



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Uso de sílice en hormigones de alto desempeño”

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Luis Alfredo Allauca Pincay

Hugo Enrique Amen Loor

Jessica Paola Lung Alvarez

GUAYAQUIL – ECUADOR

2009



AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios, ya que sin la ayuda de Él, nada de lo que hemos logrado hubiera sido posible.

A la ESPOL por habernos permitido ser parte de ella y de esa manera recibir nuestra formación académica.

A los ingenieros José Camposano, Jorge Flores y Xavier Arce, por su ayuda indispensable y desinteresada durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

El trabajo y lo que representa la elaboración de este documento no sería posible sin el ejemplo, soporte y respaldo de Dios y mis Padres, sin el apoyo incondicional de mis hermanas, y para Cristina aquella persona que no la tengo cerca mío pero siempre me alienta día a día. Mi dedicatoria va para todos ellos.

Luis Alfredo

A mis padres y hermanos, quienes fueron las personas que me ayudaron en todo momento e incondicionalmente durante el desarrollo de mi carrera. Dedico el fruto de este trabajo a ellos con mucho cariño.

Hugo Enrique

A mis padres, a mis hermanos y mis viejitos, mi fuerza motriz y apoyo durante todos mis años de estudios.

A mis amigos, los de hoy y los de siempre.

A Ricardo, aunque llegó recién a mi vida, ha sido un gran apoyo en el final de mi carrera.

Jessica Paola

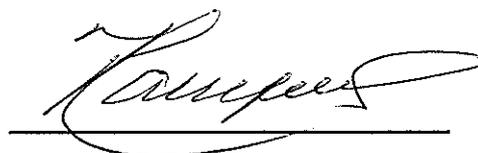
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Gastón Proaño

SUB-DECANO DE LA FICT

PRESIDENTE



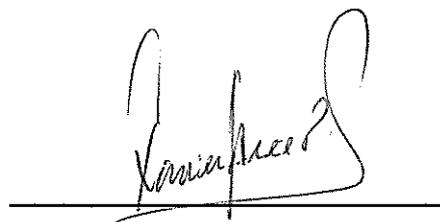
Ing. José Camposano

DIRECTOR DE SEMINARIO



Ing. Jorge Flores

VOCAL



Ing. Xavier Arce

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA



“La responsabilidad del contenido de esta Tesina de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la
ESPOL)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Allauca Pincay', written over a horizontal line.

Luis Allauca Pincay

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Amen Loor', written over a horizontal line.

Hugo Amen Loor

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jessica Lung Alvarez', written over a horizontal line.

Jessica Lung Alvarez

RESUMEN

En este trabajo se presenta una investigación al uso de adición de sílice en el cemento portland ordinario como uno de los pasos para obtener hormigones de alto desempeño. Se ha enfocado en el uso de puzolana, ceniza de cascarilla de arroz y humo de sílice que tiene como componente principal el dióxido de sílice Si_2O que reacciona con el clinker cuando se inicia la hidratación del cemento.

En primer lugar se hace referencia a todo lo relacionado con la puzolana. Desde su origen, propiedades durante y después del fraguado. Después se trata el tema de la microsílíce (o humo de sílice): definición, su obtención y las propiedades que brinda o incrementa al hormigón y unas aplicaciones reales de hormigón de alto desempeño con contenido de microsílíce.

Luego se 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 el ecuador, dando un mejor uso a la cascarilla de arroz y protegiendo nuestro medio ambiente, además las aplicaciones de este.

ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
$(\text{OH})_2\text{Ca}$	Hidróxido de Calcio
C_3S	Silicato tricálcico
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
SCH	Silico-calcáreos-hidratados
SiO_2	Dióxido de Sílice
CPP	Cemento portland puzolanico
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 ₂ O	Oxido de Sodio
MgO	Oxido de Magnesio
SO ₄	Sulfatos
HCR	Hormigón compactado con rodillo
Al ₂ O ₃	Oxido de Aluminio



REPUBLICA ESPAÑOLA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS	III
INDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	IV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	4
1. USO DE CEMENTO PUZOLÁNICO EN HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Definición del Cemento Portland Puzolánico.....	5
1.3 Reacciones químicas durante el proceso de hidratación.....	5
1.4 Propiedades del Hormigón utilizando Cemento Portland Puzolánico	8
1.4.1 Propiedades en estado fresco	8
1.4.2 Propiedades del hormigón en estado endurecido	11
CAPÍTULO 2.....	15
2. USO DE MICROSILICE EN HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO..	15
2.1 Definición y obtención de microsíllice.....	15
2.2 Propiedades del cemento con microsíllice	19
2.3 Aplicaciones de hormigón con microsíllice.	21
2.3.1 Aplicación en puentes.....	22
2.3.2 Edificios y otras estructuras.	25
2.3.3 Hormigón proyectado (shotcrete).....	30

