

III.- INVESTIGACION BIBLIOGRAFICA

La futura demanda de nuevos concretos estará relacionada con mayor durabilidad y mayor resistencia, que tengan niveles deseables o específicos en el comportamiento de esfuerzos y deformaciones, que posiblemente posean el rango de nuevas propiedades inteligentes introducidas como conductividad eléctrica, habilidad de detectar cambios de temperatura, habilidad de detectar cambios en humedad y también la habilidad de detectar cambios en esfuerzo. Otra de la demanda que en un futuro se espera es que sea sustentable, que sea viable en el costo y que sea también efectivo en la conservación de energía.

La solución para este tipo de nuevos concretos puede ser desarrollado en base a un mejor entendimiento y exactitud de la complejidad extrema de la estructura de los materiales basados en cemento a nivel-nano.

Empezaremos por definir ¿Que es el nivel nano?. El nano se puede definir como un billonésimo de la unidad de medida y podemos dar un ejemplo de que una tira de DNA es de 2nm de ancho. Otro ejemplo es que el cabello de un humano es de alrededor de 100,000nm.

El presente trabajo utiliza como adición al cemento la nanosilica, para lo cual definiremos algunos conceptos de la microsíllica y la nanosíllica.

III.1.- Microsíllica

III.1.1.- Antecedentes de microsíllica.

El uso de puzolanas como adiciones activas al cemento está ampliamente aceptado desde hace décadas, y la incorporación de algunas de ellas se recoge en la normativa vigente. Según la norma de la unión europea UNE-EN 197-1:2000

(Cemento. Parte 1: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes), se pueden incorporar al cemento distintos productos con propiedades puzolánicas como son la puzolana natural (P) que puede ser de origen volcánico como las tobas o de origen sedimentario como la roca opalina o las arcillas. Del mismo modo todas las sustancias que recogidas en la clase anterior necesiten un tratamiento térmico (Q= puzolana natural calcinada).

Existen también subproductos industriales, como las cenizas volantes (V= ceniza volante silíceo, W= ceniza volante calcárea) o el humo de sílice (D), que no necesitan un proceso de transformación para su uso como material puzolánico.

El endurecimiento de las leyes medioambientales está llevando al uso mayoritario de estos subproductos industriales como materiales puzolánicos. Por tanto cualquier residuo que pueda reutilizarse de este modo tendrá un carácter prioritario.

El aditivo mineral más ampliamente utilizado en el concreto, la ceniza volante, es un residuo finamente dividido (polvo que se asemeja al cemento) que resulta de la combustión del carbón mineral pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. Con la ignición en el horno, la mayor parte de la materia volátil y de carbono existentes en el carbón mineral se calcina. Durante la combustión, las impurezas del carbón mineral (como la arcilla, el feldespato, cuarzo y la pizarra) se funden en suspensión, y son retiradas de la cámara de combustión por el gas de escape. Mientras transcurre el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica formando partículas esféricas llamadas cenizas volantes.

La práctica de utilizar ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida en las mezclas de concreto de cemento Portland, ha ido aumentando en los últimos años en los Estados Unidos. Una de las principales razones de este incremento es el interés en la conservación de la energía así como la reducción en el costo del concreto que se obtiene al emplear cenizas o escorias para reemplazar parcialmente al cemento.

El humo de sílice, al que también se le conoce como microsíllica o humo de sílice condensado, es otro material que se emplea como aditivo puzolánico. Este es un producto en forma de polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso

Hasta hace unas décadas, las partículas de microsíllica se consideraban como un producto de desecho y se eliminaban. Sin embargo, durante la década de los '50, los investigadores europeos comenzaron a analizar los usos potenciales y a estudiar las aplicaciones potenciales de la microsíllica, incluido su utilización en combinación con cemento Pórtland.

III.1.2.- Composición de la microsíllica

Microsíllica es un mineral compuesto de esferas de bióxido de silicio (SiO_2) ultra fino, amorfo y cristalino, como se observan en la figura 1, producido durante la fabricación de silicio o ferrosilicio.

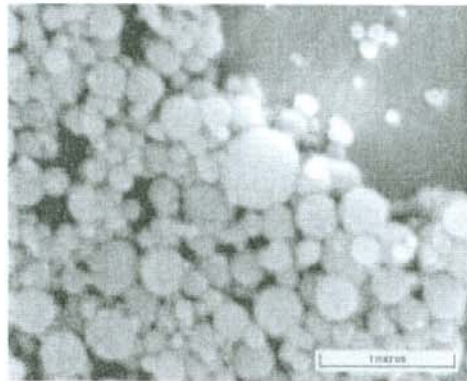


Figura 1. Partículas de microsíllica (SEM)

Las características físicas de la microsíllica son bastante diferentes a las de los componentes del concreto corriente, pero su composición química es muy similar. La microsíllica es un particulado extremadamente fino, con diámetros que son en

promedio 100 veces más finos que los de las partículas de cemento. Los pesos específicos de la microsilica son bajos, de alrededor de 2,2 en comparación con 3,15 de la mayoría de los cementos Pórtland. Debido a que la microsilica es un material extremadamente fino, sus densidades brutas a granel son muy bajas y varían entre 144 y 400 kg/m³, contra la densidad del cemento a granel en seco de 1,506 kg/m³.

