

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo
parcial del cemento en la fabricación de hormigones
convencionales en el Ecuador**

Proyecto de Investigación

Doménica Andrea Montero Trujillo

INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 18 de mayo de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE APROBACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo parcial
del cemento en la fabricación de hormigones convencionales
en el Ecuador**

Doménica Andrea Montero Trujillo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico Fabricio Yépez, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 18 de mayo de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y Apellidos: Doménica Andrea Montero Trujillo

Código: 00112030

Cédula de Identidad: 171998277-7

Lugar y Fecha: Quito, 18 mayo de 2017

RESUMEN

Este proyecto parte de la necesidad de reducir los costos en la fabricación de un hormigón convencional. Tiene como objetivo desarrollar una aplicación para un residuo agroindustrial como lo es la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) resultante del proceso de combustión que genera energía eléctrica para una industria arrocera, en la ciudad de Durán, Ecuador. La ceniza resultante de dicho proceso presenta un porcentaje alto de sílice reactiva haciéndolo apto para su utilización como adición. Este residuo se incorporó en mezclas de hormigón con el fin de estudiar su efecto como puzolana en la sustitución parcial de cemento Tipo GU, en la fabricación de hormigón estructural de mediana resistencia. Se elaboraron cinco diseños de mezclas usando distintos porcentajes de CCA como reemplazo de cemento en la dosificación. Adicionalmente, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión de cilindros a los 28 días de curado. Finalmente se determinó el porcentaje de CCA más óptimo para lograr las mejores prestaciones en cuanto a trabajabilidad de la mezcla y resistencia final.

Palabras Claves: Ceniza de cascarilla de arroz (CCA); Sílice; Puzolana; Cementante; Hormigón estructural; Resistencia a compresión.

ABSTRACT

This project is based on the need to reduce costs in the manufacture of conventional concrete. It aims to develop an application for an agro-industrial residue such as rice husk ash (CCA) resulting from the combustion process that generates electric energy for a rice industry in the city of Durán, Ecuador. The resulting ash of this process shows a high percentage of reactive silica making it suitable for use as addition. This residue was incorporated in concrete mixtures in order to study its effect as pozzolan in the partial substitution of Type GU cement in the manufacture of medium strength structural concrete. Five mix designs were made using different percentages of CCA as a cement replacement in the dosage. In addition, tests of resistance to compression of cylinders were carried out at 28 days of curing. Finally, the percentage of CCA was optimized to achieve the best performance in terms of workability of the mixture and final strength.

Key Words: Rice husk ash (CCA); Silica content; Pozzolan; Cementitious properties; Structural concrete; Compression strength.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	Error! Bookmark not defined.
ANTECEDENTES	12
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
DESARROLLO DEL TEMA	16
- ASTM C39-14: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens	16
- ASTM C127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.	17
- ASTM C33-13: Standard Specification for Concrete Aggregates.	17
- ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.	17
- ASTM C192-13: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.	17
- ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009).....	18
- ASTM C143-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete	19
- ASTM C350-14: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.	19
- ASTM C192-13: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).	19
Materiales	19
Agregados	19
Cementantes	25
Ceniza de cascarilla de arroz (CCA).....	26
Ensayo en cubos de mortero de 50x50 mm.....	31
Diseño y proporcionamiento de las mezclas	33
Elaboración de especímenes.....	34
Ensayos hormigón fresco.....	36

Determinación de la resistencia a la compresión	36
DISCUSIÓN Y RESULTADOS	39
 Ensayo a los 7 días.....	40
 Ensayo a los 14 días.....	40
 Ensayo a los 28 días.....	41
 Trabajabilidad del hormigón.....	43
 La cascarilla de arroz y los nuevos materiales	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificación para los moldes de cilindros de hormigón. (Fuente: ASTM C39, 2004).....	16
Tabla 2: Especificación para la tolerancia de ensayo de cilindros de hormigón. (Fuente: ASTM C39, 2004)	16
Tabla 3: Especificación para método de consolidación y número de capas. (Fuente: ASTM, 2007)	18
Tabla 4: Especificación para diámetro de varilla y número de golpes para el método de varillado. (Fuente: ASTM, 2007)	18
Tabla 5: Distribución granulométrica Piedra 57	20
Tabla 6: Distribución granulométrica Arena	21
Tabla 7: Distribución granulométrica Mezcla de hormigón	23
Tabla 8: Valores de densidad y porcentaje de absorción	24
Tabla 9: Propiedades físicas Cemento Holcim GU	25
Tabla 10: Distribución granulométrica Ceniza de cascarilla de arroz	28
Tabla 11: Composición química de la CCA	31
Tabla 12: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cubos de mortero a los 21 días según ASTM C192.....	32
Tabla 13: Nomenclatura de los diseños de hormigón	34
Tabla 14: Proporciones por peso (kg) para 1 m ³ de hormigón.....	34
Tabla 15: Ensayos en hormigón fresco (asentamiento según la ASTM C143 y densidad según la ASTM C138)	36
Tabla 16: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los 7 días según ASTM C39	37
Tabla 17: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los 14 días según ASTM C39	38
Tabla 18: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los 28 días según ASTM C39	38
Tabla 19: Descripción de trabajabilidad y magnitud de revenimiento (Neville)	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2015	10
Figura 2: Cascarilla de arroz calcinada	11
Figura 3: Curva granulométrica Piedra 57	21
Figura 4: Curva granulométrica Arena	22
Figura 5: Curva granulométrica Mezcla de hormigón	23
Figura 6: Cáscara de arroz	
Figura 7: Ceniza de cáscara de arroz	27
Figura 8: Curva granulométrica Ceniza de cascarilla de arroz	29
Figura 9: Molino de bolas	30
Figura 10: Ceniza de cascarilla de arroz triturada	30
Figura 11: Cubos de mortero de 50x50mm	32
Figura 12: Mezcladora	35
Figura 13: Elaboración de cilindros de hormigón con %CCA	35
Figura 14: Cilindros en tanque de curado a $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	36
Figura 15: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de 100 x 200 mm de acuerdo a ASTM C39	37
Figura 16: Resistencia a la compresión de los cilindros con CCA sustituyendo al cemento en diferentes porcentajes.	39

INTRODUCCIÓN

La cascarilla de arroz es un material de desecho agrícola que constituye alrededor del 20% de la producción mundial de arroz. Este producto de consumo masivo se aproximó a los 750 millones de toneladas en el año 2014, siendo la cascarilla de arroz el mayor residuo resultante de la producción agrícola de granos y su disposición final es uno de los mayores problemas existentes en los países productores de arroz como el Ecuador (FAO, 2014).

Según estudios recientes, en el país se producen cerca de 1'600.000 toneladas de arroz al año, como se observa en la Figura 1, y como consecuencia de esta producción cerca de 320.000 toneladas de cascarilla de arroz como residuo, las cuales mediante un proceso de quema controlada dan origen a cerca de 80.000 toneladas de ceniza de cascarilla de arroz (en adelante denominada CCA) con un alto contenido de sílice, convirtiéndose así, en una alternativa potencial para su uso en la industria de la construcción gracias a sus características puzolánicas y su alta disponibilidad alrededor del mundo (Pedro Matthey, 2015)

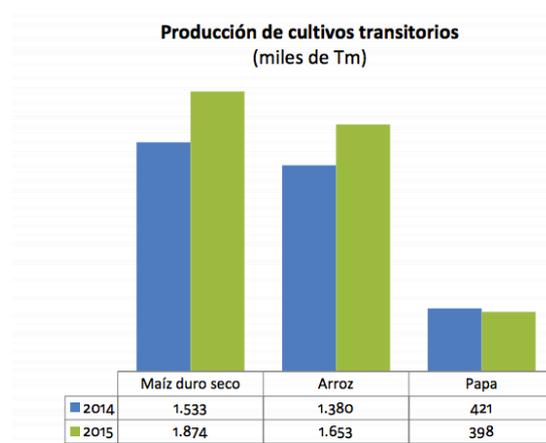


Figura 1: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2015

La CCA obtenida de la cascarilla de arroz bajo condiciones de combustión controladas se ha empleado como material para obtener sílice y poder ser utilizada

como puzolana, la cual actúa como fuente de fases mineralógicas como los silicatos dicálcicos y tricálcicos (C_2S y C_3S) del cemento (Mafla, Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción, 2009). La sílice de la CCA reacciona con la cal, dando lugar esta reacción a la formación de cristales de silicato de calcio hidratado (CHS), que contribuyen a la generación de resistencias mecánicas en los concretos adicionados, es por esta razón, que este material es considerado como una opción viable para la sustitución parcial del cemento en elementos estructurales de hormigón, tanto desde el punto de vista mecánico como económico, debido a que este residuo no representa ningún valor comercial a partir de su calcinación en donde se aprovecha el calor generado durante su proceso de combustión para generar energía eléctrica.