CAPITULO 3.....	33
3. CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ PARA HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO	33
3.1 Definición de las Cascarilla de Arroz.....	33
3.2 Propiedades Físicas de la cascarilla de Arroz.	33
3.3 Propiedades Químicas de la Cascarilla de Arroz.....	35
3.4 Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA).....	36
3.4.1 Composición Mineral de la CCA Ceniza de Cascarilla de Arroz	36
3.4.2 Propiedades físicas de la CCA Ceniza de Cascarilla de Arroz..	37
3.5 Obtención de Sílice de la Cascarilla de Arroz en el Ecuador.....	38
3.5.1 Producción del Arroz en el Ecuador.....	38
3.5.2 Análisis de la Obtención del Sílice en el Ecuador	39
3.6 Aplicaciones de Hormigón con Sílice de la Ceniza de Cascarilla de Arroz	40
3.6.1 Hormigón Auto-Nivelantes	40
Conclusiones y Recomendaciones	44
Bibliografía	47



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LOJA

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Cambios en el contenido de $(OH)_2Ca$ durante la hidratación del CPP[2].	7
Figura 2.1. Horno de arco eléctrico.	16
Figura 2.2. Esquema del proceso de obtención de ferrosilicio en altos hornos.	17
Figura 2.3. Partículas de microsilíce, imagen a un aumento de 10000x.	18
Figura 2.4. Puente Confederación.....	23
Figura 2.5. Vista del Puente Ohio DOT	24
2.3.2 Edificios y otras estructuras.	25
Figura 2.6. Torres Petronas en Kuala Lumpur.....	26
Figura 2.7. Esquema vertical y planta típica de las torres Petronas	28
Figura 2.8 Construcción del almacenaje nuclear.....	29
Figura 2.9. Esquema del edificio de almacenaje de Hanford.....	30
Figura 3.1. Porcentaje de Producción de arroz en el Ecuador.....	38

INDICE DE TABLAS

Tabla I: Pruebas usadas para evaluar al hormigón en estado fresco [4]	10
Tabla II. Análisis químico de la microsílíce.	19
Tabla III Proporciones para la mezcla de los especímenes [20].....	31
Tabla IV Resultados de los ensayos [20].....	32
Tabla V. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad.....	34
Tabla VI. Análisis Último de la Cascarilla de arroz de Daule	35
Tabla VII. Composición Mineral de Ceniza en la Cascarilla de Arroz en Daule	36
TABLA VIII. Propiedades de la Ceniza de la cascarilla de arroz obtenida en Daule	37
TABLA IX. Granulometría de Agregados Finos y Grueso.....	41
TABLA X. Composición Química de la ceniza de la Cascarilla de Arroz	42



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.

Recordando los inicios del hormigón procesado, se puede decir que en los primeros años del siglo XX se obtuvo una resistencia de aproximadamente 14 MPa que llegando a los años 30 este valor fue el doble. De aquí en adelante fue ganado más interés por parte de los ingenieros en como 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.

Actualmente en los Estados Unidos ya se comercializa hormigón con una resistencia especificada en 120 MPa. o aún mayor, así como en la comunidad europea numerosos puentes y otras estructuras se diseñan con

hormigones de 60 MPa. y más teniendo como un ejemplo claro el canal de la mancha. También en Japón se construyen estructuras con resistencias especificadas a la compresión del orden de 80 MPa. o superior.

Estos avances han permitido la obtención de propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad superiores a las habitualmente usadas en hormigones convencionales, debido a la adición de minerales que reaccionan con el cemento optimizando el proceso de formación de cristales cuando inicia el fraguado.

Una de esos minerales es el silicio, que es encontrado de manera natural producto de las erupciones volcánicas (puzolana), por procesos industriales (humo de sílice) o de manera natural previo a un proceso industrial (ceniza de cascarilla de arroz), básicamente el compuesto que actúa en el proceso es el óxido de silicio que se encuentra en estos 3 casos y ha sido usado satisfactoriamente previo a las pruebas de calidad.

El contenido de este trabajo se desarrolló en cuatro capítulos: el primer capítulo describe el uso de cemento puzolánico para obtener un hormigón de alto desempeño, su química, ventajas y aplicaciones. El segundo capítulo se refiere al uso de microsílíce que se puede agregar al cemento y las propiedades que puede desarrollar el hormigón.

El tercer capítulo nos da a conocer las ventajas de un material como la cascarilla de arroz que puede ser usado como adición en hormigones de alto desempeño, de esta manera se utiliza materiales que son producto de desechos orgánicos que producen gran contaminación al medio ambiente, las ventajas y los usos de este en la industria de la construcción.



INSTITUTO
ESPECIAL

CAPÍTULO 1

1. USO DE CEMENTO PUZOLÁNICO EN HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

1.1 Antecedentes

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 [1] y [2].



INGENIEROS DE OBRAS DE CONSTRUCCIÓN
ESPEL

1.2 Definición del Cemento Portland Puzolánico

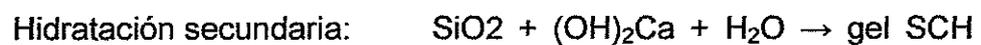
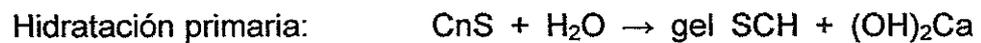
Cemento Portland puzolánico es el producto que se obtiene después de adicionar al cemento portland ordinario el material puzolánico que puede variar en un porcentaje entre el 15 al 50%.

Dicha unión puede efectuarse en el estado de clinker, para ser molidos conjuntamente, a la fineza adecuada o también directamente con el cemento, antes de encasarlo en la mezcladora[2]. El ACI 116R define la puzolana como: “material silíceo o silicoaluminoso, que en si mismo puede poseer un pequeño o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperatura normal formando compuestos con propiedades cementicias[3].