La composición química de la microsilica es casi únicamente de dióxido de silicio (SiO₂). La Tabla 1 compara el análisis químico típico de los tres constituyentes habituales del concreto, que aparecen en la Figura 2.

Tabla 1. Análisis químicos

	Cemento	Ceniza volante	Microsilica
SiO ₂ Sílica	21.3%	49.0%	92 - 98%
Al ₂ O ₃	4.5	24.6	0.5
Fe ₂ O ₃	4.0	7.3	2.1
MgO	2.4	1.6	0.3
CaO	63.1	9.1	0.8
Na ₂ O	0.1	0.2	0.1
K ₂ O	1.2	0.6	1.0
SO ₃	2.2	0.4	0.2



Cemento Ceniza volante Microsilica

Fig. 2. Constituyentes del concreto

III.1.3.- Proceso de producción de la microsíllica

Este proceso involucra la reducción de cuarzo de alta pureza en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000° C (Fig. 3).



Figura 3. Horno de arco eléctrico

La microsíllica se forma cuando el gas SiO producido conforme el cuarzo se reduce, se mezcla con el oxígeno en la parte superior del horno. En este punto el SiO se oxida a SiO₂, condensándose en las partículas esféricas puras de microsíllica que forman la mayor parte de los vapores del humo del horno. De aquí los nombres alternos para el material (vapores de sílice condensados o vapores de sílice).

Los vapores del horno se conducen a través de tuberías de enfriamiento, por un pre-colector y ciclón (para quitar las partículas gruesas que pudieran haberse arrastrado del horno) y luego se soplan hacia filtros bolsa diseñados especialmente donde se recolectan (Fig. 4).

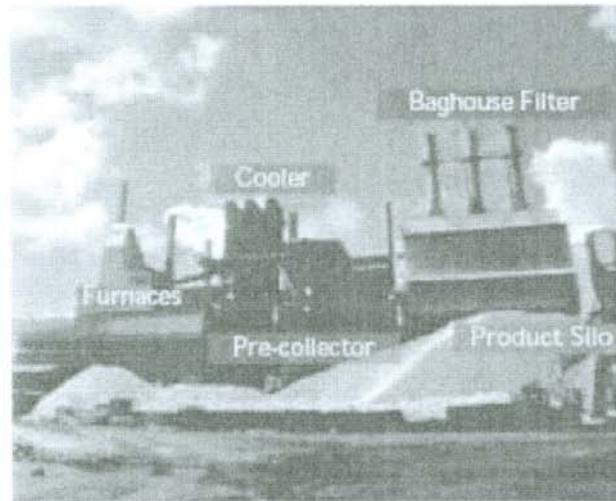
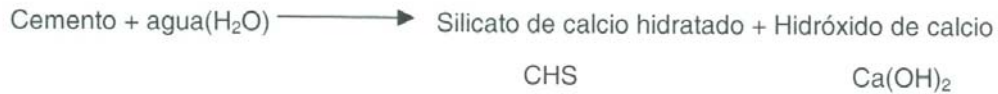


Figura 4. Sistema de producción de microsilica

La calidad de las materias primas y la operación de los hornos determinan la pureza de la microsilica. Aunque el material se recolecta como un polvo muy fino con una densidad a granel en el rango de 200 kg/m^3 , se le puede procesar para densificarlo, haciendo la densidad a granel de alrededor de 650 kg/m^3 , o puede hacerse lechada. Este proceso posterior involucra el mezclado de la microsilica, normalmente en forma directa de los filtros de los silos, con un peso igual de agua. La lechada es fácil de transportar, almacenar dosificar y de mezclarse con el concreto.

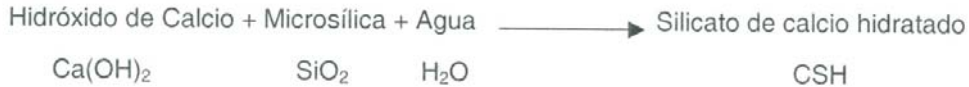
III.1.4- ¿Como trabaja la microsilica?