El objetivo de esta investigación es utilizar materiales de desechos industriales agrícolas, como la ceniza de cascarilla de arroz, como sustituyente en proporciones determinadas en el cemento para que de esta manera los costos de producción de hormigón convencional sean más económicos, sin comprometer ninguna de las características físicas y mecánicas del mismo.



Figura 2: Cascarilla de arroz calcinada CCA

ANTECEDENTES

La ciencia avanza generando nuevos conocimientos e introduciendo nuevas tecnologías aplicadas a los procesos de obtención de productos que muestren mayor eficiencia y menor costo, considerando también la protección y preservación del medio ambiente. De esta forma, el campo del desarrollo de hormigón sigue evolucionando y, hoy en día, se realizan cantidad de pruebas e investigaciones acerca de la composición del hormigón introduciendo nuevos materiales que puedan mejorar sus características y desempeño en la construcción.

En la actualidad, la cascarilla de arroz ha sido utilizada para diferentes aplicaciones debido a las propiedades físicas y químicas de la cáscara calcinada, tales como contenido de ceniza, contenido de sílice, etc. El uso directo de la cáscara de arroz como combustible se ha visto en las centrales eléctricas. Aparte de su uso como combustible, este material se utiliza como fuente de silicio de donde se obtiene dióxido de silicio para la síntesis y desarrollo de nuevos compuestos y adiciones para el hormigón (Ajay Kumar, 2012).

La ceniza de cascarilla de arroz es un material que no posee alto poder cementante en sí mismo. Sin embargo, por su carácter puzolánico al estar en presencia de agua genera compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos, dando propiedades cementantes a un conglomerante no hidráulico. La reactividad que posee esta puzolana es atribuida a la sílice que contiene, formando compuestos mineralógicos silícicos (Mafla, Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción, 2009).

Se ha llevado a cabo una extensa investigación sobre la aplicación de la ceniza de cascarilla de arroz como aditivo mineral para mejorar el rendimiento del hormigón. Informes realizados indicaron a la CCA como una puzolana altamente reactiva (L.M. Ahumada, 2006). Además, se ha demostrado que el tamaño de partícula de la ceniza de la cascarilla de arroz juega un papel importante en la velocidad de reacción y las resistencias obtenidas, por ese motivo se disminuye el tamaño de grano de la ceniza al máximo posible para así garantizar su buena calidad.

Con el fin de abaratar costos en la producción de los cementos se han venido utilizando desechos industriales y agrícolas que presentan propiedades puzolánicas. La CCA ha adquirido un papel importante en los cementos puzolánicos, puesto que esta ceniza finamente dividida tiene la capacidad de reaccionar con el agua y el hidróxido de calcio, creando buenas propiedades cementantes. Asimismo, se utiliza principalmente como un reemplazo de humo de sílice o como una mezcla en la fabricación de bloques de hormigón de bajo costo.

JUSTIFICACIÓN

La industria arrocerera es una de las actividades agrícolas más importantes en el país siendo la cascarilla de arroz el mayor residuo resultante de la producción de este grano. La mayoría de estas industrias utilizan dichos residuos orgánicos como biomasa para posteriormente, mediante un proceso de combustión, generar energía eléctrica. A partir de estas innovadoras prácticas orientadas a incrementar la eficiencia energética de las industrias surge una nueva necesidad: encontrar un uso eficiente para las cenizas que arroja la combustión de la cáscara de arroz.

La cascarilla de arroz al ser sometida a calcinación produce una alta cantidad de ceniza, entre 13 y 29% del peso inicial, la cual está compuesta principalmente por sílice, 87-97%, y pequeñas cantidades de sales inorgánicas (Claudia Arcos, 2007). Las puzolanas son materiales silícicos o alumino-silícicos que poseen poco o ningún valor cementante, sin embargo al ser finamente divididos y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente formando compuestos con propiedades cementantes. He aquí donde nace la importancia de realizar este estudio, puesto que se ha evidenciado que existe gran cantidad de residuo proveniente de la calcinación de la cascarilla de arroz, el cual podría ser utilizado como material cementante en la fabricación de hormigón.

Mediante el aprovechamiento del contenido de sílice presente en la cascarilla de arroz, este estudio permitirá varias ventajas, entre ellas determinar el porcentaje de CCA más óptimo a utilizarse en la mezcla de hormigón para obtener resistencias que cumplan con los requerimientos de la NEC. Además, se pretende fabricar un hormigón a menor costo sin comprometer ninguna de las características físicas y mecánicas del mismo. De esta manera se puede establecer dosificaciones eficientes que permitan producir un hormigón de calidad, y de manera sustentable.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el porcentaje más óptimo de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como reemplazo de cemento en la fabricación de hormigón convencional alcanzando una resistencia a la compresión mayor a 21 MPa.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer una dosificación eficiente para la fabricación de un hormigón convencional.
- Realizar mezclas de hormigón utilizando CCA en porcentajes de 10%, 15%, 20% y 25% como sustituyente en el cemento.
- Obtener una resistencia a compresión del hormigón mayor a 21 MPa a los 28 días de curado, requerimiento establecido por la NEC para hormigones estructurales.
- Determinar el porcentaje de CCA más óptimo para lograr las mejores prestaciones en cuanto a resistencia final a los 28 días de curado.
- Encontrar el porcentaje de CCA que consigue una mejor trabajabilidad en la mezcla de hormigón.
- Establecer conclusiones sobre los resultados obtenidos.

DESARROLLO DEL TEMA

Normas

- ASTM C39-14: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

Esta norma se refiere a la determinación de la resistencia a compresión de un espécimen cilíndrico de hormigón. La resistencia a la compresión del mismo se determina mediante la división de la carga máxima obtenida durante la prueba y el área transversal del cilindro de hormigón.

Diámetro de especímenes de prueba in [mm]	Diámetro máximo de la cara de apoyo in [mm]
2 [50]	4 [105]
3 [75]	5 [130]
4 [100]	6,5 [165]
6 [150]	10 [255]
8 [200]	11 [280]

Tabla 1: Especificación para los moldes de cilindros de hormigón. (Fuente: ASTM C39, 2004)

Finalmente, la norma menciona la tolerancia máxima que deben tener los cilindros al momento de ser ensayados dependiendo de la edad de los mismos.

Edad de la prueba	Tolerancia permisible
24 horas	0,5 h o 2,1%
3 días	2 h o 2,8%
7 días	6 h o 3,6%
28 días	20 h o 3,0%
90 días	2 días 2,2%

Tabla 2: Especificación para la tolerancia de ensayo de cilindros de hormigón. (Fuente: ASTM C39, 2004)

- ASTM C127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.

Esta norma se refiere la determinación de la densidad promedio de partículas de agregado grueso, densidad relativa y la absorción de agregado grueso.

- ASTM C33-13: Standard Specification for Concrete Aggregates.

Esta norma define los requisitos de clasificación y calidad de los agregados finos y grueso a utilizarse en el hormigón. Además, permite determinar la calidad del agregado, el tamaño máximo nominal del agregado y otros requerimientos para su clasificación.

- ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

Este método de ensayo cubre la determinación de la distribución granulométrica de agregados finos y gruesos por tamizado. Los agregados que hacen referencia a este método de ensayo deben cumplir ciertos requisitos de clasificación que incluyen tanto fracciones gruesas como finas. Se incluyen instrucciones para el análisis de tamices de tales agregados.

- ASTM C192-13: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

La presente norma cubre los procedimientos necesarios para la realización y el curado de los especímenes de hormigón en laboratorio. Al seguir todos los procedimientos descritos en la norma, es posible obtener información que cumpla con los siguientes propósitos:

- Proporciones para hormigón proyectado.
- Evaluación de diferentes mezclas y materiales.
- Correlación con pruebas no destructivas.
- Proveer especímenes para fines de estudio.