1.3 Reacciones químicas durante el proceso de hidratación

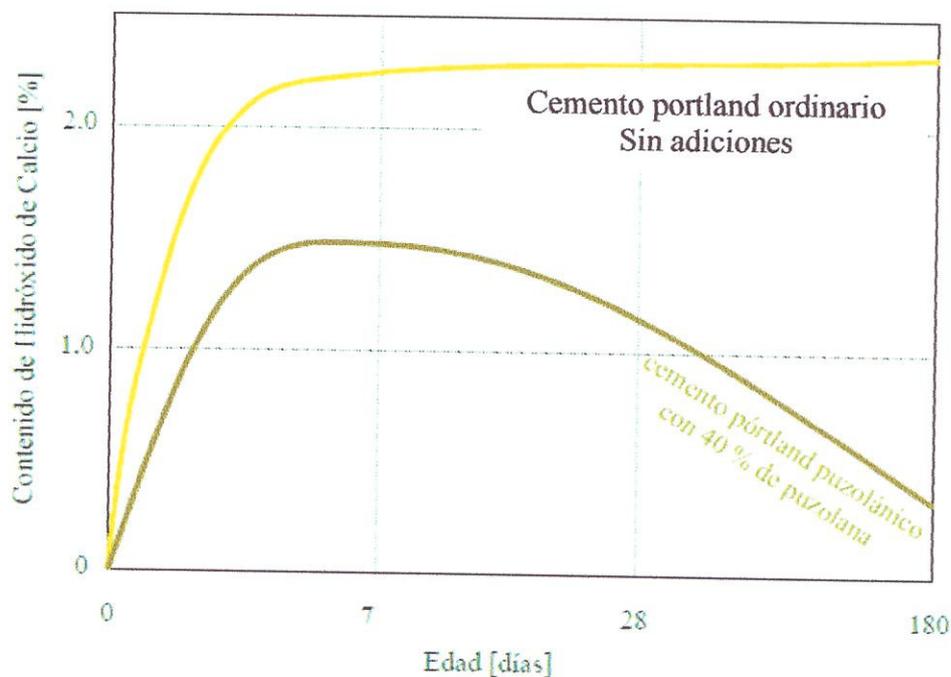
Las propiedades de las puzolanas (incluso las naturales) varían considerablemente, dependiendo de su origen. En la zona interandina de nuestro país existen yacimientos de puzolana natural proveniente de erupciones volcánicas.

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 (C_3S y C_2S) denominada primaria, resultando compuestos SCH (sílico-calcáreos-hidratados):



El SiO_2 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 (Ver Figura 1.1).

FIGURA 1.1: Cambios en el contenido de $(OH)_2Ca$ durante la hidratación del CPP[2].



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 [2].

1.4 Propiedades del Hormigón utilizando Cemento Portland Puzolánico

1.4.1 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 ($400 \text{ m}^2/\text{kg} < \text{Blaine} < 500 \text{ m}^2/\text{kg}$) es más fino que el cemento portland ordinario ($300 \text{ m}^2/\text{kg} < \text{Blaine} < 350 \text{ m}^2/\text{kg}$), debido a esto se requiere mayor demanda de agua para el hormigón.

La experiencia indica que utilizando similares materiales componentes y proporciones, para obtener el mismo asentamiento se necesita incrementar el contenido de agua de la mezcla en alrededor de 12 a 20 litros/ m^3 cuando

se utiliza cemento portland puzolánico respecto al cemento portland ordinario. 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 [2].

1.4.1.1 Métodos de evaluación del hormigón con cemento puzolanico en estado fresco



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Existen parámetros que pueden ser determinados para describir el flujo del concreto en estado fresco, éstos son el esfuerzo de fluencia y la viscosidad.

Las pruebas usualmente aplican 2 métodos:

- Por gravedad: El esfuerzo aplicado es por el peso propio del material.
- Por Vibración: El esfuerzo es inducido por la dinámica de la prueba, en estos métodos, el esfuerzo de fluencia y el flujo del hormigón es

muy diferente al observado cuando no se aplica vibración.

En la Tabla 1 se encuentran pruebas más conocidas para evaluar al hormigón, estas pruebas intentan simular el comportamiento del concreto de obra en laboratorio (4)

TABLA I: Pruebas usadas para evaluar al hormigón en estado fresco [4]

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

1.4.2 Propiedades del hormigón 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 [5].

1.4.2.1 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[3].

1.4.2.2 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.

1.4.2.3 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 iniciales 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.

La Permeabilidad depende directamente de la calidad de los agregados y la relación agua

cemento y la pasta que se forma en la hidratación del concreto. Un hormigón con adiciones puzolánicas resulta ser mas impermeable debido a que existe mayor reacción produciendo SCH rellenando los microporos que se formaría con un cemento portland normal[2].