La microsilica mejora el concreto a través de dos mecanismos principales: la reacción puzolánica y el efecto de micro llenado. Cuando se agrega agua al cemento Pórtland, se produce la hidratación, formándose dos productos, como se muestra a continuación:



El silicato de calcio hidratado que se forma es el pegamento o aglomerante, que conserva unido el sistema. El hidróxido de calcio más débil no contribuye como aglomerante y puede ocupar hasta un cuarto del volumen de los productos de hidratación. Además, el hidróxido de calcio se puede combinar con el dióxido de carbono para formar una sal soluble que percole por el concreto y que pueda provocar eflorescencia, un problema arquitectónico conocido. Cuando hay grandes cantidades de hidróxido de calcio, el concreto puede ser más vulnerable al ataque de sulfato, al ataque químico y a las reacciones álcali-árido adversas.

La microsíllica puzolánica reacciona con el hidróxido de calcio y con el agua para producir más gel de silicato de calcio aglomerador de agregados, mientras, simultáneamente, reduce el contenido de hidróxido de calcio, como se aprecia en la siguiente reacción química:



Este aglomerante adicional mejora la adhesión dentro de la matriz de concreto y ayuda a reducir la permeabilidad, mientras la reducción de hidróxido de calcio mejora la durabilidad del concreto. El efecto positivo de la microsíllica se puede apreciar con mayor detalle en las dos microfotografías de electrones de las Figuras 5 y 6. La Figura 5 se amplía en más de dos mil veces y se destaca la interfaz del árido con la pasta en una matriz de concreto sin microsíllica. La porción superior de la fotografía es un hueco anteriormente ocupado por el árido. Los cristales de hidróxido de calcio están debajo de la interfaz, lo cual evita que se produzca una buena adhesión entre la pasta (esquina izquierda inferior) y el árido.

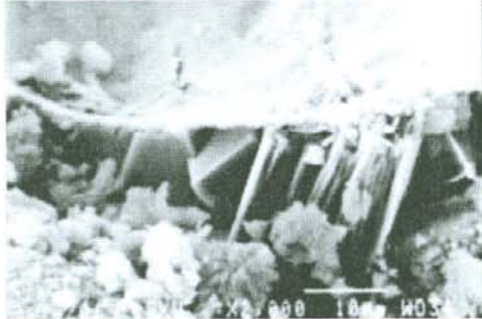


Fig.5 Concreto sin microsilica



Fig.6 Concreto con microsilica

Por el contrario, la Figura 6 muestra una vista similar del concreto con microsilica. La parte superior muestra un espacio de árido sin cristales de hidróxido de calcio debajo de la interfaz. La pasta forma una excelente adhesión con el árido, lo que produce un concreto más sólido y reduce la permeabilidad. El segundo mecanismo mediante el cual la microsilica mejora la calidad del concreto es con el denominado "efecto de microllenado". La mayor parte del humo de sílice condensado tiene un tamaño de partícula de alrededor de 0,15 micrones en promedio, en tanto que un cemento Pórtland típico posee un tamaño de partícula de 15 micrones en promedio. Debido a esta relación de tamaño, existen más de 50.000 partículas de microsilica por cada grano de cemento en una mezcla con 10% de microsilica por peso de cemento (como se muestra en la Figura 7.).

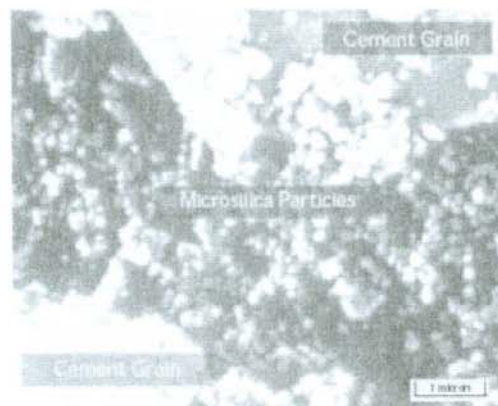


Figura 7. La microsilica actúa como carga y puzolana

La finura extrema de la microsíllica permite que llene los vacíos microscópicos que hay entre las partículas de cemento. Al efecto de micro llenado se le atribuye una gran reducción de la permeabilidad y un mejoramiento de la adherencia entre la pasta y el árido en el concreto con microsíllica, en comparación con el concreto convencional.

Debido a que las partículas de microsíllica son ultra finas, con un área de superficie específica de alrededor de 20,000 m²/kg y un contenido de SiO₂ de aproximadamente 90%, la reactividad es muy alta. Por el tamaño muy pequeño de las partículas de microsíllica, la estructura cristalina formada por esta reacción es también muy pequeña y ocupa los espacios vacíos dentro de la matriz. Esto densifica la estructura completa del concreto, resultando en una resistencia mayor y reducciones significativas en permeabilidad.

