Uso de Sílice en hormigones de Alto Desempeño.

Luis Allauca[1], Hugo Amen[2], Jessica Lung[3]
(1) (2) (3) Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de La Tierra, Campus Gustavo Galindo, km 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador

Resumen

El presente artículo presenta una recopilación de los diferentes usos de la adición de sílice en el cemento portland ordinario para la obtención de hormigones de alto desempeño enfocándose en el uso de la puzolana, ceniza de cascarilla de arroz y humo de sílice. Como primera parte de este trabajo se hace referencia a la puzolana, su origen, propiedades antes y despues del fraguado lo cual da como producto el cemento portland puzolánico. Luego se trata el tema de la microsílice (humo de sílice): su definición, obtención y las propiedades que brinda o incrementa al hormigón y unas aplicaciones reales de hormigón de alto desempeño con contenido de microsílice. Despues refiere al uso de ceniza de cascarilla de arroz también como adición del cemento, su característica física y química, como también la producción de este en Ecuador, dando un mejor uso a la cascarilla de arroz y protegiendo nuestro medio ambiente, además las aplicaciones de este.

Palabras Claves: *Cemento portland Puzolánico, humo de sílice, cascarilla de arroz, Propiedades antes y despues del fraguado, hormigones de alto desempeño.*

Abstract

The current article presents the collecting for the different uses to addition for silica in the normal cement Portland to get high concrete performance. Its focus to use of puzzolan, silica fume and rice husk ash. At the first part of paper we refer about puzzolan, their origin property before and after of setting. This is the way in order to make Puzzolan Portland Concrete. The next topic is micro silica (silica fume): definition, making and properties to increased cement and real applications of high concrete performance with silica fume. Rice husk ash is used in addition with Portland cement, its physical and chemical properties, as then development in Ecuador, with it gets to better use rice hush ask, keeping our environment and the different uses.

Keywords: *Puzzolan Portland cement, silica fume , rice hush ask, property before and after of setting, performance high concrete.*

1. Introducción.

A medida que la ciencia avanza introduciendo nuevas tecnologías en los procesos de obtención de productos más eficientes y de menor costo conservando el medio ambiente, así avanza el campo de la tecnología del hormigón y del control de calidad, los diseños actuales tienden a ser más exigentes en relación a la resistencia de diseño que tienden a ser más elevadas debido a las complejidades constructivas.

Inicialmente cuando se comenzó a producir hormigón a inicios del siglo XX las resistencias alcanzadas fueron de 14 MPa, en los años 30 se consiguieron el doble. Aquí se marca una tendencia a optimizar las propiedades del clinker para obtener mayor resistencia y durabilidad, así como los a medios de producción, dosificación y mayor conocimiento de las características reológicas y propiedades mecánicas del hormigón.

El artículo presenta el uso de sílice en los hormigones de alto desempeño. Se ha enfocado en tres maneras de obtención, como la puzolana que se obtiene producto de las erupciones volcánicas, humo de sílice que es obtenido por procesos industriales y la cascarilla de arroz que indirectamente se encuentra de manera natural.

2. Uso de Cemento Puzolánico en hormigones de alto desempeño.

2.1. Generalidades.

Uno de los materiales de construcción más antiguos después de la cal y la piedra caliza fue la puzolana cuyo nombre proviene de una población cercana al Vesubio llamado Pozzuoli. Los romanos y griegos la utilizaron mezclándola con cal y ceniza volcánica (origen puzolana) dando mezclas duraderas. Esta concepción continúa plenamente vigente siendo el cemento portland puzolánico más utilizado en grandes obras de ingeniería de la actualidad debido a la larga vida útil para la cual están diseñadas. Teniendo esto como precedente se puede definir al cemento Portland puzolánico como el producto que se obtiene después de adicionar al cemento portland ordinario el material puzolánico que puede variar en un porcentaje entre el 15 al 50%.

2.2. Reacciones químicas durante el proceso de hidratación.

Las propiedades de las puzolanas (incluso las naturales) varían considerablemente, dependiendo de su origen. En nuestro país existen yacimientos de puzolana natural proveniente de erupciones volcánicas.