BIBLIOTECA NCI
ESPOL



CAPÍTULO 2

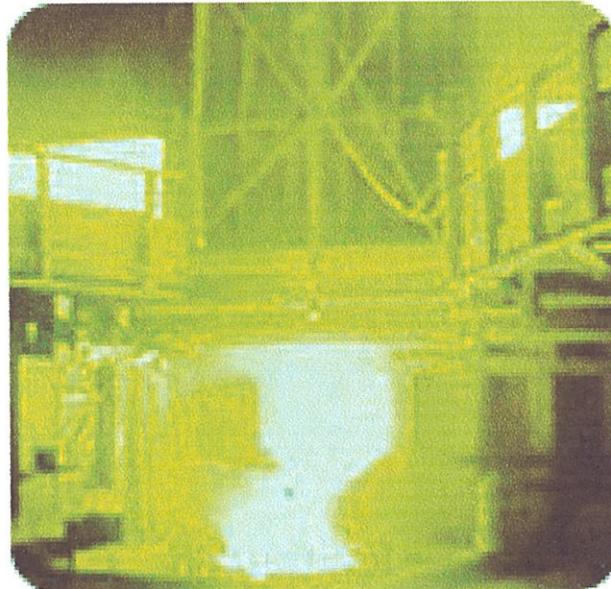
2. USO DE MICROSÍLICE EN HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

2.1 Definición y obtención de microsílíce

La microsílíce (o humo de sílice) suele definirse como una “súper puzolana” por las propiedades que proporciona al cemento. [7] 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 microsílíce”*¹. 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 2.1) a temperaturas superiores a 2000°C. [6]

¹ ACI 116R

Figura 2.1. Horno de arco eléctrico.



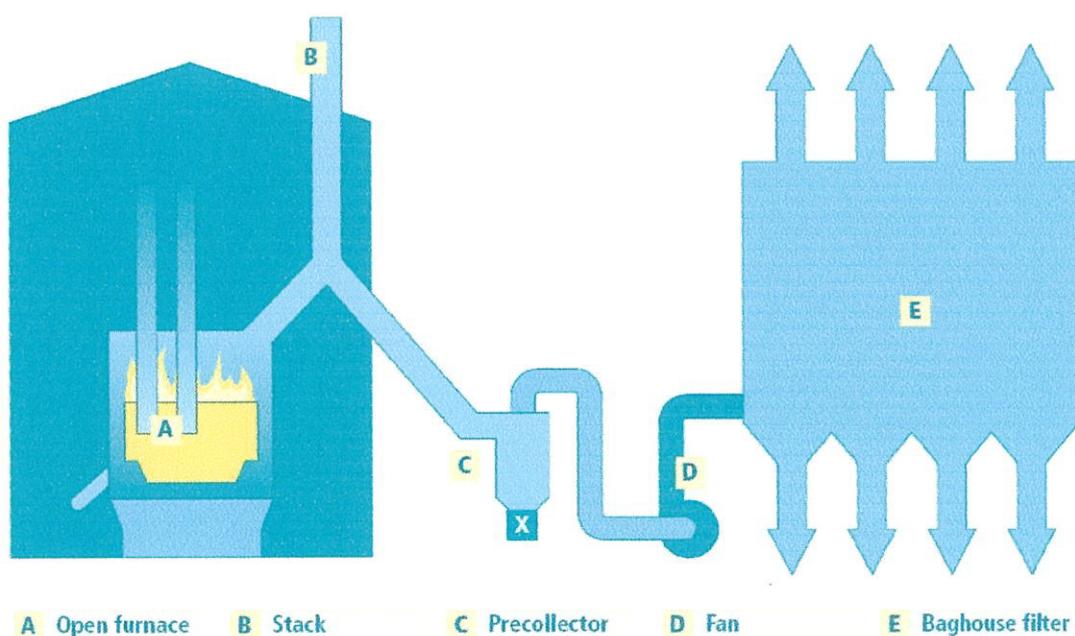
Fuente: Silica Fume Association. [19]

Ésta se forma cuando el gas SiO producido al reducirse el cuarzo, se mezcla con el oxígeno en la parte superior del horno; y es en este punto donde el SiO se oxida a SiO₂, condensándose en las partículas esféricas puras de micro sílice que forman la mayor parte de los vapores o humo del horno. [6]

Estos vapores son conducidos a través de tuberías de enfriamiento y después son llevados a filtros bolsa donde son recolectados. La calidad de la microsíllice depende de la calidad de las materias primas del proceso y también depende de los hornos. Las partículas tienen un tamaño promedio inferior a 0,5 micras, lo cual es aproximadamente 100 veces más pequeño que

una partícula de cemento [6]. En la figura 2.2 se presenta un esquema del proceso de altos hornos y es en el “baghouse” donde se recoge la microsílíce; y en la Figura 2.3 se muestra una imagen con 10000x de aumento de las partículas de microsílíce.

Figura 2.2. Esquema del proceso de obtención de ferrosilicio en altos hornos.