Los aumentos en resistencia pueden ser desde 20% hasta 50% al usar microsíllica como una simple adición.

Sin embargo, si el concreto está diseñado para tomar ventaja de la acción puzolánica e incluye el uso de súper-plastificantes para mantener muy bajas relaciones agua cemento, se pueden lograr grandes mejoras.

Se han registrado resistencias diseñadas de más de 100Mpa para entregas de mezcla preparada de concreto. El efecto sobre la permeabilidad es aún más pronunciado. Cuando se usa un 10% de dosis en una mezcla que contiene alrededor de 400 kg de cemento, el coeficiente de permeabilidad se puede reducir hasta 1/100 del nivel del concreto equivalente sin microsíllica.

Este incremento en resistencia y la reducción en permeabilidad del concreto, combinados con la reducción de hidróxido de calcio, significan que las características de durabilidad del concreto son enormemente mejoradas.

Las resistencias sulfato y cloruro es aumentada, la susceptibilidad a la reacción álcali-silice se elimina virtualmente y la resistencia y adherencia mejoradas

significan que la resistencia a la abrasión y erosión de un microsilica concreto excede por mucho las de una mezcla ordinaria.

La microsilica se puede usar para reducir el calor de hidratación (un factor muy importante en construcciones de concreto masivas). Esto puede lograrse reduciendo el contenido de cemento y empleando la microsilica para elevar la resistencia debido a su eficiencia cementante. Otra manera es usar un alto porcentaje de otro material puzolanico de reemplazo (como un PFA= cenizas de combustible pulverizado o GGBFS= escorias de altos hornos granulada y molida) y emplear la reactividad de la microsilica para dar resistencia en etapa temprana e impermeabilidad, permitiendo así que los materiales más lentos trabajen en un período mucho más largo de tiempo.

III.1.5.- Consideraciones de colocación, terminado y curado de concreto con microsilica

El concreto con microsilice no es difícil de trabajar, pero debido a que se usa para aplicaciones especiales, se debe tener cuidado de que se sigan las buenas prácticas de calidad de la aplicación de concreto. La demanda de agua del concreto puede aumentar cuando se agrega microsilice a la mezcla. Al igual que con los áridos, las partículas de microsilice de menor tamaño poseen un área de superficie mayor y por ello, tienen más demanda de agua. Un método para compensar este efecto consiste en incrementar el contenido de agua; sin embargo, esto produce un concreto de menor calidad. Se recomienda casi universalmente el uso de un superplastificante o de un reductor de agua de alto rango, junto con la microsilice.

El concreto fresco puede ser más cohesivo y pegajoso que el concreto convencional, dependiendo de la dosis de microsilice. Debido a esta cohesividad, se deben usar asentamientos de 20 a 50 mm (1 a 2 pulgadas) más altos que lo normal para tipos de colocación similares. Para una colocación más fácil, se debe

especificar el asentamiento práctico más alto (que se logra mediante el uso de superplastificantes). A pesar de la mayor cohesividad, el hormigón con microsílíce produce una pasta muy cremosa y es muy bombeable.

Una de las mayores diferencias que se dan en el uso de concreto con microsílíce se produce durante la terminación. La adición de microsílíce elimina virtualmente la exudación, lo que lo hace más susceptible al agrietamiento por retracción plástica que el concreto convencional. Para obtener una buena superficie se deben seguir las prácticas descritas en la Guía para la Construcción de Suelos y Losas de concreto (ACI 302) y en Hormigonado en Clima Cálido (ACI 305).

Las prácticas de terminación y curado que han funcionado con éxito en terreno generalmente involucran un sub-acabado y curado en exceso del concreto.

El curado debe comenzar inmediatamente después de terminar la operación y puede incluir nebulización y/o la colocación de arpillera húmeda sobre la superficie. Es esencial una atención cuidadosa al curado; como con cualquier concreto, el concreto con microsílíce funciona mucho mejor cuando está bien curado. Se debe seguir fielmente la Práctica Estándar de Curado de concreto (ACI 308.).

La adición de microsílíce también puede influir en el color del concreto plástico y endurecido. En general, un concreto con microsílíce es de un gris más oscuro que el del concreto convencional y puede tornarse casi negro, dependiendo de la dosis de microsílíce que se use. Esto se aclara o se decolora con el tiempo.

III.1.6.- Especificaciones de microsílíce en el concreto

La microsílíce generalmente se especifica en dosis que se expresan por peso de cemento. Las dosis varían según la aplicación y el nivel de protección que se requiera, y en general van entre 5% y 15% de microsílíce por peso de cemento.

