseñamos el material quienes debemos aprovechar las múltiples tecnologías hoy disponibles para hacer concretos más eficientes, de mayor desempeño y más sostenibles.

Las posibilidades de hoy con respecto a usar tecnologías sustitutas del cemento portland, la introducción de geopolímeros, de concretos ultraoptimizados (bajos contenidos de pasta) o concretos con altísimos contenidos de adiciones minerales, van de la mano con el desarrollo de tecnologías químicas de aditivos que nos permiten usar un material con mejores propiedades en estado fresco como endurecido.

1) Winkler, K. German Patent dated May 23, 1932 and British Patent No. 379,320, 1932.

2) Winkler, K. U.S Patent No. 2,174,051, 1939.

3) Kennedy, H.L., "Portland Cement-Effects of Catalysts and Dispersion" Industrial and Engineering Chemistry, V.28, 1936, pp.963-969.

4) Superplasticizer in Concrete SP-62, American Concrete Institute Detroit, 1979, 436 pp.

5) Developments in the Use of Superplasticizers, SP-68, American Concrete Institute, Detroit, 1981, 572 pp.

PLASTIFICANTES

PLASTIFICANTES RETARDANTES

LOS PLASTIFICANTES HAN SIDO CON CIERTA FRECUENCIA SUBESTIMADOS PERO SON EN REALIDAD SUSTANCIAS CUYA ALTÍSIMA EFICIENCIA LES PERMITE PERDURAR EN LA PRODUCCIÓN ACTUAL DE CONCRETO.

Basadas en compuestos orgánicos, los plastificantes logran optimizar los diseños de concreto disminuyendo las necesidades de agua y cemento para alcanzar las propiedades exigidas por la construcción.

El efecto directo de un plastificante sobre la pasta de cemento es disminuir la viscosidad de la misma. Un plastificante hace que la pasta de cemento se vuelva más "líquida", fluya más rápido. Lo logra recubriendo las partículas de cemento y provocando una repulsión entre estas. Cuando las partículas se repelen entre sí, existe menos resistencia al flujo del conjunto (menos fricción), tiene lugar además una eliminación de micro flóculos, lo que permite la liberación y mejor distribución del agua.

De esta forma la pasta de cemento fluye más y por ende el concreto también lo hace. Una mayor fluidez del concreto permite entonces disminuir la cantidad de agua del mismo, modificando por lo tanto las propiedades de la pasta (o pegante), que con menos agua aumentará su resistencia en estado endurecido.

Si en vez de eliminar agua se elimina simultáneamente agua y cemento (pasta) conservando la misma calidad de pasta (misma proporción de agua y cemento), se puede mantener la resistencia y fluidez con un menor contenido de agua y cemento. El costo de un plastificante es en general más bajo que el de agua y cemento que permite ahorrar, es allí donde se logra un concreto optimizado.

Los plastificantes deberían ser llamados reductores de pasta en vez de reductores de agua. Ellos permiten mantener una resistencia y una manejabilidad dadas del concreto, con un menor contenido de cemento y agua. La tabla 1, expone un ejemplo de inclusión de un plastificante para una resistencia y un asentamiento dados.

Los concretos en general todos, antes de 1930 se fabricaron y usaron sin aditivos incluidos los plastificantes. Es más hoy en

día la mayor parte del concreto artesanal que se mezcla en las calles no incluyen aditivos, sin embargo estos concretos como lo muestra la tabla 1, son más costosos.

La fabricación de concreto a escala industrial exige el uso de ingeniería, una aproximación científica al material y la optimización del recurso. De esta forma como lo muestra la tabla 1, (que es una aproximación que depende de los materiales involucrados) incluir un plastificante permite una reducción de cemento y de agua logrando la misma fluidez y la misma resistencia a un menor costo.

La disminución de la pasta de cemento en el concreto además de un beneficio económico implica: disminución de la retracción del concreto, disminución de la cantidad de calor generado, disminución de la fluencia, disminución de la permeabilidad a los líquidos y un aumento en la resistencia a la abrasión, un ligero aumento en el módulo elástico y en general una mayor durabilidad del material.

Los plastificantes o reductores de agua (pasta) permiten la fabricación de concretos a un menor costo y con un mayor desempeño. Los plastificantes se incluyen en el concreto para que actúen directamente sobre el cemento y las adiciones, en algunas ocasiones cuando existe un porcentaje de finos importante en los agregados también pueden ser absorbidos por la superficie de estos y por lo tanto deben considerarse en el cálculo de su dosificación.

De acuerdo con el ACI un aditivo es una sustancia diferente al cemento, adiciones minerales, agregados y fibras, que se incluye en el concreto en un volumen inferior al 5% del peso del cementante. Como vemos las dosificaciones de los aditivos son en general bajas. Un plastificante como los **Plastiment®** se dosifican entre 0.2% al 0.7% del peso del cementante. Estas dosificaciones pueden aumentar incluso duplicándose para ciertas condiciones especiales como en Concreto Compactado con Rodillo o en concreto con bajos contenidos de pasta.

	Plastificante (Kg)	Cemento (Kg)	Agua (Kg)	A/C	Reduc. H ₂ O	Fluidez (Asent.)	Resistencia compresión	Precio (cemento + aditivo)
Concreto sin aditivo		320	208	0.65		10 cm	3000 psi	\$108.800
Más resistencia	1.44	320	187	0.59	10%	10 cm	3600 psi	\$112.026
Más plasticidad	1.44	320	208	0.65		18 cm	3000 psi	\$112.026
Igual A/C < cemento	1.44	288	187	0.65	10%	10 cm	3000 psi	\$101.146

Tabla 1. Principio de uso de un plastificante.

Existen numerosas clasificaciones de aditivos, sin embargo una de las mas usadas corresponde a la norma ASTM C 494. Esta norma cuya primera versión se remonta a 1962 establece hoy en día, los siguientes tipos de aditivos:

- Tipo A - Reductores de agua (Plastificantes).
- Tipo B - Retardantes.
- Tipo C - Acelerantes.
- Tipo D - Reductores de agua y retardantes.
- Tipo E - Reductores de agua y acelerantes.
- Tipo F - Reductores de agua de alto rango o superfluidificantes.
- Tipo G - Reductores de agua de alto rango y retardantes o superfluidificantes y retardantes.
- Tipo S - Desempeño específico.

Por supuesto la ASTM C 494 expone solo una de muchas clasificaciones, como puede ser la expuesta en la norma EN 934 que tiene una clasificación de aditivos similar, pero más amplia. (EEUU, Europa).

Dentro de la definición de un plastificante ambas normatividades exigen que la sustancia debe reducir por lo menos un 5% de agua, frente a un concreto sin aditivo para lograr igual manejabilidad y al mismo tiempo debe superar en por lo menos un 10%, la resistencia alcanzada por el concreto o mortero que no incluye el aditivo.

Los plastificantes se usan principalmente en aplicaciones donde no es deseable alterar los tiempos de fraguado. Sin embargo hoy en día la mayor parte de los plastificantes tienen un efecto de retardo que le permite al concreto ser transportado. Los plastificantes puros (Tipo A) son usados de forma limitada en el mercado.

Los plastificantes-retardantes (Tipo D) son los más usados en la fabricación de concreto premezclado puesto que aprovechan las ventajas de reducción de cemento y agua y al mismo tiempo tienen un efecto sobre los tiempos de fraguado que facilita su transporte sobre todo en climas cálidos.

La temperatura es en general un catalizador de las reacciones químicas y la hidratación del cemento no es una excepción. El uso de plastificantes-retardantes es prácticamente indispensable en el transporte, colocación y terminado de concretos en climas de alta temperatura puesto que le permite al material no fraguar antes de haber sido consolidado.

Los plastificantes están constituidos en general por compuestos orgánicos como carbohidratos, aminas en cierta medida y otros compuestos para regular su estabilidad.

La línea **Plastiment®AD** y **Plastiment®TM** se constituyen en las principales variedades de la línea plastificante. Así cada uno de los **Plastiment®** tiene unas características definidas en las que se balancea su capacidad de reducción de agua (pasta) y su poder retardante.

La figura 1, expone justamente la capacidad de reducción de agua para igual manejabilidad de dos **Plastiment®**. De esta forma todos los concretos comparados, tienen igual asentamiento, igual cuantía de cemento, lo único que cambia es una dosis creciente de aditivo y por lo tanto una cantidad decreciente de agua. Los aditivos plastificantes-retardantes

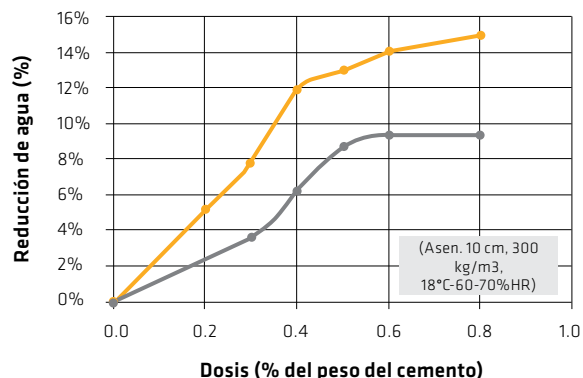


Figura 1. Curva de eficiencia de dos **Plastiment®** en los que se evidencia su capacidad de reducción de agua y su límite de saturación.

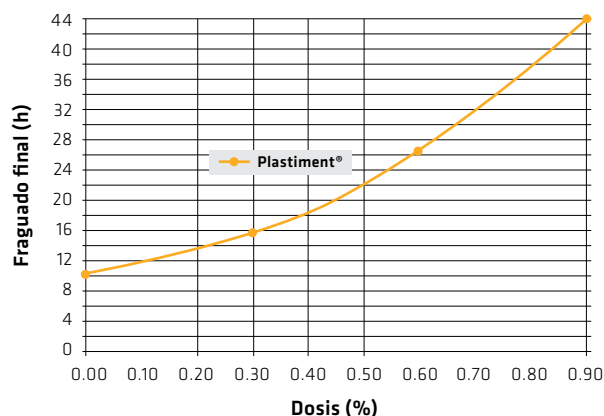


Figura 2. Curva de incremento en los tiempos de fraguado final para un **Plastiment®** dado con un cemento determinado. Temperatura 16°C - 20°C HR 65%-75%

son sustancias que nos permiten modificar los componentes del concreto optimizándolo, al mismo tiempo que ajustan las características del material a nuestras necesidades de fluidez, transporte y resistencia entre otros.