Las puzolanas, incorporadas dentro cemento portland tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria donde se combinan con el $(OH)_2Ca$ formado durante la hidratación de los compuestos sílico-calcáreos (C3S y C2S) denominada primaria, resultando compuestos SCH (sílico-calcáreos-hidratados):

Hidratación primaria:

$$CnS + H2O \rightarrow \text{gel SCH} + (OH)_2Ca$$

Hidratación secundaria:

$$SiO2 + (OH)_2Ca + H2O \rightarrow \text{gel SCH}$$

Como se puede ver en la figura 1,el SiO2 es aportado por la puzolana y el $(OH)_2Ca$ –hidróxido de calcio- es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de $(OH)_2Ca$. Por lo anterior se puede afirmar que a medida que avanza el proceso de hidratación, la cal libre disminuye, lo que indica la formación de productos de hidratación (en su mayor parte SCH y aluminosilicatos de calcio en menor medida) a partir de la puzolana.

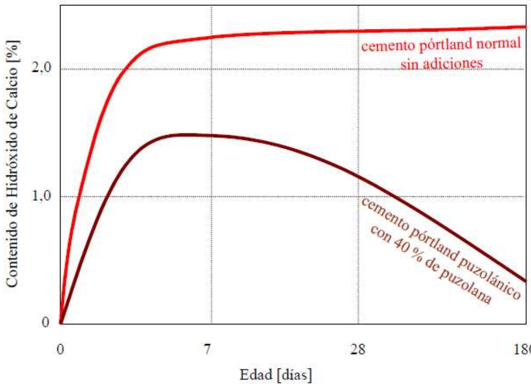

Figura 1. Cambios en el contenido de $(OH)_2Ca$ durante la hidratación del CPP.

Es evidente que el uso de una puzolana de buena calidad asegura, no solamente una menor cantidad de cal libre en la pasta de cemento sino que además se obtiene un mayor volumen de productos SCH por lo cual se obtiene, a igual relación agua cemento, una menor porosidad de la pasta debido a un refinamiento de poros y, consecuentemente, menor permeabilidad respecto del cemento portland normal producido a partir del mismo clinker portland. Esto significa la obtención de una pasta de cemento más compacta, resistente y durable[1].

2.3. Propiedades del hormigón utilizando cemento portland puzolánico.

Durante el proceso de fraguado del cemento portland puzolánico y los agregados se deben considerar las propiedades durante el fraguado (en estado fresco) y en estado endurecido.

a) Propiedades en estado fresco. Las propiedades del hormigón en estado fresco dependen fundamentalmente de las características de los materiales componentes y las proporciones utilizadas, destacándose la influencia de los agregados (forma, tamaño y distribución) que suelen ocupar más del 70 % del volumen del hormigón. Además, las características del cemento portland puzolánico influyen en el comportamiento del hormigón.

En general, el cemento portland puzolánico (400 m2/kg < Blaine < 500 m2/kg) es más fino que el cemento portland ordinario (300 m2/kg < Blaine < 350 m2/kg), debido a esto se requiere mayor demanda de agua para el hormigón. Por consiguiente, se recomienda el uso de aditivos plastificantes para disminuir el contenido de cemento en lo máximo. De esta manera, puede ser aprovechada al máximo la alta capacidad de retención de agua que poseen los hormigones elaborados con puzolana.

Existen parámetros que pueden ser determinados para describir el flujo del concreto en estado fresco los cuales se describen en la tabla 1, para la evaluación del hormigón en estado fresco se basan en 2 métodos que son por gravedad y por vibración.

Tabla 1. Pruebas usadas para evaluar el hormigón en estado fresco

Prueba	Tipo de esfuerzo	Relación
Slump	Gravedad	Relacionada al esfuerzo de fluencia
Esfera de Kelly	Presión por penetración	Relacionada al esfuerzo de fluencia
Prueba de Vicat	Presión por penetración	Relacionada al esfuerzo de fluencia
K-slump	Gravedad	Relacionada a la segregación
Viscometro	Gravedad	Relacionada a la viscosidad
Prueba de Ve-Be	Por vibración	Para hormigones con alto esfuerzo de fluencia

b) Propiedades en estado endurecido. Los hormigones que son desarrollados con puzolana tienen características de gran durabilidad, baja permeabilidad, bajo grado de calor de hidratación, alta resistencia final.

- **Resistencia Mecánica.**

Ya se explicó anteriormente el mecanismo de hidratación del cemento portland puzolánico, que el desarrollo de resistencia depende principalmente de la velocidad de hidratación de las partículas de clinker portland y del tipo, contenido y finura de la puzolana.