Dada la finura de las partículas de MICROSILICA, el aditivo debe estar muy bien mezclado dispersándolo completamente con las partículas de cemento. La dispersión adecuada se logra cuando se agrega primero la microsíllica en el proceso de mezclado. Una secuencia típica de mezcla sería siguiendo los siguientes pasos:

- 1). Agregar primero la MICROSILICA.
- 2). Después el agregado grueso más arena y 75% agua.
- 3). Seguido de un aditivo inclusor de aire (si es necesario).
- 4). Se incorpora después el cemento.
- 5). Reductor de agua de alto rango (recomendación)
- 6). Y por ultimo se agrega el 25% de agua restante

La necesidad de agua aumentará cuando se use microsíllica. La mayoría de las mezclas necesitan del uso de un reductor de agua de alto rango para mantener la trabajabilidad, un bajo contenido de agua y una relación baja de agua/cemento.

Dado que el concreto con MICROSILICA tendrá una cantidad reducida de agua por exudado para reemplazar la que se ha evaporado, será más susceptible a fisuras por retracción plástica.

III.1.7.- Beneficios que aporta la microsíllica al concreto.

Debido a la naturaleza puzolánica y a la extrema finura de la microsíllica, el uso de esta puede mejorar muchas de las propiedades del concreto, lo que posibilita una amplia gama de aplicaciones. Entre sus beneficios están:

- **Aumento de la Resistencia**

Las resistencias a la compresión del concreto premezclado 70 a 140 MPa (10.000 a 20.000psi).

Resistencias a la flexión de 10 a 14 MPa (1.500 a 2.000 psi).

Desarrollo de altas resistencias a edades tempranas para tiempos de ciclo de producción más corto.

- **Reducción significativa de la Permeabilidad/Aumento de la Resistividad**

El ensayo de permeabilidad rápida al cloruro dio como resultado menos de 1000 coulombs

Reducción de la permeabilidad al agua y gas

Altas resistividades que proporcionan protección anticorrosiva.

- **Mayor durabilidad**

Mayor resistencia al ataque químico agresivo.

Mejor resistencia al ataque de sulfatos.

Mejor resistencia a la abrasión-erosión hidráulica.

Mejor resistencia a la reactividad álcali-árido adversa.

Mayores resistencias a descascaramiento y ciclos de hielo - deshielo.

Estos beneficios hacen que la microsíllica sea apta para diversas aplicaciones

III.1.8.- Principales aplicaciones

- Concretos de altas resistencias
- Concreto de alta densidad
- Plataformas para puentes
- Estructuras para estacionamientos
- Ambientes marinos
- Shotcrete (concreto lanzado).
- Concretos de alta resistencia química.

III.2.- Nanosilica

El efecto positivo de las nano-partículas bien dispersadas incrementan la viscosidad el concreto en fase líquida, ayudando a suspender los granos del cemento y los agregados, mejorando a que se minimice la segregación la trabajabilidad de este. Nano partículas llenan los vacíos entre los granos de cemento, resultando así la inmovilización del agua que queda libre entre estos espacios y las nano-partículas produciéndose un efecto de llenado. Otro punto importante sería que las nano partículas bien dispersadas actúan como centro de cristalización de la hidratación del cemento, entonces las partículas aceleran su hidratación. Otro punto muy importante es que las nano-partículas mejoran la zona de contacto de la estructura de los agregados, resultando un mejor agarre entre agregados y la pasta del cemento. Entre otros efectos positivos estará que se minimizaran las grietas y mejoraran los efectos de adhesión entre las partículas provocadas por el mejoramiento de las nano-partículas ya sea en dureza, en resistencia a la tensión y flexión de materiales que estén basados en cemento. (Según Sobolev Konstantin en la ponencia nacional de ingeniería civil "Emiliano Rosenblouth").

III.1.8.- Principales aplicaciones

- Concretos de altas resistencias
- Concreto de alta densidad
- Plataformas para puentes
- Estructuras para estacionamientos
- Ambientes marinos
- Shotcrete (concreto lanzado).
- Concretos de alta resistencia química.

III.2.- Nanosilica

El efecto positivo de las nano-partículas bien dispersadas incrementan la viscosidad el concreto en fase líquida, ayudando a suspender los granos del cemento y los agregados, mejorando a que se minimice la segregación la trabajabilidad de este. Nano partículas llenan los vacíos entre los granos de cemento, resultando así la inmovilización del agua que queda libre entre estos espacios y las nano-partículas produciéndose un efecto de llenado. Otro punto importante sería que las nano partículas bien dispersadas actúan como centro de cristalización de la hidratación del cemento, entonces las partículas aceleran su hidratación. Otro punto muy importante es que las nano-partículas mejoran la zona de contacto de la estructura de los agregados, resultando un mejor agarre entre agregados y la pasta del cemento. Entre otros efectos positivos estará que se minimizaran las grietas y mejoraran los efectos de adhesión entre las partículas provocadas por el mejoramiento de las nano-partículas ya sea en dureza, en resistencia a la tensión y flexión de materiales que estén basados en cemento. (Según Sobolev Konstantin en la ponencia nacional de ingeniería civil "Emiliano Rosenblouth").