Como lo evidencia la figura 1, a partir de cierta dosis el efecto del aditivo, por lo menos en lo que se refiere a su capacidad plastificante tiene un límite. A partir de cierta dosis los aditivos no pueden fluidificar más el concreto por lo que el incremento en la dosis por encima de este límite se traducirá solo en un efecto sobre el fraguado.

La figura 2, nos muestra uno de los **Plastiment®** con mayor efecto sobre el fraguado para un cemento dado, como vemos la forma de la curva es exponencial lo que significa que sobredosisificaciones pueden llevar a fraguados extremadamente largos.

Las dosis de los aditivos establecidas para un concreto dado deben respetarse, si no se quieren efectos inesperados sobre el comportamiento del material.

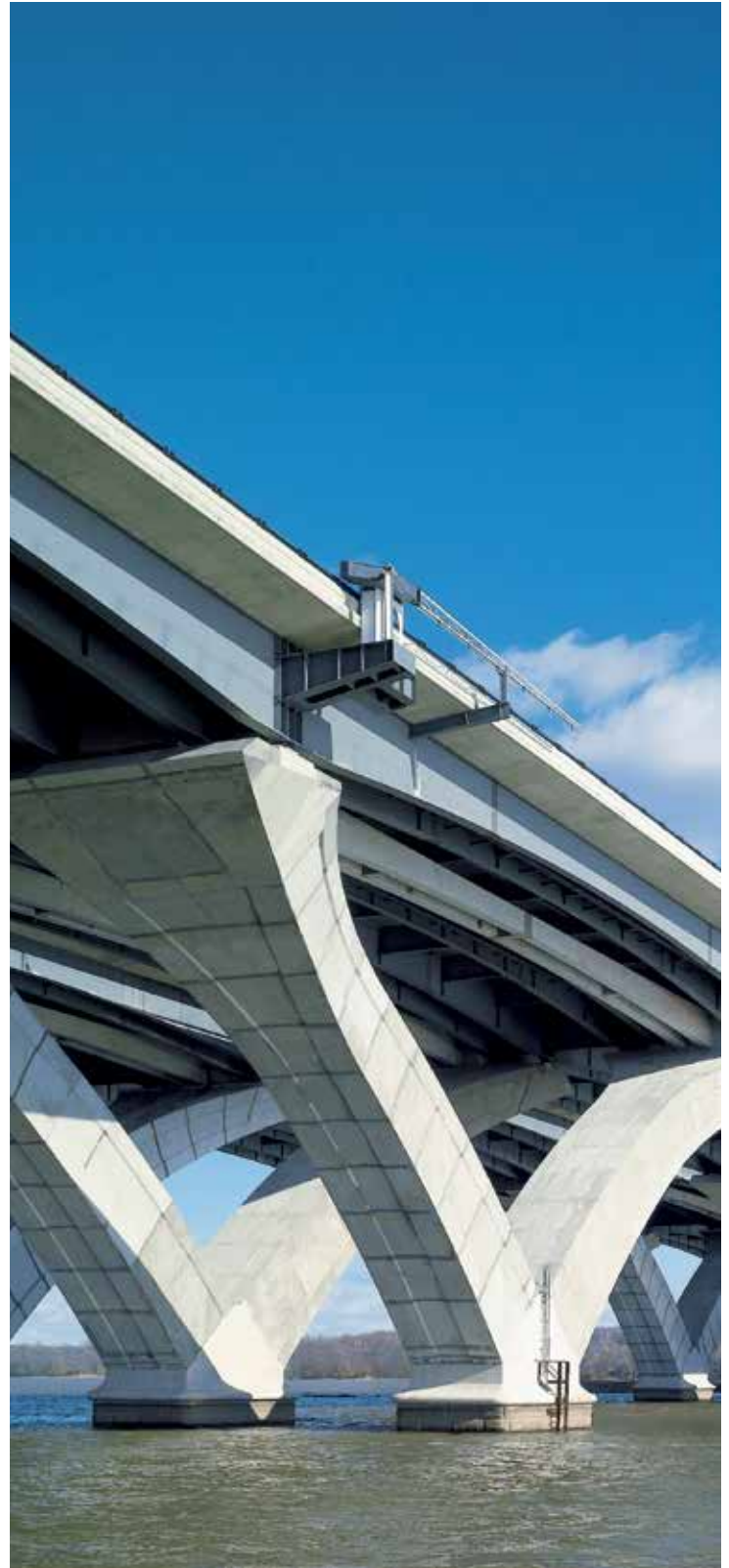
RETARDANTES

AL IGUAL QUE LOS PLASTIFICANTES PUROS

los aditivos exclusivamente retardantes son más bien poco usados en la construcción. Sin embargo en algunos casos si se requieren tiempos de transporte extremadamente largos, si la temperatura ambiente o del concreto son muy altas o si se trata de disminuir el calor de hidratación del concreto (como es el caso de concretos masivos), el uso de retardantes aislados o dosificados de manera individual permite una mayor versatilidad al momento de regular los tiempos de fraguado.

El uso combinado de un plastificante (reductor de cemento y agua) y un retardante de fraguado, permite así cambiar en el tiempo el ritmo de hidratación. En el caso de un concreto deslizado resulta conveniente disminuir en las noches la dosificación de retardante debido a la disminución de la temperatura ambiente. De esta forma se mantiene constante la dosis de plastificante pero se cambia la dosis del retardante dependiendo de las condiciones de avance de la estructura.

Los retardantes puros también han encontrado una aplicación clara en los morteros larga vida donde regulan el tiempo de fraguado a edades que pueden ir desde 3 horas hasta 72 horas. Un ejemplo de un retardante lo constituye el **SikaTard®E** que se usa principalmente en mortero larga vida, aunque también se ha usado con éxito en concreto.



ESTABILIZADORES

LOS ESTABILIZADORES representan un avance sensible en la tecnología de concreto y cada día son más usados. Como un adelanto reciente no aparecen en la clasificación normal de los aditivos, un ejemplo más de que las normas van a la zaga de la tecnología. Los estabilizadores son un tipo de aditivo cuyo efecto sobre el concreto se concentra en estado fresco, más específicamente sobre la fluidez del concreto en el tiempo. Un concreto inmediatamente después de ser mezclado cuenta con una manejabilidad dada (v.g. asentamiento de 18 cm), a partir de ese instante se inicia una pérdida progresiva del asentamiento que depende principalmente de:

- La disolución y precipitación del yeso.
- La evaporación de agua.
- El inicio de hidratación del C_3A .
- Incompatibilidad entre los aditivos y el cemento.

La pérdida de manejabilidad no debe ser confundida con el fraguado del concreto, es una propiedad aparte y hoy en día ha cobrado gran importancia debido a que los tiempos de transporte por parte de los camiones mezcladores, se prolongan cada vez más, a causa de la extensión y tráfico de nuestras ciudades.

Un concreto puede no haber fraguado y tener un asentamiento de cero cm, en este caso se asemeja a una “tierra” húmeda. Existen igualmente morteros de reparación que cuentan con prolongadas manejabilidades en el tiempo pero en pocos segundos han fraguado y empiezan su endurecimiento. Los estabilizantes o estabilizadores permiten disminuir o anular la pérdida de manejabilidad del concreto durante horas, sin que esto signifique aumentar considerablemente los tiempos de fraguado.

Los estabilizadores como **SikaTard®-930 CO** y **SikaTard®-935** hacen posible mantener una manejabilidad prácticamente constante para que el material pueda ser transportado, bombeado, manipulado y consolidado en tiempos extendidos e incluso a altas temperaturas.

En obras subterráneas de larga extensión como los túneles de base, las plantas mezcladoras se encuentran fuera de los portales, lo que puede implicar tiempos de transporte mayores a 3 y 4 horas. Estos tiempos de transporte para normas como la ASTM C 94 resultarían inadmisibles. Un caso extremo de concretos a los que se les exige tiempos extremadamente extensos de transporte, lo representan los concretos lanzados que una vez llegados al frente de trabajo, deben ser bombeados y lanzados sobre la superficie de la excavación y deben fraguar en términos de segundos. Es decir pasan de un asentamiento alto y sostenido durante horas, a una manejabilidad de cero y un fraguado instantáneo.

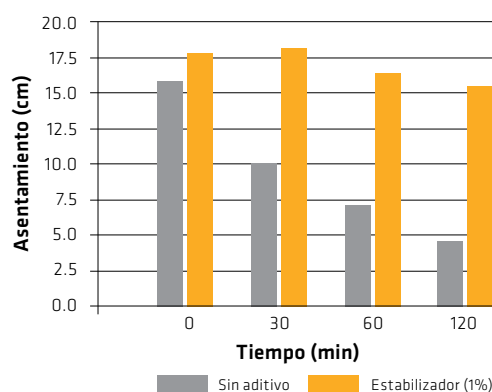


Figura 3. Evolución de la manejabilidad de un concreto con y sin estabilizar.