Una de las nuevas tendencias de los diseñadores de superestructuras es la de utilizar resistencias mayores a f´c=70 MPa con resistencias no de 28 días sino de 56 o 90 días para la edad de diseño de hormigón [1]**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

- **Desarrollo de Temperatura.**

Cuando se realizan obras de gran envergadura donde se va emplear cantidades de hormigón en sus elementos principales como presas, muelles, etc., se ve en la necesidad de controlar el calor de hidratación cuando comienza el proceso de fraguado, para que el proceso de esfuerzo y deformación del concreto influya sobre la estructura evitando grietas por procesos térmicos, esto se puede lograr constructivamente incluyendo sistemas de enfriamiento en las estructuras, agua y agregados sometidos a bajas temperaturas o adicionando acero para que absorba estos esfuerzos adicionales.

El cemento portland puzolánico tiene la ventaja de tener un componente mineral que reacciona con el hidróxido de calcio, el contenido total de clinker en su composición es menor que el cemento portland ordinario, cuando se consume la puzolana el calor de hidratación es menor que el cemento portland ordinario[2].

- **Durabilidad.**

La durabilidad se la ha definido como la habilidad de poner soportar los ataques químicos, del medio ambiente, abrasión u otro agente que afecte a la estructura. Esta definición es muy amplia ya que existen factores externos que pueden modificar las condiciones iníciales para la cual fue concebido la obra. Existen diferentes métodos de medición que resultan útiles para evaluar el desempeño del hormigón y de qué manera contribuirá a la durabilidad de la estructura. Entre las propiedades del hormigón que contribuyen con la durabilidad se destacan la permeabilidad, resistencia a los sulfatos, reacción álcali-agregado y susceptibilidad a la fisuración.

3. Uso de microsílice en Hormigones de Alto Desempeño.

3.1. Definición y obtención de microsílice.

La microsílice (o humo de sílice) suele definirse como una "súper puzolana" por las propiedades que proporciona al cemento. Según el ACI 116R el humo de sílice se define como un "muy fino y no cristalino sílice producido en hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio o de aleaciones elementales que contienen silicio; también es conocido como humo de sílice condensado o microsílice"i. Es un mineral compuesto de Dióxido de silicio amorfo y ultrafino, que resulta del proceso de obtención de ferrosilicio o silicatos, involucrando la reducción en hornos de arco eléctrico (ver Figura 2) a temperaturas superiores a 2000ºC.

Figura 2. Horno de arco eléctrico.

La microsílice presenta colores grises que pueden variar de claro a oscuro dependiendo de los rellenos no silicios de la misma y pueden ser carbón u oxido de hierro por ser producto de un proceso de alto horno. Al tener mayor contenido de carbón la microsílice será más oscura

3.2. Propiedades del cemento con microsílice.

La microsílice, debido a su extrema finura además de su contenido de sílice, tiene un importante papel en las reacciones internas de la pasta de hormigón. Su uso se incrementó en la producción de hormigones de alto desempeño en la década de los 80's y 90's.

Al ser tan pequeñas las partículas, estas actúan como un filler llenando los espacios vacíos en la pasta haciendo que el hormigón tenga mayores propiedades adherentes, creando mayor compacidad a la vez que brinda más fluidez a la mezcla. Además ayuda a reducir la exudación de agua en la superficie y proporciona reducciones significativas en la permeabilidad del hormigón y, al ser menos permeable, incrementa también la durabilidad del mismo.

En cuanto a la resistencia del hormigón, se han determinado aumentos significativos desde 20 a 50% [5], obteniendo mayores beneficios con el uso de súper plastificantes. Al hacer uso de éstos los contenidos normales de microsílice varían entre el 5% y el 15% del peso del cemento.

Otra de las propiedades que brinda el uso de microsílice como adición es el incremento de la resistencia al ataque de sulfatos y cloruros, reduce casi hasta eliminar una probable reacción álcali sílice. Todo esto se traduce en mayor durabilidad en los elementos en los cuales se emplee esta adición y que estén sometidos a climas extremos tales como hielo-deshielo, etc[3]

3.3. Aplicación de hormigón con microsílice.

El hecho de construir cada vez mas estructuras acortando tiempos y optimizando costos es básicamente el impulso de los investigadores y diseñadores de desarrollar varias investigaciones sobre adiciones, aditivos y tipos de agregados y la dosificación precisa para obtener los resultados deseados de resistencia y durabilidad en el hormigón. Aquí citaremos algunos ejemplos.

(a) Puente confederación, Isla Príncipe Edward, Canadá.