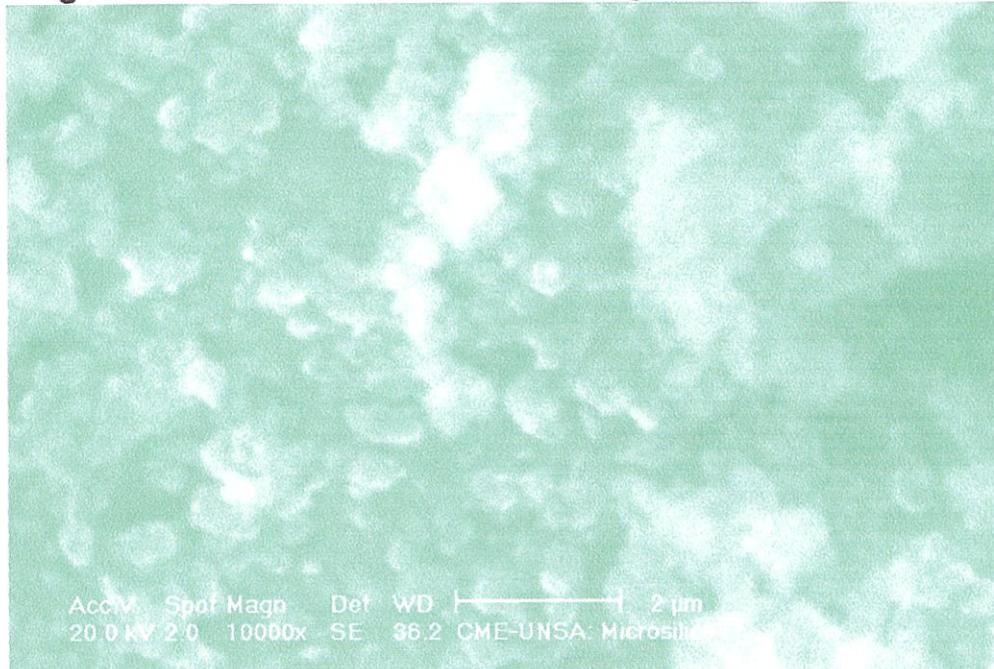


Fuente: Silica Fume User's Manual. [8]



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Figura 2.3. Partículas de microsílíce, imagen a un aumento de 10000x.



Fuente: Concretos de Alto Desempeño, HIGH PERFORMANCE CONCRETE (HPC) [4]

La microsílíce 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 microsílíce será más oscura.

Se puede obtener valores de densidad específica de 2.2 pero también está sujeto a variaciones dependiendo de los componentes, por ejemplo será menos densa a mayor contenido de carbón.



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

En la Tabla II se muestra, a manera de informativo, un análisis de la composición química de la microsílíce. Nótese que en su mayoría está compuesto de dióxido de silicio (más del 85%). [9]

Tabla II. Análisis químico de la microsílíce.

SiO ₂	> 85%
CaO	<1,0 %
Al ₂ O ₃	< 1,0 %
C	<4,0 %.

2.2 Propiedades del cemento con microsílíce

La microsílíce, 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. [7]

En cuanto a la resistencia del hormigón, se han determinado aumentos significativos desde 20 a 50% [6], obteniendo mayores beneficios con el uso de súper plastificantes. Al hacer uso de éstos los contenidos normales de microsilíce varían entre el 5% y el 15% del peso del cemento.

Si bien es cierto se necesita de aditivos súper plastificantes para que la microsilíce reaccione mejor con el cemento, el uso de éstos puede aumentar la tendencia de fisuras por contracción plástica, siendo necesario cubrir la superficie expuesta del hormigón para evitar pérdida de agua por evaporación. [7]

Otra de las propiedades que brinda el uso de microsilíce como adición es el incremento de la resistencia al ataque de sulfatos y cloruros, reduce casi hasta eliminar una probable reacción álcali sílice [19]. 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 [7]

2.3 Aplicaciones de hormigón con microsílíce.

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. [4]

Puentes, altos edificios (rascacielos) o túneles, son las estructuras que por su ubicación, solicitud de carga y/o altas ataques de agentes ambientales se construyen con los “súper hormigones”. En el caso de puentes, este tipo de hormigón se lo prefiere por su durabilidad en caso de climas extremos y ataques abrasivos. En caso de edificios lo que más llama la atención es la posibilidad de conseguir miembros más esbeltos, conexiones fáciles y simplicidad constructiva. En ambos casos se aplica además el requerimiento de esteticidad, es decir una estructura estéticamente agradable sin dejar de ser funcional.



2.3.1 Aplicación en puentes.

“El uso de hormigones de altos esfuerzos en la fabricación y construcción de vigas de hormigón pretensado puede resultar en diseños más ligeros, con correspondientes ventajas económicas, permitiendo longitudes de palmo más largas e incrementa espaciamientos de vigas para la forma estándar.”²

El uso de microsílíce como adición en la preparación de los hormigones para la construcción de puentes se traduce en el incremento de la resistencia al ataque del ambiente marino, altas resistencias iniciales y la fácil y rápida puesta en obra del mismo. Aquí un par de ejemplos:



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

² B.W. Russell, PCI Journal, Vol. 39, No 4, Julio – Agosto, 1994, pp. 76-89.

➤ **Puente Confederación, Isla Príncipe Edward, Canadá [4]**

Figura 2.4. Puente Confederación



Fuente: Concretos de Alto Desempeño, HIGH PERFORMANCE CONCRETE (HPC)

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 microsílíce en el cemento lo que permitió alcanzar resistencias de 55MPa a los 28 días.

➤ **Puente Ohio DOT [19]**

Figura 2.5. Vista del Puente Ohio DOT



Fuente: Silica Fume User's Manual [8]

Los requerimientos en el recubrimiento de la cubierta de este puente fueron: resistencia a la penetración de los iones cloruro, y 31MPa a los 28 días.