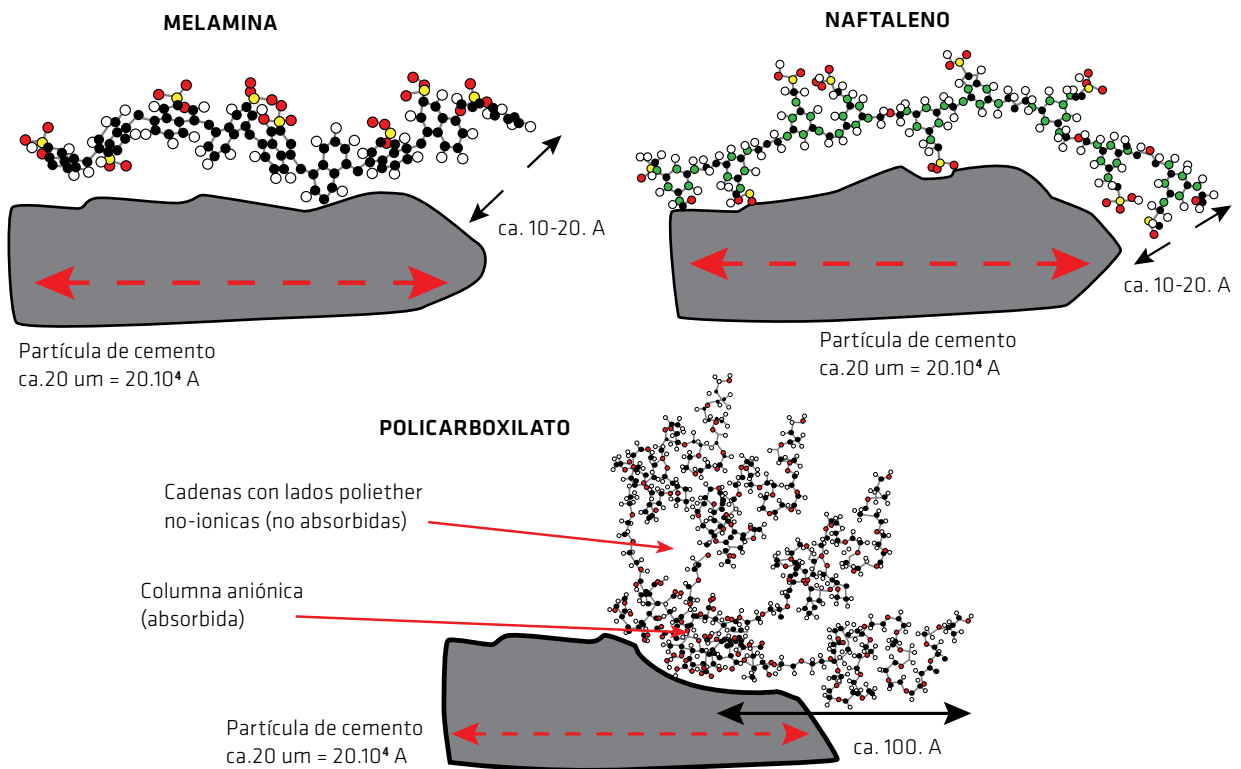
Esta proeza con el concreto en estado fresco sólo es posible con la ayuda de aditivos estabilizadores como el **SikaTard®-930 CO**, un compuesto cuya acción se concentra en sostener la manejabilidad sin tocar los fraguados o hacerlo levemente. Claro a partir de ciertas dosis los estabilizadores pueden empezar a retardar y en sobredosificaciones definitivamente pueden mantener un concreto sin fraguar durante días.

SUPERPLASTIFICANTES

PROBABLEMENTE LA EVOLUCIÓN tecnológica más radical entre los aditivos para concreto ha tenido lugar en los superplastificantes durante las últimas dos décadas. Estos aditivos como su nombre lo describe, cumplen una función similar a los plastificantes, es decir aumentan la manejabilidad de las pastas de cemento y por lo tanto la manejabilidad del concreto. Este incremento en la manejabilidad hace posible disminuir el contenido de agua y de cemento (son ahorradores de pasta) manteniendo la fluidez del material y su resistencia. Los superplastificantes se emplean una vez la capacidad de los plastificantes ha llegado a su máximo. Son especialmente eficientes en concretos con altos asentamientos, o concretos de altas resistencias que implican en ambos casos, contenidos elevados de pasta.

Los superplastificantes en su origen fueron compuestos de Naftaleno sulfonado, melaminas y vinilos. Estas moléculas orgánicas e inorgánicas basan su funcionamiento de dispersión en los siguientes mecanismos:

- Repulsión electrostática inducida entre las partículas.
- Lubricación de la película existente entre las partículas de cemento.
- Dispersión de las partículas de cemento, liberando el agua atrapada entre los flóculos de cemento.
- Inhibición de la hidratación del cemento en superficie, dejando más agua para plastificar la mezcla.
- Cambio en la morfología de los productos de hidratación.
- Inducción de impedancia estérica previniendo el contacto entre partículas



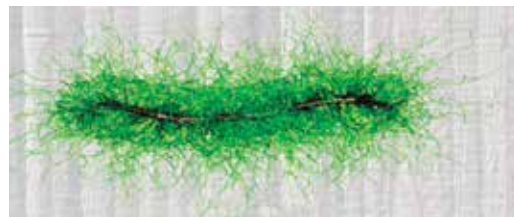
Los policarboxilatos son la más reciente generación de nuevos superplastificantes, su estructura molecular sin duda es mucho mas compleja que la de sus predecesores, pero su eficiencia es muy superior si se considera que su dosificación se divide entre 2 a 3 veces la de los superplastificantes tradicionales. Los mecanismos de dispersión de los policarboxilatos dependen menos de las fuerzas eléctricas, que la generación anterior. Las reducciones máximas de agua antes de llegar a su punto de saturación en algunos casos llegan al 40% del agua de amasado y el sostenimiento de la manejabilidad resulta muy superior que naftalenos o melaminas.

Los modelos moleculares de los policarboxilatos-ether se parecen a una "peinilla" vistos en corte. O tridimensionalmente se asemejan a una oruga o gusano de agujas. Estas moléculas están constituidas por una columna vertebral y unas cadenas laterales. La columna vertebral es la que se absorbe sobre la superficie del cemento en una carrera contra sulfatos y otros iones. Las cadenas laterales no son absorbidas y son las responsables principales de la dispersión de las partículas de cemento. La química de la columna vertebral (número y tipos de grupos aniónicos, longitud de la cadena) así como las cadenas laterales (longitud, tipo, número) pueden variar en una

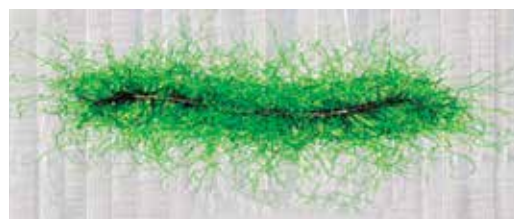


serie de combinaciones enormes que confieren a la sustancia un poder plastificante mayor o menor, o un sostenimiento de la manejabilidad mayor o menor, eso corresponde justamente al trabajo de nuestros químicos en acomodar la geometría de las moléculas de acuerdo a las necesidades de la construcción. El desempeño de un polímero como dispersante del cemento, depende de los parámetros que controlan la absorción, de la cantidad de moléculas absorbidas, del espesor de la capa del polímero y del grado de cobertura de la superficie.

Para contar con un sistema disperso, la cantidad de partículas floculadas debe ser baja. La floculación o la tendencia a aglutinarse de las partículas se debe fundamentalmente a fuerzas de atracción entre partículas que pueden ser de origen eléctrico o de Van der Waals. La magnitud de estas fuerzas se incrementa cuando la distancia entre partículas disminuye. A la ingeniería y a la construcción en general no le interesa trabajar en estado fresco con sistemas que no fluyen y que implican una inversión alta en energía para ser consolidados. De este modo para incrementar la fluidez se puede o reducir el número de contactos entre partículas (por ejemplo incrementando el volumen de agua) o disminuyendo la magnitud de las fuerzas



SikaPlast®



SikaViscocrete®

de atracción entre partículas (usando un superplastificante). Aumentar el agua en el sistema significa disminuir la resistencia del material en estado endurecido por ello es preferible usar superplastificantes.

Los policarboxilatos una vez absorbidos inducen fuerzas de repulsión entre las partículas de cemento ya sea electrostáticas o de origen estérico. Los policarboxilatos se basan principalmente en la estabilización o repulsión estérica del sistema mas que en un principio eléctrico.

La magnitud de la fuerza de repulsión depende de:

1. Cantidad de polímero absorbido,
2. Espesor de la capa del polímero
3. Grado de cubrimiento de la partícula

La longitud de las cadenas laterales de un superplastificante con base en policarboxilatos (como la línea **Viscocrete®** o **SikaPlast®**) es de cerca de 100 Amstrongs de longitud, es decir 10 nanómetros. Recordemos que el diámetro de una partícula de cemento promedio está en 10 micras, es decir 10,000 nanos. Así la relación entre la longitud de uno de estos “cilios” y el diámetro de una partícula de cemento es de 1/1000. Si el diámetro de la tierra se aproxima a 12.700 km, la cadena lateral de un policarboxilato sería una especie de cometa que se elevara 12.7 km (a la altura que vuelan los aviones!). Usar así un policarboxilato es como poblar la tierra de cientos de miles de cometas que rodearán el orbe y lo protegerán de colisiones no deseadas con otros cuerpos.

El desempeño de un **Viscocrete®** y/o un **SikaPlast®** dependen de la estructura misma del aditivo como del cemento (verdadera interacción Aditivo/Cemento).

Así para cementos con alto C_3A , los policarboxilatos en general plastifican mas, pero sostienen menos la manejabilidad (Pre-fabricados).

Con cementos de bajo C_3A , los policarboxilatos plastifican menos pero sostienen mejor la manejabilidad (Premezclado).

La figura 4, expone la capacidad de reducción de agua de diferentes tecnologías desde los **Plastiment®**, hasta los **Viscocrete®**. Como puede verse, los **Viscocrete®** requieren dosis muy bajas para lograr dispersiones altamente eficientes.