Terminado en 1997, este puente de 13 km. de longitud conecta la Isla Prince Edwards con la Costa este de Canadá. Además de un corto tiempo para su construcción, los requerimientos técnicos del puente se resumen en la siguiente lista:

- Una vida de servicio de 100 años.
- Un canal de navegación de al menos 172 m de ancho, 39 m de altura.
- La superestructura debía tener tres carriles para el tránsito.

- La falla o colapso de uno de los tramos no causaría el fallo o colapso progresivo de los otros.
- Cargas medioambientales como el hielo, viento, olas y consecuentemente cargas de sismo y temperatura debían ser tomadas en cuenta.
- La estructura debía poder soportar en cierta magnitud la colisión de embarcaciones.
- El puente debía ser estético arquitectónicamente

Todo esto fue solucionado con largos tramos prefabricados (250m de longitud máxima) y alrededor de 40000m3 de hormigón con un 7.5% de microsílice en el cemento lo que permitió alcanzar resistencias de 55MPa a los 28 días[5].

(b) Torres Petronas, Kuala Lumpur.

Estas torres fueron terminadas en el año 1988. Tienen 452 m. de altura repartidos en 88 pisos como se puede ver en la figura 3. Cuentan con un "puente sobre el cielo" el cual fue considerado y calculado mucho después de comenzada la construcción de las torres al darse cuenta que no contaban con un eficaz sistema de evacuación en caso de incendio.

El hormigón de alto desempeño se prefirió básicamente por sus ventajas estructurales, siendo colocado en el núcleo de ambas torres y en las columnas perimetrales. En esta obra el hormigón se clasificó por grados según la resistencia de diseño, como se indica a continuación:

Grado 80: Resistencias de 80 MPa en 56 días. Siendo el hormigón de mayor resistencia utilizado en las torres, este fue usado en las columnas de los niveles inferiores, en las paredes del núcleo y en las vigas collar. El cemento utilizado contenía adiciones de ceniza volante y también se incorporó microsílice, teniendo las mezclas un revenimiento de 20 cm (8").

Grado 60: Resistencias de 60 MPa en 56 días, siendo utilizado en los niveles medios de las columnas, además de la cimentación de las torres en la zona de transición entre el grado 45 y el grado 80.

Grado 45: Resistencias de 45 MPa en 56 días, colocados en la cimentación dando un buen balance de resistencia y trabajabilidad para su colocación.

Grado 40: Resistencias de 40 MPa en 28 días, utilizado en los pisos superiores.

Grado 35: Resistencias de 35 MPa en 28 días, utilizados para llenar las losas compuestas de acero y concreto y se aprovechó la alta resistencia a corto tiempo para que los trabajadores pudieran entrar en el área.

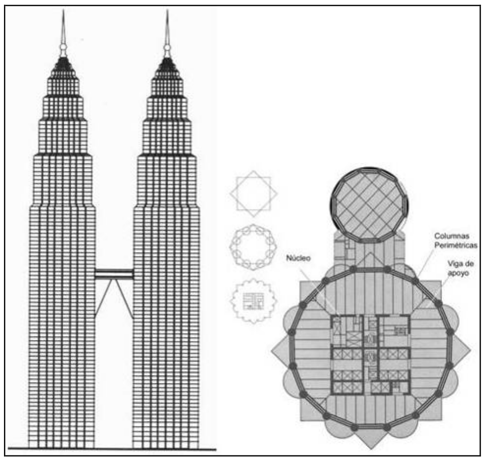

Figura 3. Esquema vertical y planta de las Torres Petronas.

(c) Edificio de almacenaje Nuclear Hanford, Washington.

Para este proyecto se necesitaba que el hormigón sea fácil de colocar debido a su forma arquitectónica como se puede observar en la figura 4, además tener un control de la temperatura del hormigón, altas resistencias tempranas para poder desencofrar y alta durabilidad. Para ello se utilizó una mezcla de 232 kg/cm3 cemento Portland tipo I, 36 kg/m3 de microsílice (11% del peso de los materiales cementantes), 0.37 de relación agua/materiales cementantes y revenimiento de 200mm. Con esta mezcla se obtuvieron 43MPa a los 28 días y 52MPa a los 90 días. La adición de microsílice se utilizó en las paredes y en el techo de las bóvedas de contención del proyecto[5].