La norma además menciona sobre el método de varillado para la consolidación del espécimen de hormigón mediante las siguientes dos tablas:

Diámetro de los cilindros in [mm]	Métodos de consolidación	Número de capas
3 o 4 [75 a 100]	Varillado	2
6 [150]	Varillado	3
9 [225]	Varillado	4
mayores a 9 [225]	Vibrado	2

Tabla 3: Especificación para método de consolidación y número de capas. (Fuente: ASTM, 2007)

Diametro del cilindro in [mm]	Diámetro de la varilla in [mm]	Número de golpes
3 [75] a 6 [150]	3/8 [10]	25
6 [150]	5/8 [16]	25
8 [200]	5/8 [16]	50
10 [250]	5/8 [16]	75

Tabla 4: Especificación para diámetro de varilla y número de golpes para el método de varillado. (Fuente: ASTM, 2007)

- ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009).

La mencionada norma describe métodos para seleccionar una dosificación adecuada usando cemento hidráulico para mezclas de hormigón normal, es decir, consta de agregados de densidad normal y/o alta con una trabajabilidad adecuada para la construcción en sitio. Permite una primera aproximación de las proporciones

destinadas a ser verificadas por lotes de ensayo en el laboratorio y ajustadas, según sea necesario, para obtener las características deseadas del hormigón.

- ASTM C143-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

Este método de ensayo cubre la determinación del asentamiento del hormigón de cemento hidráulico, tanto en el laboratorio y en el campo.

- ASTM C350-14: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.

Esta práctica abarca la mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica. Este ensayo se realiza con el fin de verificar las propiedades cementantes de la ceniza de cáscara de arroz y determinar cómo reacciona al unirse con el cemento Tipo GU usado en la mezcla.

- ASTM C192-13: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).

Esta norma cubre la determinación de la resistencia a compresión de un espécimen cubico de mortero de cemento hidráulico de 2-in o 50-mm.

Materiales

Agregados

Para la realización de este estudio, se han utilizado dos tipos de agregados: Piedra 57 y Arena. Estos agregados provienen de la planta de Holcim en Pifo. En primer lugar, se procedió a determinar la distribución granulométrica, basada en la norma ASTM C136. Tanto la piedra 57 como la arena han cumplido con los requisitos

de clasificación establecidos en la norma con el fin de asegurar que los resultados sean exactos. Se ha comenzado con el análisis granulométrico de la Piedra 57.

Para el ensayo, se ha utilizado una muestra de 2000 gramos, la misma que luego de haber sido sometida al proceso de tamizado se ha obtenido la siguiente distribución en sus partículas:

Granulometría de agregado grueso Holcim (ASTM C33)					
Tamices	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
1/2"	12,7	530	26,61	26,61	73,39
3/8"	9,5	740,00	37,15	63,76	36,24
4	4,75	610,00	30,62	94,38	5,62
8	2,36	70,50	3,54	97,92	2,08
16	1,18	15,50	0,78	98,69	1,31
30	0,6	6,50	0,33	99,02	0,98
50	0,3	11,00	0,55	99,57	0,43
100	0,15	7,00	0,35	99,92	0,08
200	0,075	1,50	0,08	100,00	0,00
Base		0,00	0,00	100,00	0,00
TOTAL		1992	100,00		

Tabla 5: Distribución granulométrica Piedra 57

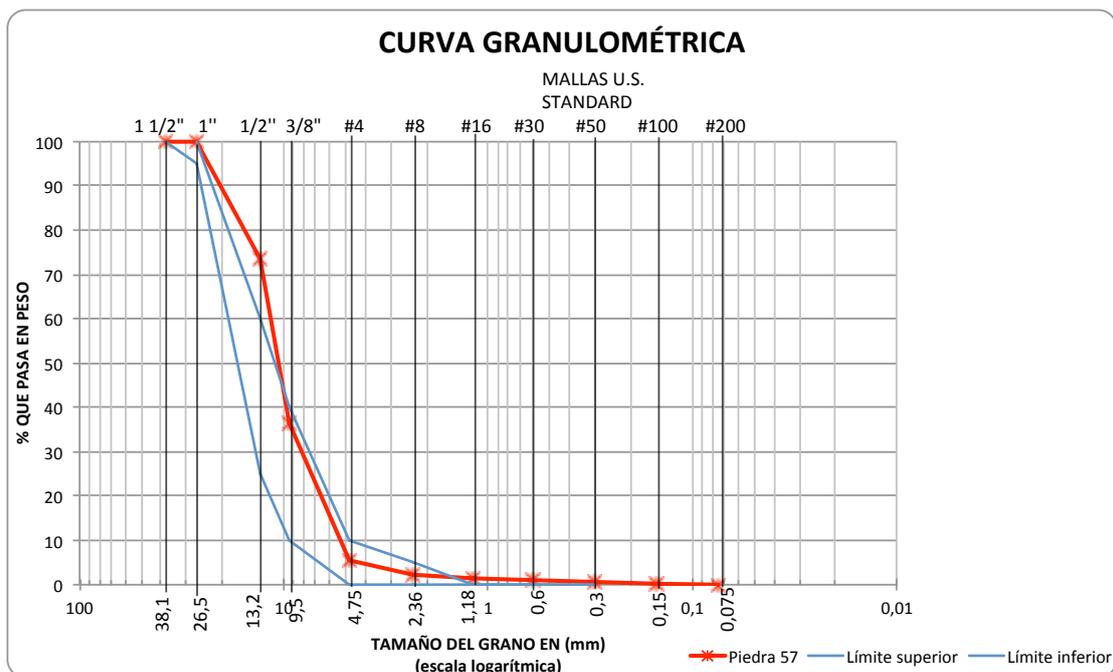


Figura 3: Curva granulométrica Piedra 57

Como se puede observar en la Figura 2, se encuentra que la curva granulométrica de la Piedra 57 no cumple con los requerimientos de la norma en los tamices ½, 50, 100 y 200. Al incumplirse dichos requerimientos en un porcentaje menor al 1% no se considera un error notable. Por esta razón se califica al material como un agregado de buena calidad con una ligera presencia de finos.

A continuación se presenta la distribución granulométrica de la arena:

Granulometría de agregado fino (ASTM C33)					
Tamices	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	70,00	4,52	4,52	95,48
8	2,36	390,00	25,19	29,72	70,28
16	1,18	270,00	17,44	47,16	52,84
30	0,6	255,00	16,47	63,63	36,37
50	0,3	479,00	30,94	94,57	5,43
100	0,15	73,00	4,72	99,29	0,71
200	0,075	11,00	0,71	100,00	0,00
Base		0,00	0,00	100,00	0,00
TOTAL		1548	100,00		