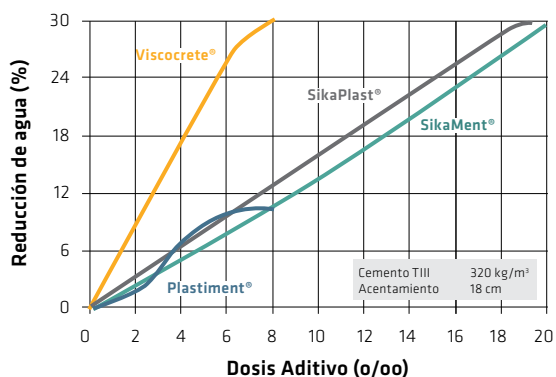
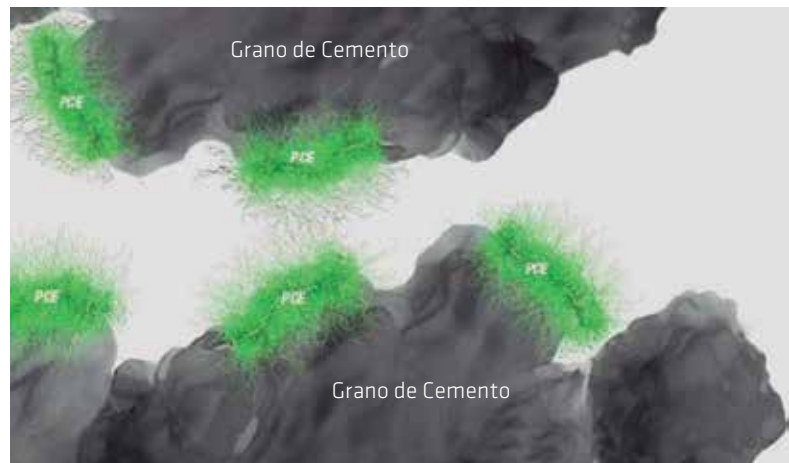
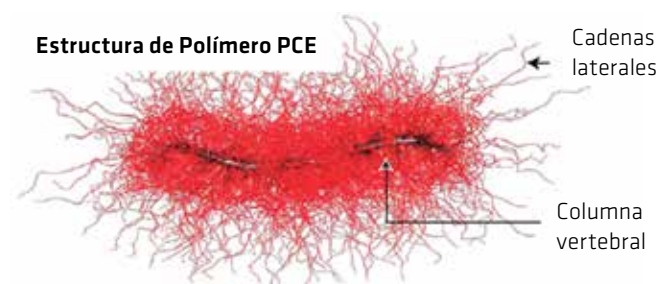


Figura 4. Capacidad de reducción de agua para diferentes aditivos



DENTRO DE LA LINEA VISCOCRETE® ENCONTRAMOS:

- **Reductores de agua de ultra alto poder con bajo sostenimiento de la manejabilidad en el tiempo:** estos compuestos han sido diseñados para lograr la máxima dispersión posible pero cuyo efecto es de corta duración. Son ideales para aplicaciones como elementos prefabricados (dovelas, vigas, pilotes etc). Incluso algunos de estos compuestos llevan incluidos también acelerantes que permiten alcanzar hidrataciones rápidas y resistencias mecánicas muy elevadas.
- **Reductores de agua de ultra alto poder con un alto sostenimiento de la manejabilidad:** son compuestos que si bien logran reducciones de agua superiores al 25% se concentran en sostener la manejabilidad por tiempos muy prolongados. Sin que esto signifique una vez más una afectación radical sobre los tiempos de fraguado. Estos aditivos resultan ideales para concreto premezclado que necesita largos tiempos de transporte. En su desempeño se asemejan a los estabilizadores pero con un poder reductor de agua que nunca será alcanzado por un estabilizador. En ese sentido este tipo de aditivos son polifuncionales.



ACELERANTES

LA VELOCIDAD DE LAS REACCIONES entre el clinker con el agua, es denominada con frecuencia como la tasa de hidratación de un cemento y puede ser modificada adicionando pequeñas cantidades de sustancias químicas en la mezcla. Estas sustancias alteran la tasa de hidratación incrementando el número de hidratos que nacen para una edad determinada dando un efecto general de aceleramiento del proceso. Estas sustancias se conocen como acelerantes. De esta forma un acelerante es adicionado al concreto, mortero o pasta de cemento con los siguientes propósitos:

1. Disminuir los tiempos de fraguado.
2. y/o incrementar las resistencias tempranas.

En el primer caso la acción de los acelerantes se concentra en estado fresco mientras que en el segundo caso en estado endurecido. Existen acelerantes especializados para cada caso aunque algunos son capaces de tener un efecto tanto sobre el fraguado como sobre el desarrollo de las resistencias.

Casi todos los acelerantes convencionales para concreto (excluyendo en este capítulo a los acelerantes instantáneos para concreto lanzado) vienen en forma líquida, debido a que su dosificación y manipulación es más sencilla.

PRINCIPALES BENEFICIOS DE LOS ACELERANTES

Dentro de los propósitos más frecuentes del uso de acelerantes así como las ventajas más relevantes que estos permiten obtener, se encuentran:

EN LOS QUE AFECTAN EL FRAGUADO

- Acabado más rápido de superficies.
- Reducción de la presión del material en estado fresco sobre las formaletas.
- Liberación rápida de formaletas para desencofrado de elementos no estructurales.

EN LOS QUE AFECTAN EL ENDURECIMIENTO

- Remoción de formaletas con cargas estructurales.
- Puesta en servicio de estructuras nuevas o reparaciones.
- Compensación de los efectos de bajas temperaturas o cementos con lento desarrollo de resistencias.

CLASIFICACIÓN DE LOS ACELERANTES

Los acelerantes tienen múltiples clasificaciones, así la norma norteamericana ASTM C 494 "Especificación normalizada de aditivos químicos para concreto" y la europea EN 493-2 "Aditivos para concreto, mortero y lechadas- Parte 2: Aditivos para Concreto - Definiciones, requerimientos, conformidad, fabricación y marcado" hacen énfasis en diferentes puntos.



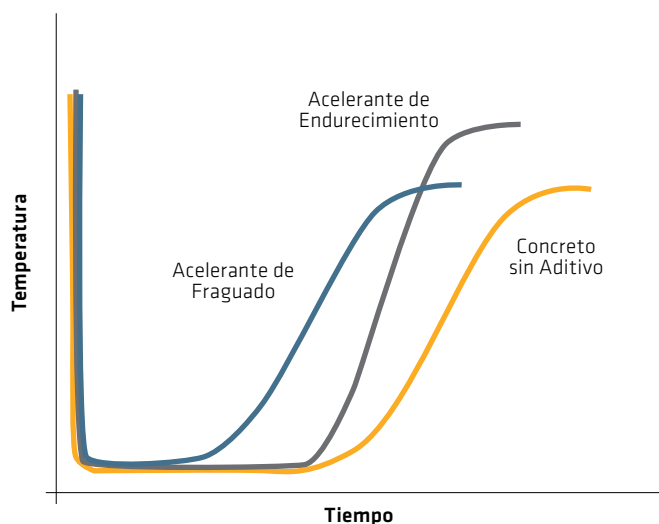


Figura 5. Generación de calor - hidratación para concretos acelerados y no acelerados

LA NORMA EN 493-2 CLASIFICA LOS ACELERANTES COMO:

Aditivo acelerante de fraguado

Aditivo que disminuye el tiempo de transición de la mezcla de estado plástico a estado rígido.

Aditivo acelerante de endurecimiento

Aditivo que incrementa la tasa de desarrollo de resistencia a temprana edad en el concreto afectando o no el tiempo de fraguado.

El fraguado y el endurecimiento pueden ser determinados de manera indirecta con la generación de calor. Debido a que la hidratación es un proceso exotérmico (que genera calor) la cantidad de calor está así relacionada con la cantidad de hidratos nacidos. La figura 5, muestra así el efecto en un acelerante de fraguado y otro de endurecimiento. Debe señalarse igualmente que un acelerante de endurecimiento por ejemplo, a partir de ciertas dosis podría empezar a afectar (acelerar) los tiempos de fraguado, por lo tanto la dosis también juega un papel fundamental en el efecto final de un aditivo.

LA NORMA ASTM C 494 CLASIFICA LOS ACELERANTES ASÍ:

- Tipo C Acelerante para concreto
- Tipo E Reductor de agua y acelerante para concreto

Los requerimientos para que un aditivo pueda ser llamado Tipo C o Tipo E, de acuerdo a la ASTM C 494, se incluyen en la Tabla 2.

	Tipo C	Tipo E
Contenido de agua, % con respecto al testigo	-----	95 %
Tiempos de fraguado, diferencia permisible con respecto al testigo h:min		
Fraguado Inicial		
Mínimo	-1:00	-1:00
No mas de	-3:30	-3:30
Fraguado Final		
Mínimo	-1:00	-1:00
No mas de	-----	-----
Resistencia a la compresión (% mínimo con respecto testigo)		
1 día	-----	-----
3 días	125	125
7 días	100	110
28 días	100	110
6 meses	90	100
1 año	90	100
Resistencia a la flexión (% mínimo con respecto testigo)		
3 días	110	110
7 días	100	100
28 días	90	100
Requerimientos alternativos		
Cambio longitudinal máximo		
Porcentaje del testigo (%)	135	135
Incremento sobre el testigo	0.01	0.01
Factor relativo de durabilidad (%)	80	80

Tabla 2. Requerimientos para acelerantes ASTM C 494

Los requerimientos anteriores nos muestran que de un acelerante Tipo C o Tipo E, se espera un efecto tanto sobre los fraguados como sobre las resistencias.

Existen otras interpretaciones sobre los tipos de acelerantes y el desarrollo tecnológico siempre va por delante de las legislaciones.



TIPOS DE ACCELERANTES DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

Las bases químicas de los acelerantes son muy variadas, se trata en general de sales orgánicas o inorgánicas y entre los principales compuestos se encuentran:

- Hidróxidos.
- Cloruros, Bromuros, Fluoruros.
- Nitritos y nitratos.
- Carbonatos.
- Tiocianatos.
- Sulfatos.
- Tiosulfatos.
- Percloratos.
- Silicatos.
- Aluminatos.
- Ácidos carboxílicos.
- Alcanolaminas.

Los aditivos acelerantes se pueden igualmente dividir en dos grandes grupos, el primero corresponde a aquellas sustancias en las que está incluido un ion cloro y el segundo grupo que no incluye este compuesto.

El ion cloro o cloruro como se le conoce en la construcción, cobra importancia en la medida que los acelerantes más eficientes son justamente los que lo contienen. Sin embargo los concretos con cloruros en su interior a partir de cierto límite son proclives a generar corrosión en la armadura de refuerzo. Por ello el comité del ACI 318 impuso ciertos límites para controlar la cantidad de cloruro en los componentes iniciales del concreto.