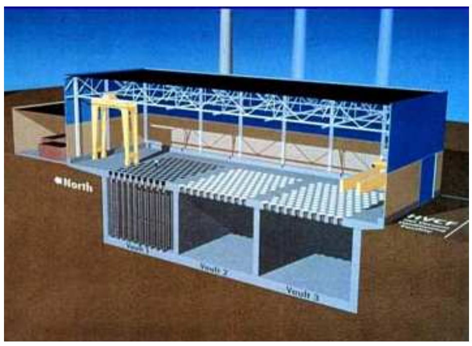

Figura 3. Esquema del edificio de almacenaje Hanford.

4. Ceniza de Cascarilla de Arroz para hormigones de Alto Desempeño

4.1. Definición de Cascarilla de Arroz.

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice, propiedades que le dan diferentes usos como combustible alternativos, sustituto de madera, abono de cultivos y es utilizado en el campo agrícola, de la construcción y como aislante térmico.

4.2. Propiedades Físicas de la Cascarilla de Arroz.

Su longitud varía entre 5 a 11 mm según la especie, es una estructura ondulada y apariencia superficial irregular, es altamente abrasivo, 6 en la escala de dureza de Mohs en estado natural. Su estructura presenta un volumen poroso del 54%, cavidades que permanecerán cerradas en tanto no se someta a un proceso de combustión. Su coeficiente de conductividad térmica (0.0330 W/m*k) le permite ser utilizado para aislante térmico

Una característica principal de la Cascarilla de Arroz es su poder calorífico como se puede observar en la tabla 2, ya que influenciará en la energía que gastaremos para la calcinación del mismo y la obtención de sílice, esta depende directamente de la humedad en el que se encuentre el material [6]

Tabla 2. Poder Calorífico Inferior de la Cascarilla de Arroz en función del contenido de humedad

Contenido de Humedad	Poder Calorífico Inferior (PCI) - kj/kg
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6413

4.3. Propiedades Químicas de la Cascarilla de Arroz.

Las propiedades químicas de la cascarilla de arroz dependen del tipo de arroz que proceda. En la Tabla 3 se muestran las características de la cascarilla de de arroz procedente de Daule [6].

Tabla 3. Poder Análisis Último de la Cascarilla de Arroz en Daule

Componente Químico	%
SiO_2	83.2
Al_2O_3	0.95
Fe_2O_3	1.05
CaO	1.02
MgO	1.03
K_2O	1.29
Na_2O	0.15
P_2O_5	0.40
SO_3	0.13
TiO_2	0.08
CL	0.07
Perdida	10.6
Total	99.97

4.4. Propiedades Físicas y Componentes Químicos de la Ceniza de Cascarilla de Arroz.

Para la producción de la CCA se debe tratar la cascarilla de arroz, ya que este debe ser calcinada a temperaturas adecuadas para que no se formen los cristales en forma desordenada, la temperatura de fusión de la cascarilla de arroz es de 500 a 700 grados centígrados

(a) Propiedades Físicas.

En la Tabla 4 se indican la característica principal de la ceniza de la cascarilla de arroz, estos resultados son de las tomas de Daule.

Tabla 4. Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz obtenida en Daule

Propiedades	Valor
Densidad (SSS) Kg/m_3	2265
Masa Unitaria Compacta. Kg/m_3	452
Masa Unitaria Suelta. Kg/m_3	181
Superficie Especifica m_2/Kg	2000

4.4. Análisis de la Obtención de Sílice en el Ecuador

El 35 % de la producción de cascarilla de arroz se emplea en la industria florícola y en los criaderos de animales y el resto se distribuye de la siguiente manera:

- 50% es quemada dentro de las plantas de pilado
- 15% es arrojada en los bordes de las carreteras
- 15% es quemada en terrenos fuera de las plantas de pilado
- 10% es quemada en los bordes de las carreteras
- 5% es arrojada en los ríos y esteros
- 5% es perdida por efectos del viento

Cada tonelada de arroz produce aproximadamente 200 kg de cascarilla que posteriormente origina 40 kg de ceniza que puede ser obtenida por combustión a campos abiertos o combustión controlada, entonces tendremos 784.320 Toneladas que producirán aproximadamente 31.372 Ton de cenizas de cascarilla de arroz.

Con esta producción de ceniza de cascarilla de arroz en el Ecuador pudiéramos evitar la contaminación de ríos o del medio ambiente de la misma manera, con la utilización de cemento teniendo hormigones con mayor resistencia y secciones menores en nuestras edificaciones [6].