Tabla 6: Distribución granulométrica Arena

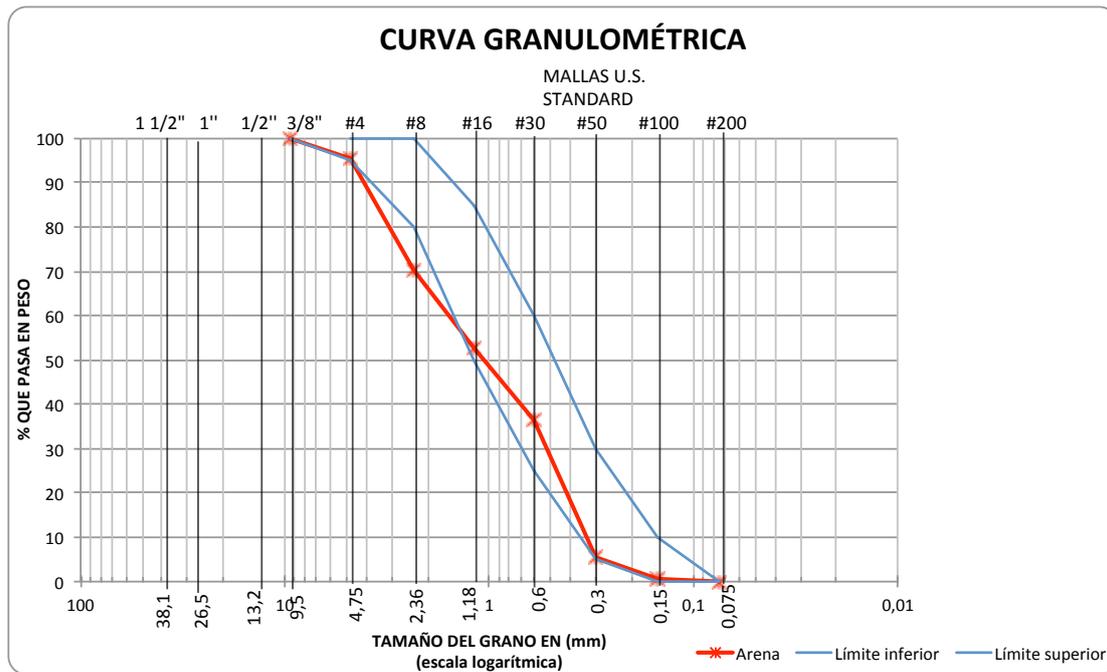


Figura 4: Curva granulométrica Arena

Al analizar los resultados obtenidos con los límites que presenta la norma ASTM C33-13 se ha encontrado que el porcentaje de agregado pasante del tamiz número 8 es mayor al que establece la norma. Por otro lado, la cantidad de material pasante en los demás tamices hasta el número 200 se encuentra dentro de los límites por lo que cumple satisfactoriamente con la norma. Debido a esto, se puede concluir que el agregado a utilizarse en la mezcla es de buena calidad.

Finalmente, se presenta la granulometría de la mezcla, donde se ha tomado una muestra de 2000 gr de material con un 55% de Piedra 57 y 45% de arena.

Granulometría de la mezcla de hormigón					
Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
1/2"	12,7	380	18,97	18,97	81,03
3/8"	9,5	420,00	20,97	39,94	60,06
4	4,75	370,00	18,47	58,41	41,59
8	2,36	290,00	14,48	72,89	27,11
16	1,18	150,00	7,49	80,38	19,62
30	0,6	151,50	7,56	87,94	12,06
50	0,3	230,00	11,48	99,43	0,57
100	0,15	10,00	0,50	99,93	0,07
200	0,075	1,50	0,07	100,00	0,00
Base		0,00	0,00	100,00	0,00
TOTAL		2003	100,00		

Tabla 7: Distribución granulométrica Mezcla de hormigón

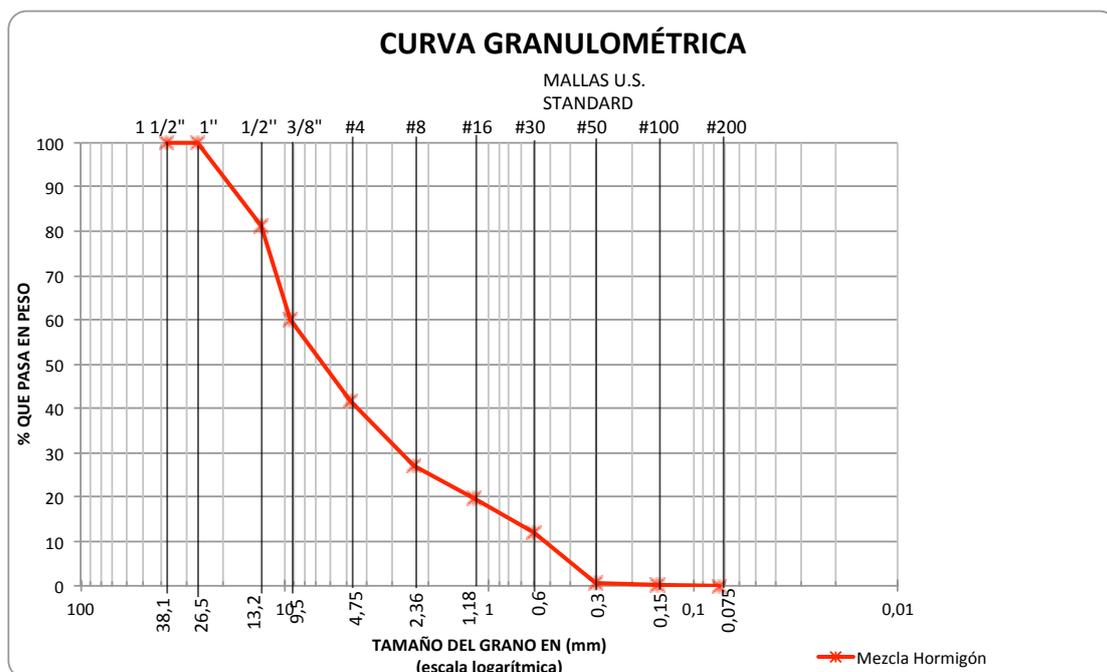


Figura 5: Curva granulométrica Mezcla de hormigón

Una vez determinada la granulometría de los agregados se procede a determinar la densidad y absorción de los mismos. Según la norma ASTM C127-12, la absorción es el incremento de la masa del agregado debido a la penetración del agua dentro de los poros del mismo durante un periodo de tiempo.

La norma permite definir características de los agregados como su densidad y la absorción. Estos parámetros son esenciales para el cálculo de las dosificaciones que se realizarán posteriormente. Para su cálculo, la norma presenta las siguientes formulas:

$$\text{Densidad relativa (OD)} = \frac{A}{(B - C)}$$

$$\text{Densidad relativa (SSD)} = \frac{B}{(B - C)}$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(A - C)}$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde A = masa de la muestra seca al horno (g), B = masa de la muestra saturada de superficie seca (g) y C = masa aparente de la muestra saturada en agua (g).

Los resultados obtenidos del cálculo de densidad y absorción de los agregados se encuentran en la Tabla 8:

	Agregado grueso	Agregado fino
Seca al horno (OD)	1800,5 g	1920 g
Saturada superficie seca (SSD)	1885 g	2070 g
Aparente de la muestra saturada	1090 g	1170 g
Densidad (g/cm³)		
	2,264	2,133
Densidad relativa (g/cm³)		
	2,371	2,300
Densidad aparente (g/cm³)		
	2,531	2,560
Absorción		
	4,69%	7,81%

Tabla 8: Valores de densidad y porcentaje de absorción

El análisis de estos parámetros es muy importante puesto que influye sobre otro componentes dentro de la mezcla de hormigón, tales como el agua. Dependiendo

del valor de absorción de los agregados se puede determinar la cantidad de agua que se debe añadir a la mezcla. Generalmente, para el cálculo de dosificación en campo se usa la densidad relativa (SSD) porque en obra el material no se encuentra completamente seco por factores de clima como lluvia, humedad del ambiente, u otras condiciones.

Cementantes

Cemento Holcim GU

El cemento Holcim GU es un cemento hidráulico fabricado para construcción en general bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380. Esta norma permite que existan cementos con componentes adicionados que minimizan el impacto ambiental y dan como resultado un uso eficiente de materias primas, reciclados y subproductos de otros materiales (Holcim, 2014).

Los cementos de uso general son adecuados para cualquier tipo de estructura donde no se requieran propiedades especiales.

Requisitos Físicos:

Tiempo de Fraguado	INEN 2380	Valor Referencial
Inicial, no menos de, minutos	45	220
Inicial, no menos de, minutos	420	318
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	N/E	3,2
Resistencia a la Compresión, mínimo MPa	INEN 2380	Valor Referencial
1 día	N/E	9
3 días	13	18
7 días	20	23
28 días	28	30

Tabla 9: Propiedades físicas Cemento Holcim GU

El cemento Holcim GU, de acuerdo con las notas técnicas del fabricante, proporciona algunas ventajas en la construcción, entre ellas mejora la trabajabilidad de la mezcla, reduce la segregación, el calor de hidratación, y por consiguiente la tendencia a la figuración. Además, posee un buen desempeño de fraguado y resistencia. Su uso recomendado contempla varias aplicaciones entre ellas elementos estructurales como cimentaciones, vigas, columnas, losas, pilares. En cuanto al almacenamiento, es necesario almacenarlo en ambientes ventilados, libres de humedad y de cambios bruscos de temperatura, para evitar que se humedezca y fragüe (Holcim, 2014). Puede ser utilizado hasta un máximo de 60 días después de su fabricación.

Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

La cascarilla de arroz es el principal residuo que se obtiene en la producción mundial de arroz. En el Ecuador, la cantidad de cascarilla generada equivale al 20% de la producción nacional del arroz. Se sabe que el poder calorífico de la cáscara de arroz es de 3.261 Kcal/kg (Caminos, 2014) por lo que presenta una importante fuente de generación de energía a partir de biomasa. Muchas de las industrias agrícolas, como la arrocera, han comenzado a utilizar este residuo como combustible y generar energía eléctrica para la misma planta.

El funcionamiento de una planta de biomasa para la generación de energía eléctrica consiste en la recepción de la biomasa, generalmente en forma de paja ó astillas como se observa en la Figura 6. Posteriormente, se colocan automáticamente en una cinta transportadora que las conduce hasta la caldera. Allí, caen sobre una parrilla vibratoria que favorece la combustión y la evacuación de inquemados. Dicha

combustión se produce alrededor de los 500 °C, que calienta el agua que circula por las tuberías de las paredes de la caldera y por haces de tubos en el interior de la misma convirtiéndola en vapor sobrecalentado. El vapor sobrecalentado mueve una turbina conectada a un generador lo que produce electricidad. Finalmente, las cenizas volantes (Figura 7) retenidas por un filtro, son trasladadas a un vertedero para su respectivo desecho.



Figura 6: Cáscara de arroz



Figura 7: Ceniza de cáscara de arroz

A partir de estas innovadoras prácticas orientadas a incrementar la eficiencia energética de las industrias surge la necesidad de encontrar un uso eficiente para las cenizas que arroja la combustión de la cáscara de arroz. Durante el proceso de calcinación, los compuestos orgánicos de la cascarilla se eliminan y estos son liberados en forma de gases de combustión por la chimenea del horno, obteniéndose finalmente el SiO_2 que puede ser utilizado como puzolana.

Con el fin de abaratar costos en la producción de los cementos se han venido utilizando desechos industriales y agrícolas que presentan propiedades puzolánicas (Taylor H. & Odler, 2000). Los materiales puzolánicos son materiales silícicos y/o aluminosos que no poseen alto poder cementante en sí mismo pero, si ellos presentan

un tamaño de partícula muy pequeño y alta reactividad, pueden reaccionar químicamente con el Ca(OH)_2 a temperaturas ambiente y formar compuestos que presenten propiedades cementantes. El SiO_2 amorfo altamente reactivo, presente en la ceniza de cascarilla de arroz, reacciona con el Ca(OH)_2 que se produce durante la hidratación del C_3S y el $\beta\text{-C}_2\text{S}$. Al adicionar ceniza de la cascarilla de arroz se favorece la formación de más fase C-S-H (Páez & Ahumada, 2006).

Para el desarrollo de esta investigación, se obtuvo una muestra de 10 kg de ceniza de cascarilla proveniente de una piladora de arroz ubicada en Durán. A continuación se procedió a llevar la muestra al laboratorio para realizar los estudios pertinentes. En primer lugar, se determinó la distribución granulométrica de la ceniza para identificar la cantidad de finos pasantes el tamiz No. 200 dentro de su estructura. Para el ensayo, se ha utilizado una muestra de 585 gramos, la misma que luego de haber sido sometida al proceso de tamizado, arroja la siguiente distribución en sus partículas:

Granulometría de la ceniza de cascarilla de arroz					
Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	%Que Pasa
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
16	1,18	0,50	0,50	0,09	99,91
30	0,6	20,00	20,50	3,51	96,49
50	0,3	227,50	248,00	42,47	57,53
100	0,15	199,00	447,00	76,54	23,46
140	0,10	63,00	510,00	87,33	12,67
200	0,075	27,00	537,00	91,95	8,05
<200	0,05	47,00	584,00	100,00	0,00
TOTAL		584			

Tabla 10: Distribución granulométrica Ceniza de cascarilla de arroz

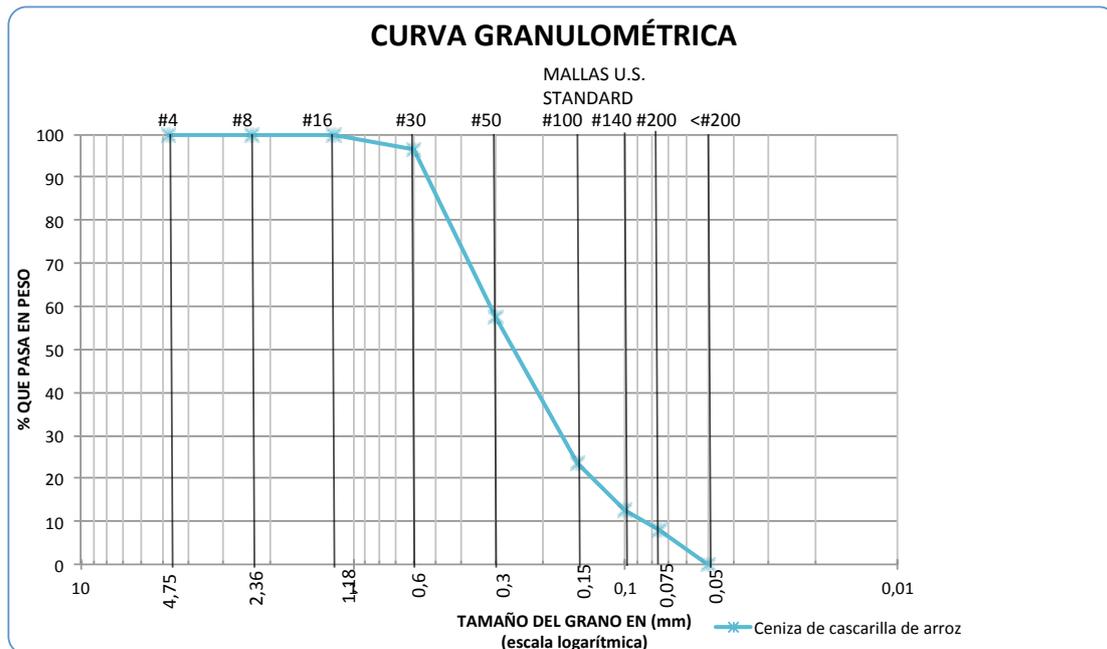


Figura 8: Curva granulométrica Ceniza de cascarilla de arroz

Los resultados obtenidos muestran que la mayor cantidad de ceniza de cascarilla de arroz quedó retenida en el tamiz número 50 y 100. Esto indica que el tamaño de partícula de la ceniza se encuentra dentro del rango de 0.3 mm a 0.15 mm. Además de su contenido de sílice altamente reactivo, la CCA debe adquirir un tamaño de partícula menor a 0.075 mm para que pueda reaccionar químicamente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y así formar compuestos con propiedades cementantes (Mafla, Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción, 2009). Debido a esto, es necesario reducir el tamaño de partícula de la CCA mediante un proceso de molienda en seco.

Para la trituración de la ceniza de cascarilla de arroz se empleó un molino de bolas, herramienta utilizada generalmente en la minería para la pulverización y selección de materiales. El molino de bolas posee un cilindro rotatorio que contiene bolas de acero las cuales actúan como medio moledor. El material introducido en el

molino gira a una velocidad entre 4 y 20 revoluciones por minuto. La rotación produce fuerzas centrífugas que elevan las bolas a una altura dada haciéndolos caer y aplastando el material a ser molido. Si la velocidad del molino es demasiado grande, el cilindro actuará como una centrifuga, causando que las bolas permanezcan en el perímetro del molino en lugar de caer de vuelta. Este punto es llamado “velocidad crítica” por lo que la velocidad optima del molino de bolas es por lo general el 75% de la velocidad crítica (Hongji, 2008).



Figura 9: Molino de bolas



Figura 10: Ceniza de cascarilla de arroz triturada

Los granos de ceniza de cascara de arroz obtenidos después de la molienda alcanzaron un tamaño de partícula entre 20 y 70 μm (0.020 y 0.070 mm). Finalmente, para que la CCA pueda ser empleada en la fabricación de hormigón, se procedió a tamizarla con el fin de asegurarse que solamente las partículas de ceniza retenidas en el tamiz No. 200 e inferiores sean utilizadas.

Una vez que la ceniza de cascarilla de arroz ha sido triturada se procedió a determinar la densidad y composición química del material.