6) MR.Rixon and N.P Mailvaganam "Chemical Admixtures for Concrete" E & F.N. Spon 1986

7) Skalny, Jan, and Maycock, J.N. "Mechanisms of acceleration of calcium chloride: A Review" Journal of Testing and Evaluation, V.3, No.4 July 1975, pp 303-311

8) Abrams, Duff A, "Calcium Chloride as an Admixture in Concrete" Proceedings, American Society for Testing and Materials, V.24, Part II, 1924, pp. 781-814.

9) V.S. Ramachandran "Concrete Admixtures Handbook- Properties, Science and Technology" Noyes Publications (1984)

TIPO DE CONSTRUCCIÓN Y CONDICIÓN	Límite de ión cloruro, % de la masa del cemento		
	MÉTODO DE ENSAYO		
	Soluble en ácido	Soluble en agua	
	ASTM C1152	ASTM C1218	Soxhlet*
Concreto preesforzado	0.08%	0.06%	0.06%
Concreto reforzado expuesto a la humedad en servicio	0.10%	0.08%	0.08%
Concreto reforzado seco en servicio	0.20%	0.15%	0.15%

Tabla 3. Contenido máximo de iones cloruro para construcciones nuevas. ACI 222

Sika cuenta con aditivos que contienen ion cloruro y también aditivos sin cloruros. Los aditivos que contienen ión cloruro son **Sikaset®L**, **Plastocrete®-169 HE**, **Plastiment®AP** y los aditivos sin cloruros son **Sikaset®NC** y **SikaRapid®-1** y **SikaRapid®C100**.

RESULTA CRUCIAL SEÑALAR QUE EL DESEMPEÑO DE UN ACELERANTE PUEDE CAMBIAR RADICALMENTE DE UN CEMENTO A OTRO. EN REALIDAD EL ACELERAR UNA LECHADA, UN MORTERO O UN CONCRETO DEPENDE DEL FUNCIONAMIENTO, NO DEL ACELERANTE SINO DEL MATRIMONIO ACELERANTE-CEMENTO. EXISTEN ACELERANTES MUY EFICIENTES CON UN CEMENTO DADO, CUYO EFECTO SE MINIMIZA O INCLUSO SE PIERDE CON OTRO TIPO DE CEMENTO.

La eficiencia de un sistema acelerante/cemento, va mucho más allá de si el concreto tiene mayor o menor contenido de aditivo.

Igualmente es importante anotar que el ritmo de la hidratación depende en su mayor parte del tipo de cemento usado. Cementos altamente adicionados tendrán un nivel de resistencias bajo y una baja capacidad de aceleración, incluso con el mejor acelerante o la mejor compatibilidad acelerante/cemento. Los cementos de granel, los Tipo III (ASTM C 150) son los que mejor compatibilidad o eficiencia alcanzan con un acelerante.

Veamos ahora los principales tipos de acelerante con respecto a su composición.

ACELERANTES CON CLORURO

La aparición de sustancias con base en cloruros destinadas a acelerar la hidratación en concreto, se remonta a la época en que el mundo se empezó a iluminar con luz eléctrica, es decir a los albores de 1885⁶⁾ aunque hay algunas menciones de soluciones de cloruro usadas en 1873⁷⁾ en Alemania. Los compuestos con base en cloruro de calcio son los más antiguos reportados y en la actualidad continúan empleándose debido a su muy alta eficiencia.

El mismo Duff Abrams describe el efecto de cloruro de calcio sobre las propiedades del concreto en una publicación de 1924⁸⁾. En realidad en la actualidad los acelerantes con base en cloruros son los más ampliamente usados tanto para la fase de fraguado del material como para la de endurecimiento. Dentro de las sustancias que se usan para acelerar el concreto con base en cloruro además de cloruro de calcio se emplean el cloruro de sodio y el cloruro de aluminio.

La acción del cloruro en la cinética de la reacción aun no es totalmente comprendida, de hecho existe una fracción de la literatura que señala el C_3S como el principal anhidro sobre el cual actúa un cloruro como el de calcio⁹⁾, mientras que otra parte de la comunidad de investigadores, identifica el C_3A como el anhidro sobre el que se concentra la acción del cloruro.

Un ejemplo de la eficiencia de un acelerante con cloruro como el **Plastocrete®-169 HE** aparece en la figura 6, donde, con un cemento específico, a las 30 horas una resistencia de 70 kg/cm² se convierte en 150 kg/cm² con un 3% de aditivo con respecto a el peso del cemento.

Este gráfico igualmente nos muestra para este aditivo y cemento específicos, que el nivel de resistencia del concreto sin acelerar (dosis 0%) que alcanza a las 40 horas (100 kg/cm²) se logra a las 20 horas con una dosis del 3% de acelerante. Como

vemos en este caso bajo estas condiciones, el acelerante pudo reducir el tiempo a la mitad para alcanzar la misma resistencia.

La figura 7, “Resistencia a la compresión vs Dosis de aditivo” ilustra la eficiencia del acelerante (en este caso **Plastiment® AP**) con respecto a un concreto sin acelerante. Así podemos ver que a medida que el concreto es más joven la eficiencia del aditivo es aun más alta.

Los acelerantes con cloruros en algunas normas de ciertos países están proscritos, sin embargo el ACI no los elimina sino que regula su uso al tipo de estructura (concreto simple, concreto preesforzado o concreto reforzado) y establece su dosificación máxima. Son estos, sin duda, los acelerantes mas eficientes que deben ser utilizados con responsabilidad. En estructuras marinas o en concreto preesforzado no deben emplearse. Por supuesto si se trata de concreto no reforzado (por ejemplo el concreto de recubrimiento simple de túneles) su uso es ideal y pueden ser usados incluso mas allá de los límites establecidos.

ACELERANTES SIN CLORURO

Estos acelerantes ligeramente menos eficientes que los acelerantes con cloruro estan basados en nitratos, nitritos o ticianatos. Sika cuenta con los productos **SikaRapid®-1** y **Sikaset®NC**. El **SikaRapid®-1** es mas un acelerante de resistencias mientras que el **Sikaset®NC** es una acelerante mas enfocado a fraguados aunque también tiene un efecto sobre las resistencias tempranas.

Los nitratos (NO_3^-) son acelerantes que no promueven la corrosión del acero, al contrario son usados como inhibidores en Japón y EEUU. Así mismo los nitritos (NO_2^-) son igualmente usados como inhibidores y acelerantes. Se trata así de aditivos multifuncionales.

Estos son los acelerantes más populares en EEUU para grandes obras, aunque como se mencionó antes, tienen su efecto más notable sobre los tiempos de fraguado, aunque de acuerdo a la dosis y al sistema acelerante/cemento resultante, también logran incrementos importantes en las resistencias tempranas.

El mecanismo de aceleración del fraguado funciona sobre dos frentes:

- Incrementando la concentración de calcio que permite una mas rápida super-saturación del agua con respecto al hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- Decreciendo la concentración de sulfato (yeso) lo que permite una formación más lenta de la etringita que acorta el inicio de la hidratación del C_3A .

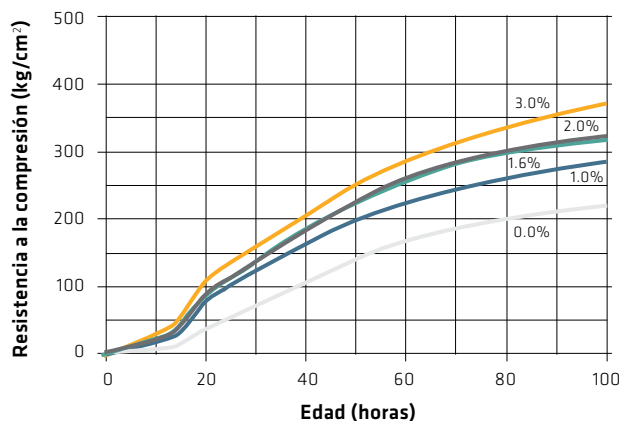


Figura 6. Eficiencia del **Plastocrete®-169 HE** con un cemento granel.



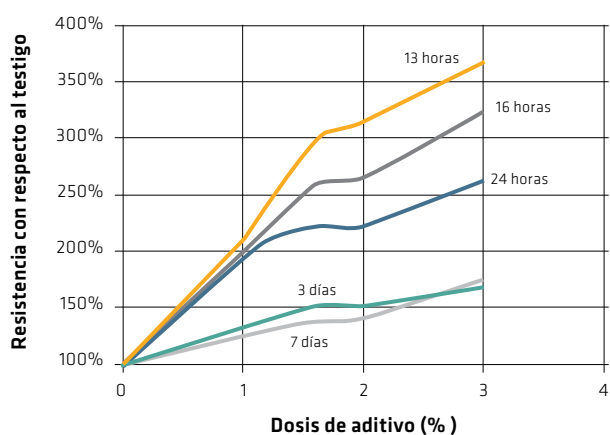


Figura 7. Eficiencia del Plastiment®AP con cemento granel.

Los ácidos de tiocianato de calcio o sodio (u otro álcali) son los acelerantes más recientes que no incluyen cloruros y que hasta ciertas dosis no promueven la corrosión del acero. Son sustancias que también podrían aportar cierta cantidad de álcalis al concreto por lo que deben ser usadas hasta las dosis máximas recomendadas por los fabricantes. Los tiocianatos en general tienen un efecto marginal sobre los tiempos de fraguado pero un impacto evidente sobre el perfil de endurecimiento, son usados ampliamente en la construcción en la actualidad.

Los acelerantes sin cloruro sin duda son los compuestos más avanzados disponibles hoy en el mercado, que como en el caso de los nitritos y nitratos tienen un efecto protector-inhibidor con el acero de refuerzo.



INCORPORADORES DE AIRE

DESDE LA DÉCADA DE 1930 se descubrió que la incorporación de una verdadera constelación de esferas o burbujas de aire en el interior del concreto aumentaba de manera espectacular la durabilidad del concreto frente al ataque de hielo-deshielo. Este fenómeno es particularmente visible en estructuras con una relación superficie/volumen alta, es decir pisos y pavimentos.