4.4. Aplicación de Hormigón con sílice de la Ceniza de Cascarilla de Arroz

Esta aplicación es de un trabajo que se realizo Irán. El material Fino utilizado fue arena de rio con tamaño máximo de 4.75 mm, con un modulo de finura de 2.97, Gravedad Especifica 2,59 y con una absorción de 4.7%. El material grueso utilizado es grava de rio con tamaño máximos 12,5 mm, con gravedad especifica 2.71, con una absorción de 5.1%.

Se utiliza Cemento Portland Ordinario con una superficie específica de 3415 cm2/g y gravedad específica 3.15 gr/cm3. Se utilizara un Súper-Plastificante el que es utilizado para una reducción del 30% del agua. Adicionalmente se presenta la composición química de la cascarilla de arroz en la tabla 5.

Tabla 5. Composición química de la cascarilla de arroz

Propiedades	Valor
Densidad (SSS) Kg/m_3	2265
Masa Unitaria Compacta. Kg/m_3	452
Masa Unitaria Suelta. Kg/m_3	181
Superficie Especifica m_2/Kg	2000

Las principales características que se pudieron notar en estas pruebas es que con una relación agua/material cementicio de 0.40-0.35 y con adición de Ceniza de cascarilla de arroz por cemento en un 10 y 20 %, se puede notar que la resistencia a la compresión en edades iníciales es menor a la dosificación patrón, pero al pasar 60 días las resistencias de la dosificación patrón quedan con resistencias menores. La dosificación con 20% de cascarilla de arroz tiene un aumento significativo a la resistencia a la Compresión a los 180 días en un 15% aproximadamente, en las pruebas a la Flexión en un 16% y en su modulo de elasticidad un 4% a la dosificación patrón [4].

5. Conclusiones.

Se puede concluir que mejorando las tecnologías, en este caso uso de superplastificantes, en el uso del cemento portland ordinario agregando en este caso puzolana, humo de sílice o ceniza de cascarilla de arroz se pueden obtener incremento en la resistencia, menor relación agua- elementos cementicios, aumento en el modulo de elasticidad y mejor trabajabilidad. Esto nos da un hormigón que posee mayor durabilidad y menor costo.

6. Agradecimientos.

Al Ing. Jorge Flores Rada por el tiempo dedicado y sus importantes enseñanzas, a los Ing. José Campuzano y Xavier Arce que dieron sus criterios durante el proceso se enseñanza que nos ha servido durante el desarrollo de este trabajo.

7. Abreviaturas.

ACI	American Concrete Institute
(OH)2Ca	Hidróxido de Calcio
C_3S	Silicato tricalcico
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
SCH	Silico-calcáreos-hidratados
SiO_2	Dióxido de Sílice
CPP	Cemento portland puzolánico
SiO	Oxido de Sílice
Al_2O_3	Oxido de Aluminio
CaO	Oxido de Calcio
C	Carbono
MPa	Megapascales
CCA	Ceniza de cascarilla de arroz
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
N	Nitrógeno
S	Azufre
CL	Cloro
K_2O	Oxido de Potasio
Na_2O	Oxido de Sodio
MgO	Oxido de Magnesio
SO_4	Sulfatos
HCR	Hormigón compactado con rodillo
Al_2O_3	Oxido de Aluminio

8. Referencias.

[1] Becker E., "Cemento Portland Puzolánico, Propiedades y Recomendaciones de Uso", Loma Negra, Argentina, 2009, pag 1. Disponible en www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/CPP.pdf

[2] Gonzalez de la Cotera M.., "Cemento Portland Puzolánico, Tendencias Actuales en la fabricación y aplicación", ASOCEM, Perú, 2009, pag 1. Disponible en www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/cemento/adicionado/cementos_portland_MGC07.PDF

[3] Silica Fume user's manual. Tomado de la pagina de Construaprende http://foros.construaprende.com/concreto-de-alto-desempeno-hda-empleando-microsilice-vt6247.html?hilit=microsilice

[4] Ahmadi M., Alidoust O., Sadrinejad I., y Nayeri M."Development of mechanical Properties of self Compacting Concrete Contain Rice Husk Ash", Disponible en:http://www.waset.org/pwaset/v23/v23-92.pdf

[5] Silica Fume Asso[illegible] Disponible en http://www.silicafume.org/general-silicafume.html, http://www.silicafume.org/general-concrete.html

[6] Molina J. "Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz en hormigones compactado con Rodillo", Disponible en: http://www.cib.espol.edu.ec/bivir/tesis.asp?tco=2B425D585C565E4F4F4F4F4F4