La nano-tecnología esta todavía en su estado de pre-exploración. Este esta emergiendo de su etapa fundamental de investigación hacia sus inicios en la industria, que actualmente se llevan y después a escala ya mayor en aplicaciones limitadas en construcción, pero el verdadero potencial de la nano-tecnología será mejorar la efectividad de los materiales y en cuanto a los procesos de contracción esta tecnología es mucho mas prometedora.

La propiedad de algunas plantas que tienen en la superficie de sus hojas, hace de ellas que sean autolimpiables y esto gracias a su estructura que tienen en la superficie a nivel nano y micro. Este fenómeno físico-químico puede ser reproducido técnicamente y se le llama el efecto Loto, como se muestra en las figuras 8, 9 y 10. (Según Sobolev Konstantin en la ponencia nacional de ingeniería civil "Emiliano Rosenblouth").

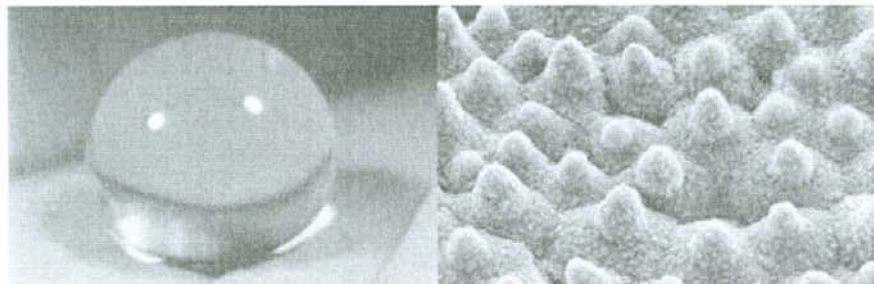


Fig. 8. Superficie super-hidrorepelente y autolimpiables.

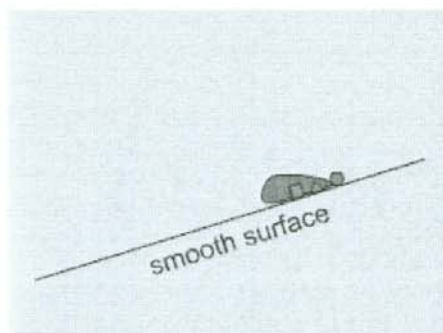


Fig. 9. SUPERFICIE PLANA. Se puede observar como el agua deja residuos.

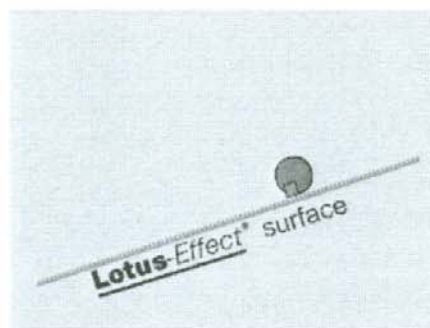


Fig. 10. EFECTO LOTO EN UNA SUPERFICIE. Se puede observar como las pequeñas perturbaciones en la superficie impide que el agua se disperse en la superficie y esta así lleva consigo residuos.

Ahora podemos decir que cuando la materia es controlada a nivel-nano, las siguientes propiedades fundamentales pueden ser cambiadas completamente tales como: su función térmica, eléctrica, magnética y también su reactividad térmica.

La nano-química con la posibilidad de grande crecimiento ofrece las posibilidades de nuevos productos que pueden ser efectivamente aplicados en la tecnología de concreto, como el mostrado en la figura 12, en la que podemos observar una iglesia construida a base de nanotecnología a nivel nano estructura, donde se utilizo un concreto autolimpiable, en el que ocurre un proceso similar a al que ocurre naturalmente en la flor de loto. Un ejemplo de estos, esta relacionado al desarrollo de nuevos súper plastificantes para el concreto, basados en polímeros éter poli-carboxilos. Los nuevos súper plastificantes pueden ser nano-diseñados específicamente a la retención de el revenimiento en las mezclas del concreto o también el rápido desarrollo de alta resistencia en temprana edad del concreto. (Según Sobolev Konstantin en la ponencia nacional de ingeniería civil "Emiliano Rosenblouth").