Componente	% en peso
SiO₂	91,39
K₂O	2,17
CaO	0,39
Al₂O₃	0,13
Fe₂O₃	0,37
MgO	0,33
MnO	0,17

Tabla 11: Composición química de la CCA (Fuente: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales)

Ensayo en cubos de mortero de 50x50 mm

Previamente a la fabricación de cilindros de hormigón con ceniza de cascarilla de arroz se planteó elaborar cubos de mortero con el fin de determinar las propiedades cementantes que se obtendría en la mezcla mecánica de morteros para el ensayo de cementos hidráulicos utilizando este material alternativo como adición. Para su elaboración se basó en la norma ASTM C350-14: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.

Debido a la cantidad limitada de ceniza de cascarilla de arroz disponible en ese momento se realizaron 4 mezclas de mortero con diferentes proporciones de

material cementante, desde 0%, 5%, 15%, y 20% de reemplazo de CCA en peso de cemento. Se utilizó cemento Holcim GU. Se usó una relación agua-material cementante (a/mc) inicial de 0.4 y como agregado fino se utilizó Arena, detallada anteriormente.



Figura 11: Cubos de mortero de 50x50mm

Todos los especímenes tuvieron un curado en agua a una temperatura de 21°C \pm 2°C durante 21 días. A continuación, se realiza el ensayo de los cubos de mortero de acuerdo a la norma ASTM C192-13: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. Or [50-mm] Cube Specimens).

Resistencia a la compresión 21 días (Mpa)				
ID	1	2	3	Prom
Mezcla control	50,4	43,2	46,9	46,8
Mezcla 5% CCA	39,0	42,9	42,1	41,3
Mezcla 15% CCA	39,4	38,4	38,6	38,8
Mezcla 20% CCA	32,9	31,2	30,6	31,6

Tabla 12: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cubos de mortero a los 21 días según ASTM C192.

Los resultados obtenidos después del ensayo de fueron favorables puesto que se observó como la ceniza de cascarilla de arroz logró adherirse al cemento formando

una pasta uniforme. Además, se alcanzaron resistencias a la compresión que sobrepasaron los 35 MPa.

Diseño y proporcionamiento de las mezclas

Una vez realizada la granulometría para agregados tanto fino como grueso, se procede con el cálculo de dosificaciones. El diseño y proporcionamiento de las mezclas se realiza según el ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, reprobada en 2009.

La selección de los materiales y los criterios de diseño busca representar las características de los hormigones estructurales convencionales que se utilizan en la construcción en general en el país. Se consideran hormigones de peso normal, sin ningún tipo de aditivo.

Se apunta a un revenimiento entre 75 y 100 mm que brinda una buena trabajabilidad para la construcción de un elemento estructural en obra.

En cuanto al agregado grueso cuyo tamaño nominal máximo es de 20 mm, se considera que cumpla sin problemas los criterios del ACI 318 referentes a las dimensiones del elemento y el espaciamiento mínimo libre entre el refuerzo para la gran mayoría de elementos estructurales.

Se utilizan 5 proporciones diferentes de material cementante, desde 0%, 10%, 15%, 20% y 25% de reemplazo de ceniza de cascarilla de arroz en peso de cemento. Se usa una relación a/mc inicial representativa de un hormigón estructural convencional de mediana resistencia que para este caso fue 0.4.

Se debe tomar en consideración que el volumen real debe ser mayor al volumen necesario para elaborar los cilindros de hormigón, puesto que cierto

volumen de la mezcla se reduce debido a varios factores, como la energía de compactación.

Se tienen por lo tanto los siguientes 5 diseños de hormigón con las siguientes denominaciones:

Nomenclatura de los diseños de hormigón			
ID	Cementantes		a/mc inicial
	Holcim GU	CCA	
Mezcla control	100%	0%	0,40
Mezcla 10% CCA	90%	10%	0,40
Mezcla 15% CCA	85%	15%	0,40
Mezcla 20% CCA	80%	20%	0,40
Mezcla 25% CCA	75%	25%	0,40

Tabla 13: Nomenclatura de los diseños de hormigón

Proporciones por peso (kg) para realizar 1 m³ de hormigón						
ID	Agua	Cemento	CCA	Agregado Grueso	Agregado Fino	Total
Mezcla control	197,7	380,1	0,0	861,4	704,7	2143,9
Mezcla 10% CCA	189,4	327,8	36,4	825,4	675,4	2054,5
Mezcla 15% CCA	185,6	303,3	53,5	808,6	661,6	2012,5
Mezcla 20% CCA	181,8	279,8	69,9	792,4	648,3	1972,3
Mezcla 25% CCA	178,3	257,1	85,7	776,9	635,6	1933,6

Tabla 14: Proporciones por peso (kg) para 1 m³ de hormigón

Nota: La relación a/mc final obtenida en cada diseño de mezcla son datos reales.

Elaboración de especímenes

Para cada uno de los 5 diseños de hormigón se elaboraron 9 cilindros de 100 x 200 mm de acuerdo a la ASTM C31 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Todos los especímenes tuvieron un curado en agua a una temperatura de 21°C ±2°C durante 28 días.



Figura 12: Mezcladora



Figura 13: Elaboración de cilindros de hormigón con %CCA



Figura 14: Cilindros en tanque de curado a $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Ensayos hormigón fresco

Se realizan ensayos de revenimiento según la norma ASTM C143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement concrete y de densidad según la norma ASTM C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield and Air Content (Gravimetric) of Concrete.

ID	a/mc final	Revenimiento (cm)	Densidad (kg/m ³)
Mezcla control	0,52	9,0	2473
Mezcla 10% CCA	0,57	8,0	2469
Mezcla 15% CCA	0,60	8,0	2439
Mezcla 20% CCA	0,60	7,5	2411
Mezcla 25% CCA	0,64	6,5	2389

Tabla 15: Ensayos en hormigón fresco (asentamiento según la ASTM C143 y densidad según la ASTM C138)

Determinación de la resistencia a la compresión

Se ensayan los 9 cilindros a compresión de las cinco diferentes mezclas de hormigón a los 7, 14 y 28 días de acuerdo a la norma ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.



Figura 15: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de 100 x 200 mm de acuerdo a ASTM C39

Se obtiene el promedio de los resultados de los 3 cilindros de cada diseño de hormigón así como su desviación estándar a los 7, 14 y 28 días.

Resistencia a la compresión 7 días (Mpa)					
ID	1	2	3	Prom	Dsv Std
Mezcla control	21,8	22,1	22,2	22,0	0,2
Mezcla 10% CCA	21,1	21,9	22,9	22,0	0,9
Mezcla 15% CCA	17,9	17,4	17,1	17,5	0,4
Mezcla 20% CCA	15,0	15,2	15,9	15,4	0,4
Mezcla 25% CCA	11,6	12,9	12,2	12,3	0,6

Tabla 16: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los 7 días según ASTM C39

Resistencia a la compresión 14 días (Mpa)					
ID	1	2	3	Prom	Dsv Std
Mezcla control	28,3	29,3	28,8	28,8	0,5
Mezcla 10% CCA	32,7	32,2	32,2	32,4	0,3
Mezcla 15% CCA	24,3	23,4	24,1	23,9	0,5
Mezcla 20% CCA	21,3	22,7	21,9	22,0	0,7
Mezcla 25% CCA	18,5	19,5	18,8	18,9	0,5

Tabla 17: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los 14 días según ASTM C39

Resistencia a la compresión 28 días (Mpa)					
ID	1	2	3	Prom	Dsv Std
Mezcla control	34,3	36,3	36,3	35,6	1,2
Mezcla 10% CCA	43,0	39,7	41,0	41,2	1,7
Mezcla 15% CCA	29,1	27,7	29,4	28,7	0,9
Mezcla 20% CCA	25,4	27,7	25,8	26,3	1,2
Mezcla 25% CCA	23,0	22,5	23,0	22,8	0,3

Tabla 18: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón a los 28 días según ASTM C39

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Para el estudio de este proyecto de investigación se han definido dos pilares fundamentales. El primero es el análisis de las curvas de resistencia a compresión de un hormigón convencional utilizando distintos porcentajes de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como reemplazo de cemento. Con ésto se busca determinar el porcentaje de CCA más óptimo para lograr las mejores prestaciones en cuanto a resistencia final a los 28 días de curado. Además, se analizará el comportamiento de cada una de las mezclas de hormigón en estado fresco, con el fin de determinar la el porcentaje de CCA que consigue un mejor desempeño en su trabajabilidad, sin afectar su resistencia.