Cuando la temperatura externa baja de 0°C el agua al interior del concreto comienza a congelarse y recordemos que el agua al convertirse en hielo aumenta en un 9% su volumen. Este incremento en el volumen genera esfuerzos al interior de la red porosa microfisurando el material. Un concreto expuesto a cientos de ciclos de hielo y deshielo termina desintegrándose.

La presencia de una red de esferas de aire cuyo diámetro varía entre 70 a 140 micras tiene un doble efecto. Uno en estado fresco y otro sobre estado endurecido. En estado fresco disminuye radicalmente la exudación del concreto evitando la formación de capilares que alcanzan la superficie y otro en estado endurecido donde las esferas que actúan como lugares donde el agua en exceso, empujada por el hielo o el mismo hielo, disipa los esfuerzos provocados por el cambio volumétrico cuando cambia de estado a sólido.

Para garantizar su correcto funcionamiento, los norteamericanos definieron así una distancia mínima entre burbujas de aire, densidad volumétrica mínima, que denominan como factor de espaciamiento que debe estar cercana a 250 micras.

Sin embargo el uso de incorporadores de aire no se limita a evitar el daño del concreto por ciclos de hielo-deshielo. La ausencia de capilares hace que el agua no pueda penetrar en el concreto en estado endurecido, por lo que una incorporación de aire tanto en concreto como en mortero, tiene un efecto impermeabilizante en el material.

En las zonas cálidas el aire incorporado se usa entre otros para:

- Impermeabilizar concretos.
- Mejorar arenas gruesas carentes de finos.
- Plastificar concretos.
- Ayudantes evidentes en concretos Tremie para mejorar el rendimiento durante la caída y disminuir la exudación.
- Ayudantes de molienda.

Los aditivos incorporadores de aire disminuyen la tensión superficial del agua. Esto facilita entonces la formación de esferas de aire disminuyendo la energía necesaria para crear superficies de contacto aire-agua. El papel principal de los incorporadores de agua es el de estabilizar las esferas de aire atrapadas en las turbulencias generadas por las palas de la mezcladora y por las partículas finas como gruesas.



La acción de los incorporadores de aire puede sintetizarse como:

- Disminución de la tensión superficial del agua (surfactante).
 - Formación de una película insoluble (y hidrofóbica) alrededor de las esferas de aire.
 - Estabilización por adsorción sobre las partículas de cemento.
- Un buen incorporador de aire debe evitar la coalescencia de las esferas de aire debido a que las esferas de mayor tamaño pueden ser fácilmente expulsadas hacia la superficie (menos estables), por otro lado la red de esferas de aire es la que permite una mejor protección si está constituida por pequeñas esferas de aire (entre más pequeña, mejor).



La estabilidad de la red de aire es la característica más importante que debe cumplir un incorporador de aire. En realidad un incorporador de aire debería ser visto más como un estabilizador de las esferas de aire creadas al momento de la mezcla del concreto.

El diseño, empleo y puesta en obra de un concreto con aire incorporado, es un proceso que requiere especial cuidado y que necesita generalmente un trabajo previo desde el laboratorio hasta la obra misma. La labor se debe concentrar en seleccionar y ajustar la dosis del incorporador de aire en función de otros parámetros de la formulación y de las condiciones de puesta en obra.

El objetivo es construir una red de esferas de aire que cumpla con las siguientes condiciones principalmente:

- El volumen de aire y el factor de espaciamiento deben satisfacer las exigencias mínimas asociadas al grado de exposición al congelamiento.
- Las características de las esferas de aire deben ser estables en el tiempo.

Las características de las esferas de aire son función de prácticamente todos los componentes del concreto (cemento, adiciones, plastificantes-superplastificantes, granulometría etc). Igualmente dependen de las condiciones de puesta en obra (Temperatura, vibración, fricción de la superficie, cantidad de energía en el mezclado). Por supuesto la geometría de las esferas y su cantidad también dependen del tipo de incorporador de aire empleado. Hoy en día se utilizan (resinas, sales sulfonadas, aceites grasos, detergentes sintéticos etc).

El aire incorporado normal varía entre el 3% al 7% del volumen total del concreto y puede perderse paulatinamente durante los procesos de transporte, bombeo o lanzado.

La incorporación de aire también produce a partir de ciertos volúmenes una afectación sobre la resistencia mecánica que debe considerarse durante el proceso de diseño.



REDUCTORES DE RETRACCIÓN

LOS ADITIVOS REDUCTORES DE RETRACCIÓN

del concreto fueron desarrollados en Japón a finales de la década de los noventa. Estas sustancias están diseñadas para actuar sobre el material disminuyendo la tendencia del concreto a retraerse durante su hidratación. Estas sustancias tienen una acción doble tanto sobre las características físicas del líquido intersticial al interior del concreto (disminuyendo entre otros su tensión superficial) como sobre la tendencia general del sistema a disminuir su volumen original.

Sika®Control-40 es justamente una sustancia diseñada para disminuir la retracción del concreto tanto en estado fresco como endurecido. Aunque su efecto más importante tiene lugar cuando el material ya está endurecido.

La retracción por secado del concreto que puede variar en estado endurecido entre 0.2 mm/m a 1.5 mm/m es una de las causas principales relacionadas con la fisuración del material. Cuando se quiere prevenir la generación interna de esfuerzos que terminan traducándose en fisuraciones indeseadas se emplean controladores de retracción. Los aditivos reductores o controladores de retracción son especialmente útiles para concretos ricos en cemento y pasta de cemento en general.

Las ventajas más relevantes del uso de aditivos reductores de retracción son:

- Disminución del agrietamiento.
- Disminución de las pérdidas por retracción en elementos preforzados.
- Disminución de flechas.
- No afectación de la adherencia de concretos con diferentes edades.
- Aumento en el desempeño de materiales de reparación o parcheo.

Los concretos en que más comúnmente se emplean estas sustancias son: autocompactantes, concretos de alto desempeño, concretos o morteros de reparación, en elementos con relaciones superficie/volumen altas, en concretos de segunda etapa de reforzamiento y en estructuras de concreto a la vista o donde no son admisibles las fisuraciones.

Su efecto perdura por años como lo muestran las medidas de la siguiente figura.

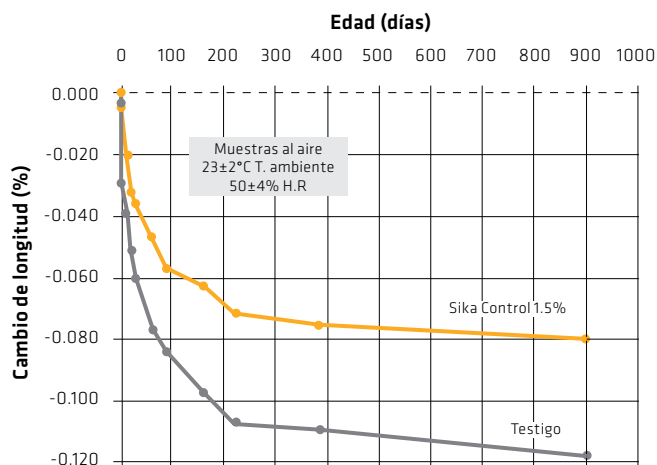


Figura 8. Retracción a largo plazo de un concreto con y sin controlador.



INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los inhibidores de corrosión en realidad están mal denominados en el mercado, estas sustancias en realidad son retardantes de la corrosión. Todos los inhibidores disponibles en la actualidad retardan la iniciación de la corrosión en tasas que permiten duplicar o triplicar la vida útil de una estructura de concreto reforzado.

La corrosión del acero en las estructuras de concreto reforzado corresponde a la principal causa de deterioro de estas estructuras, especialmente las expuestas a ambientes contaminados con CO_2 a la acción del agua o sales minerales. Debido a la necesidad de proteger las inversiones hechas en infraestructura y a disminuir los elevados costos de reparaciones y de mantenimiento, las normas establecieron algunos parámetros relacionados con las propiedades del concreto para atenuar el efecto de la corrosión. Los inhibidores de corrosión corresponden a un nivel aún más elevado de protección que ha demostrado su eficiencia en múltiples ensayos acelerados de laboratorio o en tiempo real en campo.

Un inhibidor de corrosión puede aumentar el nivel de cloruros necesario para iniciar la corrosión (en el caso de corrosión por cloruros), o disminuir la tasa de corrosión una vez ésta se ha iniciado (o ambas). Así un inhibidor puede retardar la iniciación de la corrosión o disminuir la propagación de la misma. Un esquema de la corrosión del acero de refuerzo aparece en la siguiente figura:

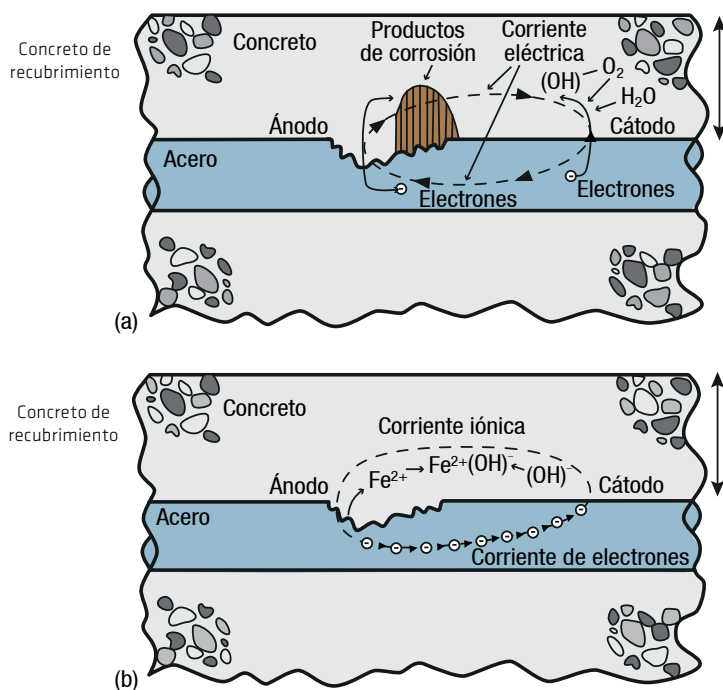
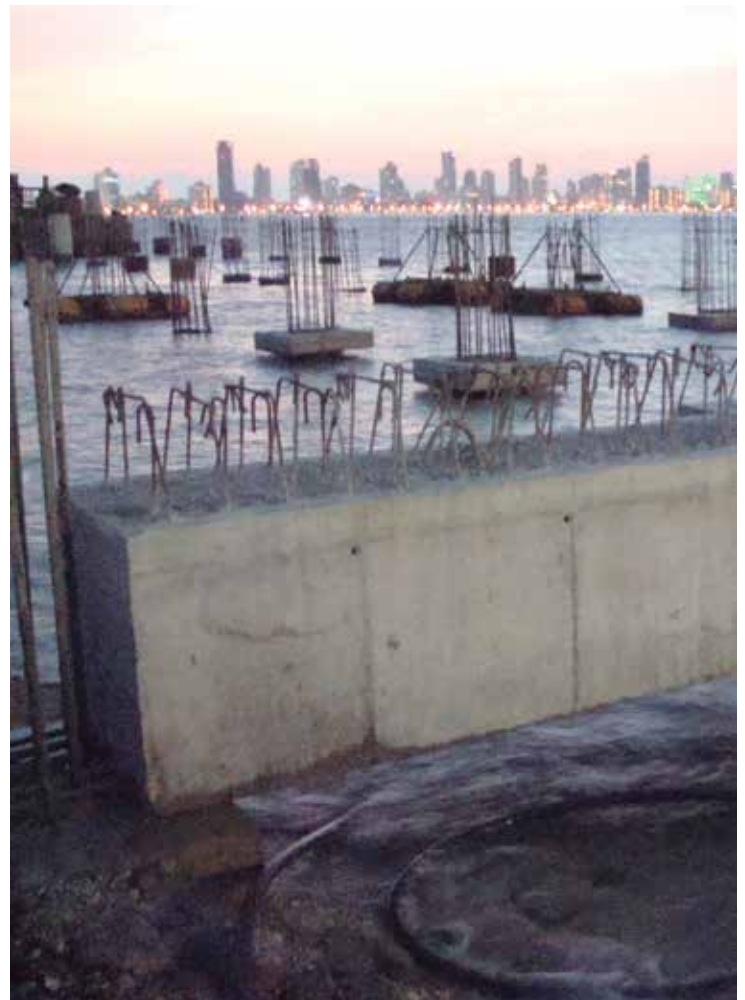
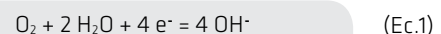


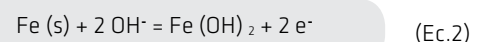
Figura 9. Esquema del proceso de corrosión en la superficie del acero (a) Reacciones en lugares anódicos como catódicos y la circuito de corriente eléctrica. (b) Flujo de la carga eléctrica en el circuito de corriente durante el proceso de corrosión.



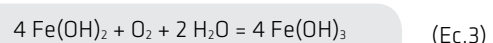
El proceso de corrosión consiste en una media reacción catódica de reducción del oxígeno a iones hidroxilos:



y una media reacción anódica de oxidación del metal de hierro a hidróxido ferroso:



El hidróxido ferroso es escasamente soluble en un medio alcalino con iones complejos de hidroxilos pero lo es más con cloruros. De este modo este puede moverse por difusión a cierta distancia del acero de refuerzo antes de que se oxide más por el oxígeno y se precipite como un hidróxido férrico.



El hidróxido férrico en diferentes formas puede tener un volumen molar entre 2 a 4 veces el volumen original del metal corroído. El proceso de corrosión de esta forma genera esfuerzos internos en el material, que terminan fisurando el concreto de recubrimiento y dando lugar eventualmente a un descascaramiento de la superficie que expone aún más al acero, haciendo que el ataque se acelere.

Los inhibidores de corrosión puede afectar la media reacción catódica (Ec.1) o la anódica (Ec.2) y de esta forma son llamados inhibidores catódicos o anódicos respectivamente.

INHIBIDORES DE CORROSIÓN CATÓDICOS

Estos inhibidores están basados en aminoalcoholes y se encontró que desplazan los iones de cloruro de las superficies de óxido de hierro debido a que se absorben en una delgada monocapa en las soluciones cargadas de álcalis.

Los aminoalcoholes interrumpen la reacción catódica y en muchas ocasiones vienen acompañados de compuestos impermeabilizantes que tienen un efecto pasivo sobre la penetración de cloruros puesto que impiden su entrada. Es decir, existe un efecto doble en este tipo de sustancias.

Estos inhibidores pueden ser incluidos a la mezcla de concreto directamente para estructuras nuevas, o pueden aplicarse sobre la superficie de estructuras ya construidas de modo que por impregnación alcancen el nivel del acero de refuerzo. Estos inhibidores que penetran por impregnación son absorbidos finalmente sobre la superficie del acero desarrollando un efecto activo de protección.

Este tipo de aditivos corresponden a la línea **Sika Ferro-gard®-901 y 903**. **Sika Ferro-gard®-901** es un inhibidor de corrosión que se incluye en la mezcla de concreto fresco mientras que **Sika Ferro-gard®-903** se aplica por impregnación sobre la superficie del concreto de estructuras ya construidas.



INHIBIDORES DE CORROSIÓN ANÓDICOS

Entre los principales inhibidores anódicos estas los nitritos inorgánicos (NO_2^-) cuya eficiencia es bien conocida (**Sika®CNI**). El nitrito de calcio siempre es preferible al nitrito de sodio debido justamente al riesgo de incluir aún más álcalis al concreto. El nitrito de calcio ha sido usado por más de 30 años como un inhibidor de la corrosión en concreto reforzado. Fue propuesto por primera vez en Japón¹⁰⁾ en la década de 1970 y ha sido extensamente estudiado hasta la actualidad.

Por otro lado los nitratos (NO_3^-) tienen un efecto similar de inhibición o retardo de corrosión sin embargo su efecto no es apreciable cuando se efectúan ensayos acelerados de corrosión. Ensayos en tiempo real han demostrado la eficiencia de los nitratos que hoy en día usamos como acelerantes sin cloruros exclusivamente, subestimando así su capacidad de proteger el acero de refuerzo.

10) Soeda, K. and Ichimura, T., 2003, "Present State of Corrosion Inhibitors in Japan", Cement and Concrete Composites, Vol. 25, No. 1, pp. 117-122.

INHIBIDORES DE CORROSIÓN

La penetración de fluidos como de gases dentro del concreto determina en buena parte la durabilidad del material. En el caso particular de los líquidos estos pueden penetrar la red porosa del concreto usando principios físicos muy distintos como la permeabilidad, la difusión (adsorción) y la absorción capilar. La permeabilidad se refiere al movimiento de un líquido en presencia de un gradiente de presión como es el que tiene lugar en las estructuras de contención de agua.

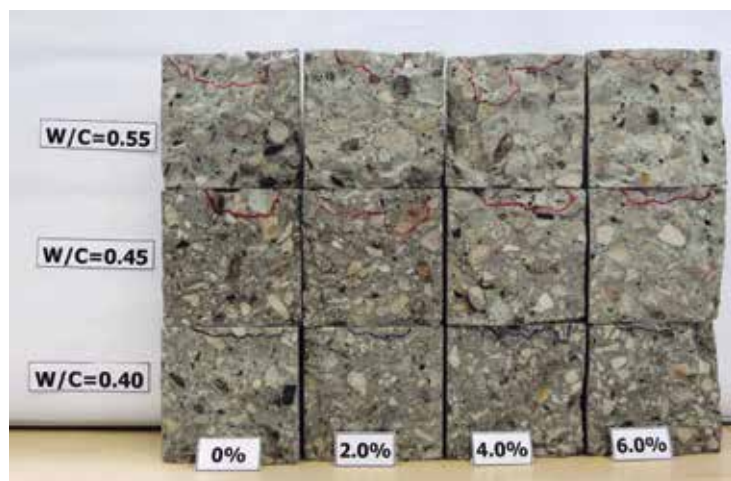
La absorción capilar corresponde al desplazamiento casi siempre ascendente de un frente líquido a través de un capilar, como consecuencia de la tensión superficial del líquido, sobre las paredes del capilar.

La difusión corresponde por otro lado al desplazamiento de un elemento, compuesto, ión etc, a través de un medio líquido o gaseoso, debido a una agitación aleatoria a nivel molecular en un volumen donde existe una diferencia de concentración.

La permeabilidad como la absorción capilar dependen sobre todo del tamaño de los poros mientras que la difusión depende principalmente de la interconexión de la red porosa¹¹⁾.

Los aditivos impermeabilizantes actúan frente a la penetración de agua bajo presión (disminuyendo el coeficiente de permeabilidad de Darcy) o impidiendo el transporte de líquidos al interior del material por capilaridad o difusión.

Efecto de la relación Agua/cemento y la dosis del impermeabilizante **Sika®WT-100** sobre la penetración de agua de acuerdo al ensayo EN 12390-8



Medición de la profundidad de penetración del agua luego del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad (Darcy) de acuerdo a la norma NTC 4483



De acuerdo a las normas europeas se denomina un concreto de baja permeabilidad aquel que bajo el ensayo de presión de agua (EN 12390-8), en la que se somete una probeta a una presión de 50 m de agua durante 72 horas, la penetración máxima del frente de humedad es menor a 30 mm. Igualmente un concreto de baja permeabilidad debe cumplir con una capacidad de absorción capilar inferior a 6 g/m² h (SIA 262-Anexo 1).

La norma colombiana NTC 4483 clasifica los concretos de acuerdo a su permeabilidad empleando el coeficiente de Darcy así:

Tipo de concreto	Coefficiente Darcy m/s
Concreto de baja permeabilidad	$< 10^{-12}$
Concreto de mediana permeabilidad	10^{-10} a 10^{-12}
Concreto de alta permeabilidad	$> 10^{-10}$

Los aditivos **Sika®-1** o **Sika®WT-100** pueden ser usados ambos en concreto como en mortero y su efecto es triple para impedir la penetración de líquidos:

- Formación de compuestos de calcio que bloquean la red porosa.
- Incorporación de aire que interrumpe la formación de capilares.
- Formación de oleatos que obstruyen la red porosa.