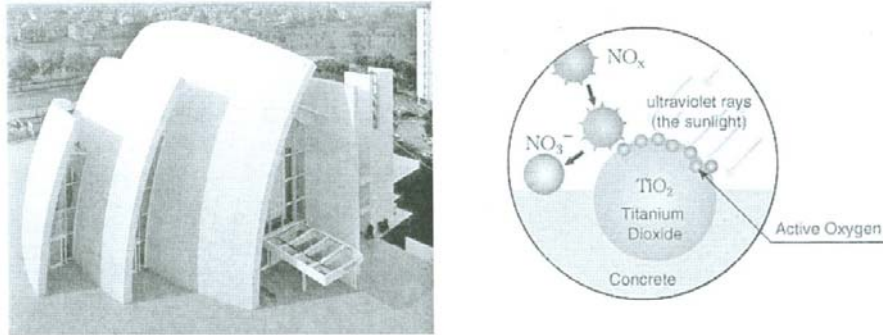
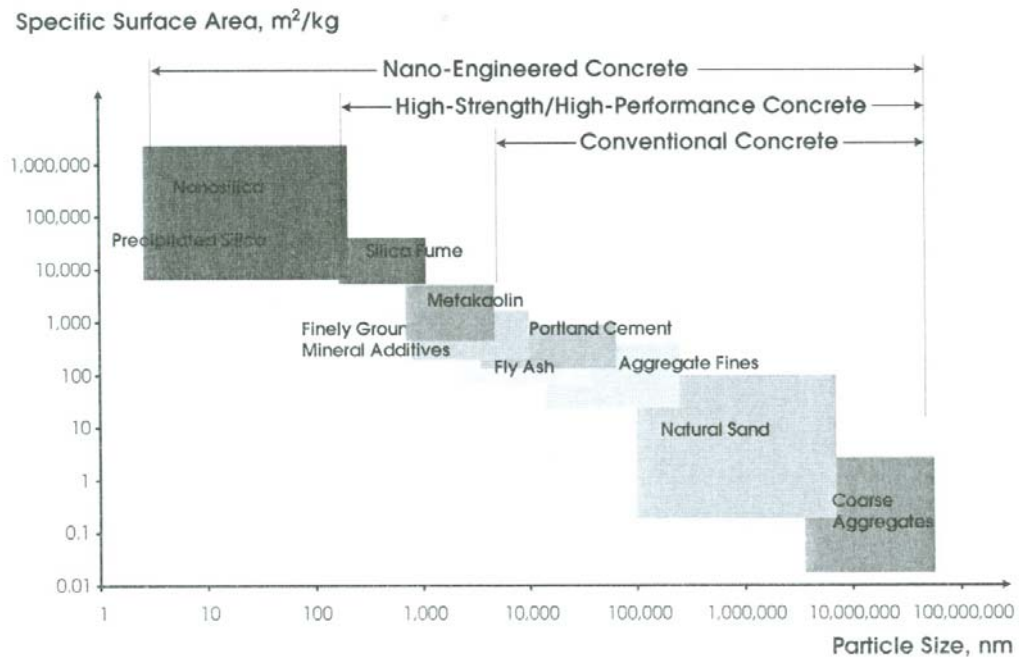


Fig. 12. Iglesia "Divas en misericordia" construida con concreto autolimpiable.

Escala del tamaño de partículas relacionadas al concreto. (Fig. 13)



Proceso de hidratación del cemento a nivel nano-estructural. (Fig. 14).