La mezcla de hormigón consistía en 415 kg/m³ de cemento Tipo I y 41.5 kg/m³ de microsílíce (10% del contenido de cemento) con una relación agua cemento de 0.36 y revenimiento de 100-200mm. El esfuerzo a la compresión de esta mezcla, después de los ensayos, era de 48 MPa.

2.3.2 Edificios y otras estructuras.

En lo referente a edificios, la propiedad que mas resalta en estos casos es las altas resistencias iniciales y el incremento a la resistencia a los ataques químicos y ambientales, lo cual se traduce en una mayor protección a la armadura manteniendo asi la unión entre hierro-cemento.

➤ **Las Torres Petronas, Kuala Lumpur. [4]**

Figura 2.6. Torres Petronas en Kuala Lumpur



Fuente: Concretos de Alto Desempeño, HIGH PERFORMANCE CONCRETE (HPC)

Estas torres fueron terminadas en el año 1988. Tienen 452 m. de altura repartidos en 88 pisos. 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 microsílíce, teniendo las mezclas un revenimiento de 20 cm (8").

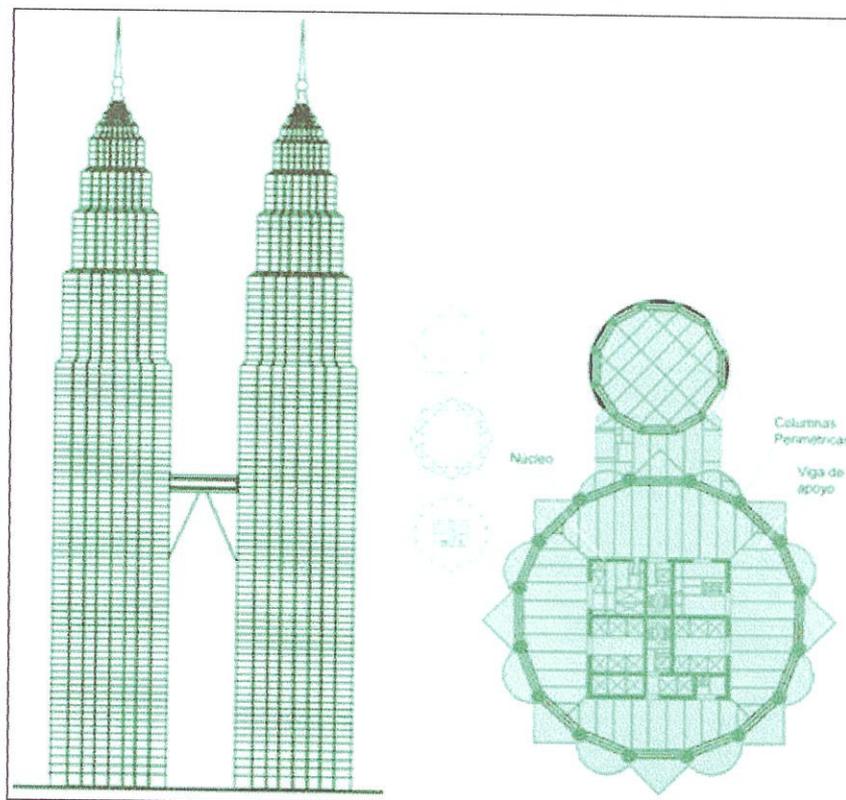
Grado 60: Resistencias de 60 MPa en 56 días, siendo utilizado en los niveles medios de las columnas, además de la cimentación de las torres en la zona de transición entre el grado 45 y el grado 80.

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 2.7. Esquema vertical y planta típica de las torres Petronas



Fuente: Universidad Nacional de Colombia [15]

➤ Edificio de almacenaje en el sitio Nuclear Hanford, Washington. [19]

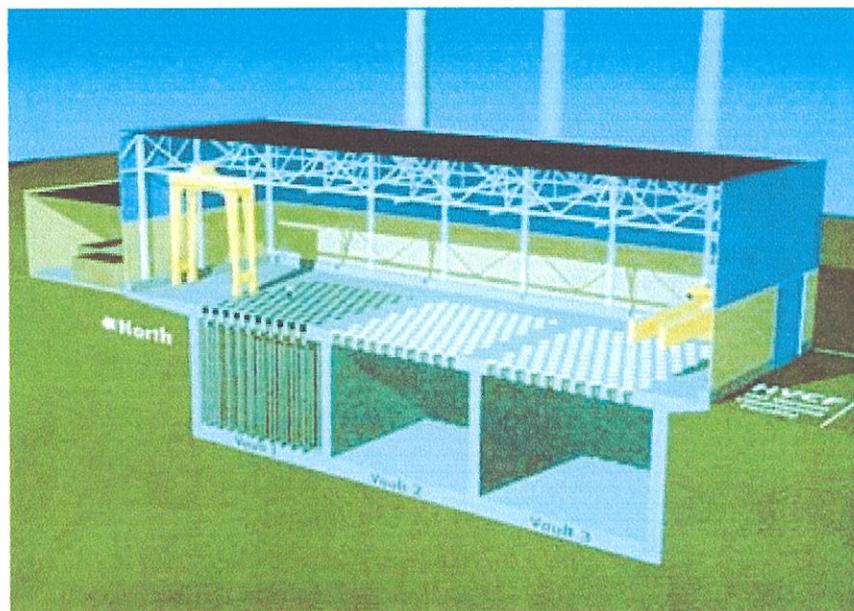
Figura 2.8 Construcción del almacenaje nuclear



Fuente: Silica Fume Association. [19]

Para este proyecto se necesitaba que el hormigón sea fácil de colocar, 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 microsílíce (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 microsílíce se utilizó en las paredes y en el techo de las bóvedas de contención del proyecto. En la Figura 2.9 se muestra un esquema del proyecto.