En la Figura 16 se presenta el comportamiento de la resistencia a compresión a 7 y 28 días de curado de los cilindros elaborados cuando la CCA actúa como reemplazo parcial al cemento en distintos porcentajes.

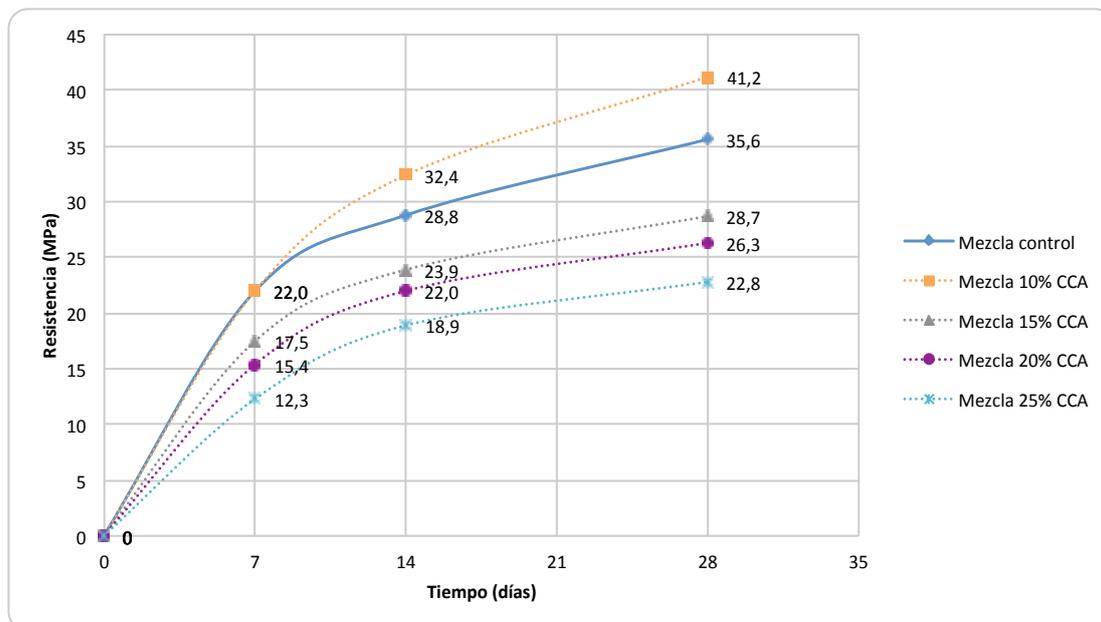


Figura 16: Resistencia a la compresión de los cilindros con CCA sustituyendo al cemento en diferentes porcentajes.

Ensayo a los 7 días

En primer lugar, se realiza el análisis de las muestras ensayadas a los 7 días de curado. Como se observa en la Figura 16, los resultados muestran que no hubo diferencia en la resistencia entre la mezcla control y la mezcla con 10% de reemplazo puesto que ambos alcanzan los 22 MPa. Por otro lado, las mezclas con 15%, 20% y 25% de reemplazo no alcanzan el setenta por ciento de su resistencia esperada después del tiempo de curado que se está analizando. Esto se debe a que el material puzolánico del que está hecha la ceniza de cascarilla de arroz tiende a tener una actividad retardada.

En efecto, para que comience la acción puzolánica en los cementos con adiciones se requiere la presencia y la acción de la cal de hidrólisis del clinker, por lo cual es éste el que actúa primero. Es por lo tanto, el único factor desencadenante del desarrollo de la resistencia a edades tempranas. Al estar el clinker en menos proporción en los cementos con adiciones que en los cementos que no las tienen, la masa activa reaccionante al principio de la hidratación y del endurecimiento va a ser menor en los cementos con adiciones y, como consecuencia, el desarrollo de las resistencias es más lento en las primeras etapas (Calleja, 2011).

Ensayo a los 14 días

En los ensayos realizados a los 14 días de curado se detecta un cambio significativo en el comportamiento de las curvas de resistencia de cada diseño de mezcla.

Dado que la mezcla control no posee partículas de ceniza de cascarilla de arroz en su dosificación se esperaría que las mezclas que si las tienen obtengan una

resistencia menor dado que se trata de un material que no posee alto poder cementante. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos, se encuentra que la resistencia de la mezcla 10% CCA supera en un 11% a la mezcla control. Esto se puede entender considerando que la cantidad de hidróxido de calcio, o calcio libre existente en el cemento disminuye debido a su reacción puzolánica con el dióxido de silicio adicionado, favoreciendo la densificación de la zona interfacial, aumentando su resistencia a compresión (Mafla, Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción, 2009).

Por otro lado, las mezclas con 15% y 20% de reemplazo no presentan diferencias significativas en su resistencia a compresión, tal como se puede observar en el gráfico, sus valores se encuentran entre los 22 y 23 MPa. En cuanto a la mezcla con 25% de reemplazo, la resistencia obtenida se mantiene por debajo de las 2 mezclas anteriores. Esto se puede deber a que se encontró gran cantidad de vacíos en los especímenes ensayados lo que ocasiono una disminución en su resistencia.

Ensayo a los 28 días

Una vez realizados los ensayos respectivos de los especímenes a los 28 días, los resultados muestran que cuatro de las cinco mezclas realizadas alcanzaron la resistencia máxima para la que fueron diseñadas, que para este estudio se escogió el de un hormigón convencional de mediana resistencia que son 21 ± 3 MPa.

El ensayo realizado con 10% de ceniza de cascarilla de arroz, muestra la mayor resistencia a los 28 días, seguido de la mezcla control, 15%, 20% y 25% de este material. Se puede decir además que las mayores prestaciones se encontraron al sustituir un 10% de cemento por la CCA puesto que genera un aumento del 16% en la

resistencia a la compresión con respecto a la mezcla control. Además, al analizar el comportamiento de la mezcla se encuentra que su relación a/mc final fue de 0.57, la más baja obtenida en comparación a las demás mezclas y su revenimiento fue de 8 cm. Esto indica que esta dosificación presenta los resultados más óptimos en función de la trabajabilidad y resistencia final a los 28 días.

En cuanto a las mezclas de 15% y 20% de reemplazo, se pudo determinar que ambas mezclas tienen comportamientos muy similares, no solo en valores de resistencia sino también en su relación a/mc final. Como se observa en la Tabla 15, se encontró que ambas mezclas tuvieron una relación a/mc final de 0.6 y alcanzaron una resistencia final que redondea los 26 a 28 MPa.

Por otro lado, existe diferencia en la trabajabilidad de ambas mezclas puesto que la mezcla 15% CCA tuvo un revenimiento de 8 cm mientras que el de la mezcla 20% CCA fue de 7.5 cm. De igual manera, experimentalmente se pudo observar que la primera mezcla fue mucho más trabajable que la segunda. Esto se debe a que la cantidad de ceniza de cascarilla de arroz en la segunda mezcla fue mayor y por consiguiente esta va a requerir mayor cantidad de agua para lograr una mejor trabajabilidad.

Como está establecido en la norma ASTM C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, el uso de puzolanas en la fabricación de cemento hidráulico permite el reemplazo máximo del 15% en peso del cemento para hormigones estructurales. Por esta razón, se puede concluir que con la sustitución de hasta un 15% de ceniza de cascarilla de arroz en la dosificación de un hormigón

convencional de mediana resistencia, se puede conseguir buenas prestaciones en cuanto a trabajabilidad de la mezcla.

Por el contrario, las más bajas prestaciones se obtuvieron utilizando 25% de CCA, pues la resistencia a la compresión solamente alcanzó los 22.8 MPa. Dado que esta dosificación posee mayor cantidad de ceniza de cascarilla de arroz, fue necesario agregar agua adicional a la mezcla para hacerla más trabajable, lo que ocasionó que su resistencia disminuya.