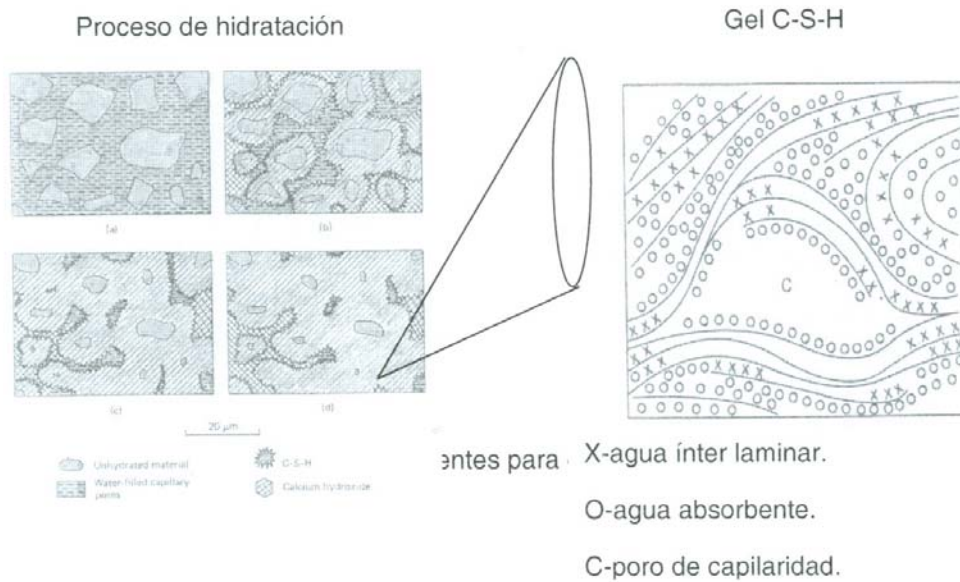


Fig. 14. Hidratación del concreto con nanosilica

La investigación reciente a nivel nano se enfoca en la investigación de la estructura de los materiales basados en cemento y sus mecanismos constituidos. Con el avance de nuevas tecnologías y equipamiento es posible observar su estructura a su nivel atómico e inclusive medir su resistencia, dureza y otras propiedades básicas de fases micro y nano esópicas de los materiales. (Fig. 15).

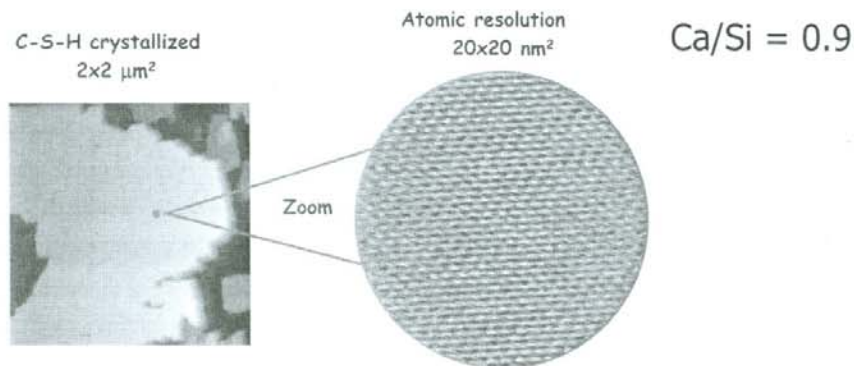


Fig. 15. Nano estructura del gel c-s-h

Se propone que cuando nano-partículas sean incorporadas en materiales de construcción convencionales, estas puedan poseer propiedades avanzadas e inclusive inteligentes requeridas para construcciones de gran altura, de grandes claros o sistemas de estructuras inteligentes en ingeniería civil.

El propósito de la unión a nivel nano es de llenar los espacios vacíos entre agregados y grano del cemento. Entonces el componente del clincker será de 20 a 30 %. (Figuras 16, 17 y 18). (Según Sobolev Konstantin en la ponencia nacional de ingeniería civil "Emiliano Rosenblouth").

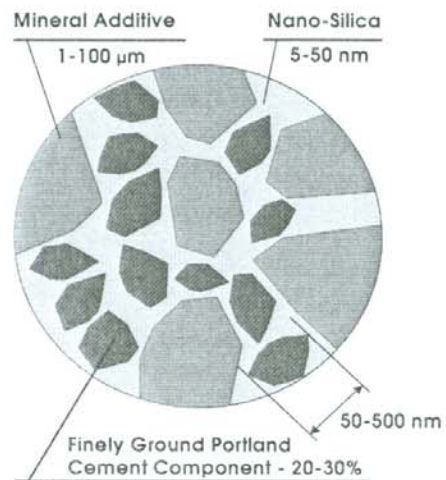


Fig. 16. Matriz del concreto

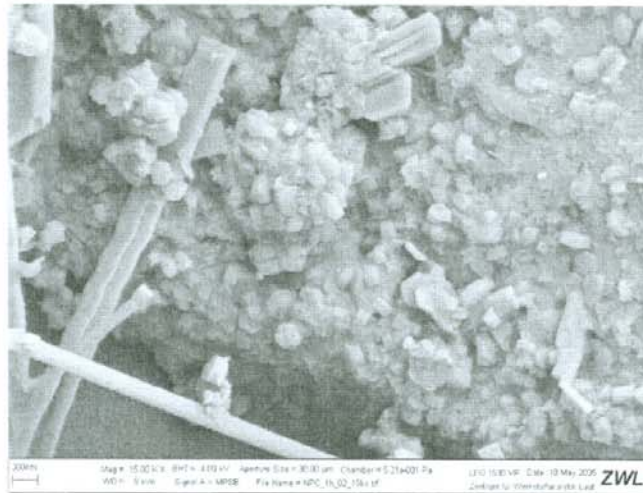


Fig. 17. Se observa el cemento Pórtland tradicional a nivel nano ya hidratado.



Fig. 18. Se observa el concreto de alta efectividad a nivel nano ya hidratado.