Figura 2.9. Esquema del edificio de almacenaje de Hanford



Fuente: Silica Fume Association. [19]

2.3.3 Hormigón proyectado (shotcrete)

En este tipo de hormigones, las ventajas que presenta el uso de microsílíce son: Disminuciones en el rebote al ser proyectado, lo cual ayuda a lograr mayor economía disminuyendo el desperdicio; aumento de la cohesión, con lo cual se logra mas capas con menos aplicaciones; además de la ventaja de reducción del sangrado. Todo esto en el hormigón fresco. [20]

ESPOL
BIBLIOTECA FICIT



En el hormigón endurecido incrementa la densidad, las resistencias a la compresión, la resistencia a los sulfatos y eso significa una mayor durabilidad.

Es por esto que si se desea utilizar el hormigón proyectado como medida de reforzamiento de estructuras, o para los arcos de túneles o minas, es una buena opción considerar el uso de microsílíce.

➤ **Mina Proaño, Zacatecas, México.[20]**

En esta mina era necesario evitar derrumbes consolidando la roca además de protegerla del intemperismo, sellar algunas filtraciones con el fin de lograr mayor seguridad laboral en los trabajos de minería.

Para esto se realizó un diseño para 250 kg/cm^2 (25 MPa aprox.) con adición de microsílíce y otro sin la adición. La dosificación se muestra en la Tabla IV:

Tabla III Proporciones para la mezcla de los especímenes [20]

Materiales	Sin microsílíce	Con microsílíce
Cemento Tipo I (kg/cm^3)	400	400
Microsílíce (kg/cm^3)	---	40

Materiales	Sin microsílíce	Con microsílíce
Grava de 3/8" (kg/cm ³)	640	640
Arena (kg/cm ³)	969	969
Agua (kg/cm ³)	180	180
Acelerante	3%	3%
Fibra (kg)	20	20

En los ensayos realizados a cubos de 5 x 5 cm que se extrajeron luego de proyectar el hormigón en una charola son los que se muestran en la Tabla V:

Tabla IV Resultados de los ensayos [20]

Datos	Sin microsílíce		Con microsílíce	
Peso (gr)	284	282	293	301
Área (cm ²)	27,56	27,04	27,56	27,04
Carga (kg)	9.650	11.350	17.250	15.000
Esfuerzo (kg/cm ²)	350	420	626	555
Esfuerzo promedio (kg/cm ²)	385		591	

Comprobando así que el adicionar microsílíce da un incremento en la resistencia del 53%.

CAPITULO 3

3. CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ PARA HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

3.1 Definición de las 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.

[10]

3.2 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. [11]

Una característica principal de la CA es su poder calorífico, 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 (ver Tabla VI). [12]

Tabla V. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad.

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

3.3 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 VII se muestran las características de la cascarilla de de arroz procedente de Daule.[17]

TABLA VI. ANÁLISIS ÚLTIMO DE LA CASCARILLA DE ARROZ DE DAULE

Componente Químico	%
SiO ₂	83.2
Al ₂ O ₃	0.95
Fe ₂ O ₃	1.05
CaO	1.02
MgO	1.03
K ₂ O	1.29
Na ₂ O	0.15
P ₂ O ₅	0.40
SO ₃	0.13
TiO ₂	0.08
CL	0.07
Perdida	10.6
Total	99.97

3.4 Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA)

Para la producción de la CCA se debe tratar la cascarilla de arroz, ya que este debe ser calcinado 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. [16]

3.4.1 Composición Mineral de la CCA Ceniza de Cascarilla de Arroz

Las propiedades minerales de la cascarilla de arroz después de ser calcinado son las indicadas en la tabla VIII.

[17]

TABLA VII. Composición Mineral de Ceniza en la Cascarilla de Arroz en Daule

Componente Químico	Ceniza de Cascarilla de Arroz
SiO ₂	94.1
Al ₂ O ₃	0.12
Fe ₂ O ₃	0.30
CaO	0.55
MgO	0.95
K ₂ O	2.10
Na ₂ O	0.11
P ₂ O ₅	0.41
SO ₃	0.06

Componente Químico	Ceniza de Cascarilla de Arroz
TiO ₂	0.05
CL	0.05
Perdida	1.1
Total	99.9

3.4.2 Propiedades físicas de la CCA Ceniza de Cascarilla de Arroz

En la Tabla IX se indican la característica principal de la ceniza de la cascarilla de arroz, estos resultados son de las tomas de Daule [16]

TABLA VIII. Propiedades de la Ceniza de la 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

3.5 Obtención de Sílice de la Cascarilla de Arroz en el Ecuador

3.5.1 Producción del Arroz en el Ecuador

La producción en el Ecuador (Figura 3.1) en el año 2007 fue de 1.371.189 Toneladas a nivel nacional donde el 55% (754.153 Toneladas) corresponde a Guayas, el 33% (452.492 Toneladas) corresponde a la provincia de Los Ríos.