Las cenizas de cáscara de arroz, por su composición, constitución y proporción en reemplazo de cemento para la fabricación de hormigones pueden influir en varios aspectos; en la puzolanicidad, relación agua/material cementante, trabajabilidad de la mezcla y resistencia a la compresión. Sin embargo, cabe resaltar que este residuo agroindustrial fue utilizado sin ningún tipo de tratamiento de activación mecánico o térmico posterior, por lo cual su valorización en la fabricación de hormigón estructural de mediana resistencia es viable teniendo en cuenta que con su baja calidad se logran resultados aceptables e inclusive superiores a los de la mezcla control.

Trabajabilidad del hormigón

En la Tabla 15, se muestra el revenimiento obtenido en cada diseño de mezcla. Los resultados obtenidos muestran que a medida que la cantidad de ceniza de cascarilla de arroz aumenta, el revenimiento disminuye por lo que la trabajabilidad del hormigón se ve afectada. Al existir un mayor revenimiento esto indica que el hormigón tiene una mayor cantidad de agua y se encuentra en un estado más plástico.

Por otro lado si el revenimiento es menor, significa que tenemos un hormigón más sólido en estado fresco pero que a su vez es menos trabajable.

El revenimiento se puede catalogar de la siguiente manera (Neville, 1999):

Descripción de trabajabilidad y magnitud de revenimiento	
Descripción de trabajabilidad	Revenimiento mm
Sin revenimiento	0
Muy baja	5-10
Baja	15-30
Media	35-75
Alta	80-155
Muy alta	160 hasta colapso

Tabla 19: Descripción de trabajabilidad y magnitud de revenimiento (Neville)

Se puede observar que la sustitución de hasta un 15% de CCA en la mezcla mantiene una trabajabilidad óptima con una menor relación a/mc mientras que la mezcla con reemplazo de 25% de CCA obtuvo un revenimiento menor el cual no cumple con los parámetros de diseño establecidos a pesar de que su relación a/cm es mayor. Según Neville, las partículas de ceniza de cascara de arroz tienen formas complejas, que reflejan sus orígenes en las plantas y, por lo tanto, tienen una alta demanda de agua a menos que estén intercaladas con clinker para descomponer la estructura porosa. Debido a esto, si se aumenta el porcentaje de CCA en la mezcla, esta va a necesitar una mayor cantidad de agua para conseguir una mejor trabajabilidad.

La cascarilla de arroz y los nuevos materiales

La cascarilla de arroz es un deshecho agroindustrial que se produce en altos volúmenes en los lugares donde se siembra y se procesa la planta del arroz. Este deshecho, como se demostró se puede utilizar para la obtención de dióxido de silicio

para el cemento y mejorar sus características mecánicas lo cual ha sido investigado por especialistas en distintas partes del mundo, los cuales han notado el enorme potencial de este material como fuente alternativa en el campo de la construcción (Páez & Ahumada 2006).

Esto permite establecer que en el Ecuador el CCA también se lo puede considerar como un material de gran potencial ya que ofrece una alternativa viable para su aplicación en la fabricación de hormigones convencionales. Lo que se propone es desarrollar técnicas para industrialización del proceso de la cascarilla de arroz con el fin de colocar este material como una alternativa para mejorar la resistencia mecánica y reducir los costos en la producción del hormigón.

Una alternativa a corto plazo que se visualiza, es el uso de este material como compuesto de cubiertas de poco peso. Otra aplicación que se puede abordar con el uso de este material, está en el hecho de utilizarlo en la industria de bloques. Estableciendo una dosificación eficiente se pretende generar bloques más económicos y más livianos. De esta forma, se disminuyen los pesos de las estructuras, se aligeran las presiones sobre los suelos de fundación y finalmente se evitan los daños colaterales que se presentan durante los sismos.

Así, se da paso a la investigación de nuevas opciones de materias primas en la elaboración de sistemas constructivos eficientes, los cuales, a su vez, contribuyen con la sostenibilidad ambiental.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El dióxido de silicio obtenido de la cascarilla de arroz, obtenido de un proceso de calcinación y posteriormente de trituración presentó buenas propiedades como material puzolánico. Su alto contenido de sílice hacen que al mezclarse con el cemento a temperatura ambiente y en presencia de agua reaccione fácilmente con el calcio o Ca(OH)_2 libre.

Es necesario reducir el tamaño de partícula de la ceniza de cascarilla de arroz mediante un proceso de molienda en seco con el fin de que sus partículas alcancen un tamaño menor a 0.075 mm para que pueda reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio y así formar compuestos con propiedades cementantes

La sustitución de un 10% de cascarilla de arroz en la dosificación de un hormigón convencional obtuvo las mejores prestaciones en resistencia a los 28 días de curado puesto que generó un aumento del 16% en la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla control.

Las mezclas de 15% y 20% de reemplazo poseen un comportamiento muy similar, no solo en valores de resistencia sino también en su relación a/mc final. La diferencia en resistencia a los 28 días entre ambas mezclas no es muy significativa pues es se encuentra alrededor del ocho por ciento.

Con respecto a la trabajabilidad, la sustitución de hasta un 15% de ceniza de cascarilla de arroz mantiene una mezcla de hormigón fresco más trabajable, sin afectar su resistencia final.

Las más bajas prestaciones se obtuvieron utilizando 25% de CCA, pues la resistencia a la compresión solamente alcanzó los 22.8 MPa. Dado que esta dosificación posee mayor cantidad de ceniza de cascarilla de arroz, fue necesario

agregar agua adicional a la mezcla para hacerla más trabajable lo que ocasionó que su resistencia disminuya.

Se recomienda realizar más dosificaciones para analizar de mejor manera la trabajabilidad de la mezcla puesto existen otros factores que influyen en la consistencia del hormigón fresco, como la granulometría del agregado. Asimismo, se recomienda analizar el comportamiento de las mezclas con CCA a edades superiores a los 28 días, pues la actividad puzolánica típicamente requiere mayor tiempo de curado para su desarrollo.

Es necesario realizar más comprobaciones con otros cementos disponibles en el mercado, con distintas relaciones a/mc, con varias resistencias para poder juzgar de mejor manera la validez y aplicabilidad de los resultados obtenidos al usar la cascarilla de arroz como material cementante en el Ecuador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ASTM Standard C33-13. (2013). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C127. (2013). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregates*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C39. (2004). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C136. (2006). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C143. (2003). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C192-13. (2013). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C350-14. (2014). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM Standard C143. (2003). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohoken: ASTM International.

- Ajay Kumar, K. M. (2012). Properties and industrial applications of rice husk: a review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 88.
- Calleja, J. (3 de Septiembre de 2011). Adiciones y cementos con adiciones. *Materiales de Construcción*, 36.
- Caminos, J. (2014). *Eficiencia energética en una industria y la aplicación de biomasa en su proceso*. Universidad Técnica Nacional , Facultad Regional Santa Fe. Santa Fe: Energía Lavaise 610.
- Claudia Arcos, D. P. (2007). La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia*, 10.
- FAO. (2 de Abril de 2014). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de Seguimiento del mercado del arroz de la FAO: <http://www.fao.org/3/a-i3735s.pdf>
- Holcim. (Enero de 2014). *Cemento Holcim Rocafuerte*. Obtenido de http://www.holcim.com.ec/fileadmin/templates/EC/doc/Archivos_varios/Folleto_Cemento_Holcim_GU.pdf
- Hongji, H. (03 de 09 de 2008). *HENAN HONGJI MINE MACHINERY CO., LTD.* Recuperado el 29 de 03 de 2017, de ETW International Inc. USA: <http://hjcrusher.es/1-ball-mill-1.html>
- INEC. (8 de Diciembre de 2015). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. Obtenido de http://www.ecuadorencifras.gob.ec//documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2014-2015/2015/2015/Presentacion%20de%20resultados%20ESPAC_2015.pdf
- L.M. Ahumada, J. R.-P. (2006). Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio. *Revista académica Colombiana de Ciencia*, 593.

- Mafla, A. (2009). Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción. *Inventum, Facultad de Ingeniería Uniminuto*, 75.
- Mafla, A. (2009). Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción. *Facultad Ingeniería Civil*, 5.
- NEC. (2015). *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI)*. Ecuador: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Neville, A. (1999). *Tecnología del Concreto*. Mexico D. F.: Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial.
- Pedro Matthey, R. R. (2015). Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 286.
- Taylor H. & Odler. (2000). Special Inorganics Cements. *Modern Concrete Technology*, 53-55.