Los poros importantes para la permeabilidad son aquellos poros capilares con un diámetro de al menos 120 nm y deben ser continuos. Aunque otros autores señalan que la porosidad capilar mínima empieza con poros con un diámetro mayor a 50 nm. Sobre esta geometría de poros es que ambas tecnologías de aditivos actúan eliminando la posibilidad de penetración de un líquido.

11) BUIL M., OLLIVIER J.P. (1992) "Conception des bétons: la structure poreuse" La durabilité des bétons. Press d'école nationale des ponts et chaussées. Collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Sous la direction de Jacques Baron et Jean-Pierre Ollivier. pp.57-99

ACTIVADORES

HOY EN DÍA ES EVIDENTE la necesidad de contar con materiales mas sostenibles y es imposible negarlo, la fabricación del cemento es responsable de cerca del 7% del CO_2 presente hoy en el mundo. Cuando se quema una roca caliza (CaCO_3) el 40% de su peso se pierde y esa pérdida de peso corresponde justamente a que se ha ido a la atmósfera un compuesto que había presente en esa roca, CO_2 . Quemar caliza no sólo produce CO_2 por la combustión sino que la roca misma que se calcina produce CO_2 . Una tonelada de Clinker genera una tonelada de CO_2 por estos dos procesos combinados.

Por otro lado existen en la industria minerales generados en la producción de acero, de energía eléctrica que tienen características similares a las del cemento Portland. Conocidas como adiciones minerales, estas sustancias cada día le han venido ganando terreno al uso del clinker como ligante principal en la construcción.

Las adiciones minerales naturales (puzolanas naturales) o artificiales (ceniza volante, metacaolín, escoria de alto horno, humo de sílice), pueden sustituir el cemento con múltiples ventajas que trascienden largamente los argumentos económicos

Las adiciones en el concreto permiten:

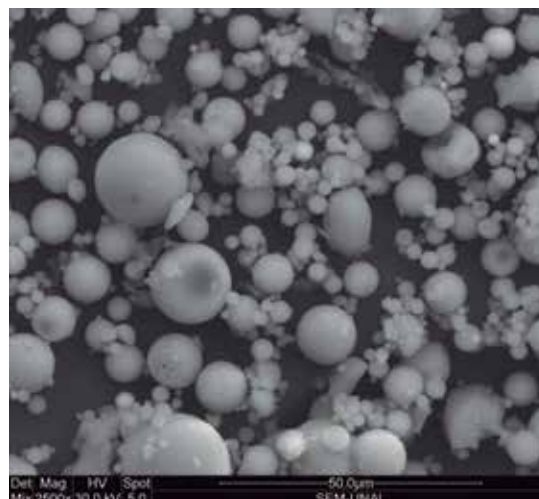
- Disminuir la generación de calor, durante la hidratación.
- Disminuir la retracción del concreto.
- Previene en el concreto la reacción álcali-agregado.
- Permiten proteger el concreto frente a expansiones por sulfatos.
- Permiten reducir la permeabilidad al ión cloruro y por lo tanto en estructuras marinas aumentan la vida útil.
- Aumentar la impermeabilidad del concreto.

Es por ello que un concreto sostenible debe reducir al máximo su contenido de pasta y sustituir en la propia pasta la mayor cantidad de clinker, por ejemplo usando adiciones minerales.

Las adiciones minerales son en su gran mayoría sólidos de óxido de sílice y óxido aluminio mal cristalizados. Esta pobre cristalización hace que las fuerzas de unión entre las moléculas sean débiles, por lo tanto son proclives a reaccionar con otros compuestos.

El calcio es especialmente compatible con estos compuestos de sílice inestable y es éste matrimonio (en agua) el que crea hidratos muy similares a los que genera el clinker cuando reacciona.

La hidratación de las adiciones minerales sin embargo tiene lugar a una velocidad diferente a la del cemento portland, es mucho más lenta.



Ceniza volante Tipo F (ASTM 618)

Esperar a que el concreto con adiciones fragüe o permita ser desencofrado puede ser un ejercicio de paciencia. Este ha sido justamente una de las limitaciones mas relevantes a la hora de incluir adiciones en el concreto. El perfil de hidratación de un concreto, mortero o lechada que incluye una adición es mucho mas lento que si se le compara con cemento Portland.

Las adiciones se demoran en hidratarse pero luego de un mes de germinación todavía cuentan con muchos hidratos para nacer y continúan ganando resistencia como no puede hacerlo el cemento portland cuya hidratación luego de las cuatro semanas es mas bien escasa.

La resistencia “adicional” luego de los 28 días que pueda lograr una ceniza volante, una escoria o una puzolana, a la construcción en general no le interesa (a menos que se trate de obras con tiempos de construcción muy extendidos como las presas cuyas resistencias se especifican al año).

Este dilema nos obliga a componer el perfil de desarrollo de las resistencias de adiciones aumentando la tasa de reacción durante los primeros días. Es justo en este marco que nacen los activadores.

Los activadores son sustancias que aumentan la velocidad de reacción de las adiciones permitiendo acelerar sobre todo sus resistencias tempranas, lo que hace posible aumentar el uso de las adiciones a todos los tipos de concreto o a incrementar los porcentajes de adición incluidos.

Los activadores están hechos con base en silicatos, óxidos de calcio, nitratos y hasta sulfatos y su diseño obedece a un balance cuidadoso de todas las propiedades del concreto que se pretenden modificar.

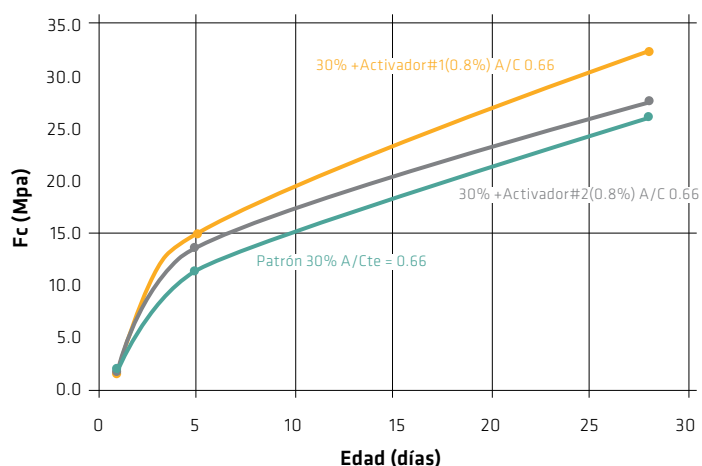


Figura 10. Evolución de resistencias para concretos con y sin activador.



SIKA UN AMPLIO RANGO DE SOLUCIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN

DCT-V0-197-09/2014



IMPERMEABILIZACIÓN



CONCRETO



REFORZAMIENTO



PEGADO Y SELLADO



PISOS



CUBIERTAS

¿QUIÉNES SOMOS?

Sika es una compañía activa mundialmente en el negocio de los productos químicos para la construcción. Tiene subsidiarias de fabricación, ventas y soporte técnico en más de 89 países alrededor del mundo. Sika es líder mundial en el mercado y la tecnología en impermeabilización, sellado, pegado, aislamiento, reforzamiento y protección de edificaciones y estructuras civiles. Sika tiene más de 16.000 empleados en el mundo y por esto, está idealmente posicionada para apoyar el éxito de sus clientes.

Sika Colombia S.A.S.

BARRANQUILLA

Cll. 114 No. 10 – 415. Bodega A-2
Complejo Industrial Stock Caribe.
Barranquilla
Tels.: (5) 3822276 / 3822008 /
3822851 / 3822520 / 30
Fax: (5) 3822678
barranquilla.ventas@co.sika.com

CALI

Cll. 13 No. 72 - 12
Centro Comercial Plaza 72
Tels.: (2) 3302171 / 62 / 63 / 70
Fax: (2) 3305789
cali.ventas@co.sika.com

CARTAGENA

Albornoz - Vía Mamonal
Cra. 56 No. 3 - 46
Tels.: (5) 6672216 – 6672044
Fax: (5) 6672042
cartagena.ventas@co.sika.com

EJE CAFETERO

Centro Logístico Eje Cafetero
Cra. 2 Norte No. 1 – 536
Bodegas No. 2 y 4. Vía La Romelia
- El Pollo
Dosquebradas, Risaralda
Tels.: (6) 3321803 / 05 / 13
Fax: (6) 3321794
pereira.ventas@co.sika.com

MEDELLÍN

Km. 34 Autopista Medellín - Btá -
Rionegro
PBX: (4) 5301060
Fax: (4) 5301034
medellin.ventas@co.sika.com

SANTANDERES

Km. 7 - Vía a Girón
Bucaramanga - Santander
PBX: (7) 646 0020
Fax: (7) 6461183
santander.ventas@co.sika.com

TOCANCIPÁ

Vereda Canavita
Km. 20.5 - Autopista Norte
PBX: (1) 878 6333
Fax: (1) 878 6660
Tocancipá - Cundinamarca
oriente.ventas@co.sika.com,
bogota.ventas@co.sika.com

La información y, en particular, las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionados de buena fe, y se basan en el conocimiento y experiencia actuales de Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de la obra son tan particulares, que ninguna garantía respecto a la comercialización o a la adaptación para un uso particular, o a alguna obligación que surja de relaciones legales, puede ser inferida de la información contenida en este documento o de otra recomendación escrita o verbal. Se deben respetar los derechos de propiedad de terceros. Todas las órdenes de compra son aceptadas de acuerdo con nuestras actuales condiciones de venta y despacho publicadas en la página web: col.sika.com. Los usuarios deben referirse siempre a la edición más reciente de las Hojas Técnicas, cuyas copias serán facilitadas a solicitud del cliente.



Código: CO-SC 033-1



Código: CO-SA 006-1



Responsabilidad Integral

CONSTRUYENDO CONFIANZA