Figura 3.1. Porcentaje de Producción de arroz en el Ecuador



Fuente: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable [13]

3.5.2 Análisis de la Obtención del Silice 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 [13]:

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 [14], 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.

3.6 Aplicaciones de Hormigón con Sílice de la Ceniza de Cascarilla de Arroz

3.6.1 Hormigón Auto-Nivelantes

3.6.1.1 Agregados

El material Fino utilizado fue arena de río 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%, con una granulometría como lo indica la tabla X.[18].

El material grueso utilizado es grava de río con tamaño máximos 12,5 mm, con gravedad especifica

2.71, con una absorción de 5.1%, con una granulometría como indica la VIII[18]

3.6.1.2 Cemento Portland

Se utiliza Cemento Portland Ordinario con una superficie específica de $3415 \text{ cm}^2/\text{g}$ y gravedad específica 3.15 gr/cm^3 .

TABLA IX. Granulometría de Agregados Finos y Grueso

Tamiz	Porcentaje de Pasante%	
	Agregado Fino	Agregado Grueso
1/2in	100	100
3/8in	100	51.2
#4	100	0.9
#8	81.2	-
#16	60.3	-
#30	38.7	-
#50	19.2	-
#100	3.7	-

3.6.1.3 Ceniza de Cascara de arroz

Las Propiedades químicas de la ceniza de la cascarilla de arroz son indicas en la tabla XI.[18]

TABLA X. Composición Química de la ceniza de la Cascarilla de Arroz

Componente Químico	Ceniza de Cascarilla de Arroz
SiO ₂	91.2
Al ₂ O ₃	0.94
Fe ₂ O ₃	0.37
CaO	2.15
MgO	0.88
K ₂ O	2.10

3.6.1.1 Aditivos

Se utilizara un Súper-Plastificante el que es utilizado para una reducción del 30% del agua

3.6.1.2 Análisis de Resultados

Con los resultados de las dosificaciones SCC como indica el apéndice A, se realizaron 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 observar los resultados de la resistencia a la compresión, (Apéndice A), se puede notar que la resistencia a la compresión en edades iniciales 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 módulo de elasticidad un 4% a la dosificación patrón

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso en la actualidad de adiciones que contengan dióxido de silicio han ayudado a optimizar el proceso de formación de cristales cuando inicia la etapa del fraguado, uno de ellos es la puzolana que en nuestro país se la encuentra de manera abundante ya que su origen proviene de procesos volcánicos. Se obtiene mayores resistencias a largo plazo, mejoras en la calidad de la pasta, disminución de la relación agua materiales cementicios. Esto hace que sea una excelente alternativa de diseño y constructiva donde por lo general se recomienda que el hormigón tenga durabilidad y que las resistencias de diseño a la compresión sean no menores a 56 días para aprovechar las características de este hormigón.

Una de las medidas más recomendables para lograr el mayor desempeño del hormigón es utilizar adiciones. Una de ellas, la microsílíce (humo de sílice), incrementa el desarrollo de resistencias tempranas tanto a solicitudes de carga como a agentes externos (hielo – deshielo, abrasión, etc) y por ello se la ha aplicado en estructuras de gran importancia. Si bien es cierto es uso de la microsílíce en el cemento mejora sobremanera la resistencia en el hormigón y que se usa súper-plastificantes para incrementarla aun mas, se

deben considerar medidas para evitar las fisuras por contracción plástica que el uso de estos aditivos conlleva.

En la provincia de Guayas y los Ríos se produce el 55% y 33% de la producción nacional de la cosecha de arroz dando aproximadamente 754.153 y 452.492 toneladas de arroz respectivamente, El 65% de la cascarilla de arroz de la producción nacional es desperdiciadas, siendo un foco de contaminación para el medio ambiente, el cual puede ser utilizado para mejorar los hormigones, se pudo notar que la resistencia a la compresión en edades iniciales es menor a la dosificación patrón, pero al pasar los 180 días la dosificación con 20% de cascarilla de arroz tiene un aumento significativo a la resistencia a la Compresión 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.

1000
1000
1000

APENDICE A

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wikipedia, "Puzolana", 2009, disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Puzolana>
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] Portugal P., "Concretos de Alto Desempeño", Francia, 2009. Disponible en <http://www.concrete.0catch.com/>
- [5] Corallo P, Fabra C., "Hormigón de Alto Desempeño, Características y parámetros de diseño con distintos tipos de cemento y aditivos químicos", Loma Negra, Argentina, 2009. Disponible en www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/had.pdf
- [6] Micro sílice: producción y uso. Disponible en http://www.quiminet.com.mx/ar4/ar_%2586%251D%25FF%25D3%25C0W%2597%2524.htm

http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-22781.pdf

- [18] 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>

- [19] Silica Fume Association. Disponible en

<http://www.silicafume.org/general-silicafume.html>,

<http://www.silicafume.org/general-concrete.html>

- [20] Bracamontes J. "Nuevos horizontes para el Concreto Lanzado" Revista del Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento, Abril 1998.

Disponible en: <http://www.imcyc.com/revista/1998/abril/nuevos.htm>
