

ciona una entrega continua a los proyectos de construcción principales, entonces serán las pequeñas construcciones las que se verán afectadas con el problema de escasez de cemento.

Las industrias cementeras en los países en desarrollo, no pueden expandirse, ya sea por escasez de materia prima para la elaboración del cemento, o debido a falta de capital para establecer nuevas plantas cementeras. Actualmente, un gran porcentaje de cemento Portland es utilizado para trabajos de mampostería, el cual no requiere de cemento de alta resistencia. Por lo tanto, producir un cemento para mampostería que pueda sustituir al cemento Portland normal, aliviará el problema hasta cierto punto. Así mismo, si se puede producir un cemento de alta resistencia utilizando las materias primas disponibles en la región a un costo menor que el cemento Portland normal en las áreas rurales, el problema de escasez así como el de distribución serán minimizados. Además, está la necesidad de introducir nueva tecnología de producción que permitiera que se elaboraran cemento o sustitutos del cemento a un costo capital menor.

Estado actual de la Industria del Cemento de Ceniza de Cáscara de Arroz.

Todavía están en proceso muchas investigaciones que intentan producir un cemento de alta resistencia utilizando CCA. Todavía no se han desarrollado completamente las tecnologías como para iniciar la elaboración de un cemento de CCA de gran calidad. La tecnología debe confirmarse experimentalmente antes de iniciar la producción comercial. También deben prepararse las especificaciones y procedimiento de ensaye para el cemento de CCA.

Actualmente, los países como Malasia, India, Pakistán y Nepal están produciendo, a pequeña escala, cemento de cáscara de arroz para trabajos de mampostería. La información disponible indica que este cemento ha sido bien aceptado por los consumidores.

INVESTIGACION EXPERIMENTAL

Planteamiento del Problema

Como se discutió anteriormente, las propiedades de la CCA dependen principalmente de tres factores importantes: la temperatura de quemado, métodos de enfriamiento y el grado de finura de la CCA. Por lo tanto, resulta de interés estudiar los efectos de estos parámetros en las propiedades físicas y mecánicas de la CCA, así como la resistencia a la compresión del cemento Portland con CCA. Dado que se ha demostrado que la calidad de la CCA se mejora al aumentar su finura, se llevó a cabo un programa experimental para investigar las propiedades de la CCA bajo diferentes temperaturas de quemado y métodos de enfriamiento.

Planteamiento de la Investigación

Preparación de las muestras de ceniza

La cáscara de arroz se obtuvo de un molino de arroz en Wangnoi, un distrito localizado a unos 60 km. al Norte de Bangkok. Se elaboró la ceniza quemando la cáscara de arroz a temperaturas controladas en un horno eléctrico de laboratorio. Las temperaturas fueron de 200, 300, 400, 500, 600 y 800°C. La cáscara de arroz se quemó durante 4 horas y posteriormente se enfrió bajo los siguientes métodos:

i).- Enfriado a temperatura ambiente.- En este caso, se dejó que la ceniza se enfriara bajo la temperatura ambiente que era de aproximadamente 25°C. Este método de enfriado se le designó C1.

ii).- Enfriado a 5°C.- En este caso se usó un cuarto cuya temperatura controlada era de 5°C, para enfriar la ceniza. Este método de enfriado se le designó C2.

Además de la ceniza con quemado controlado, también se ensayó con ceniza obtenida de un quemado a campo abierto, la cual se obtuvo quemando al aire libre una pequeña cantidad de cáscara de arroz y dejándose enfriar en el mismo ambiente.

Después de enfriarse, se molió la muestra de ceniza durante un período constante de 2 horas, utilizando un molino de bolas cuya capacidad era de aproximadamente 15.8 cm³ (0.15 pies³). La designación de la CCA bajo las diferentes temperaturas de quemado y con los dos métodos de enfriado se da en la Tabla 1.

Se utilizó cemento Portland normal Tipo I para hacer el cemento Portland con CCA. El agregado fino utilizado fue arena de río cuya granulometría cumplía con los requisitos ASTM C109.

Propiedades de la Ceniza de Cáscara de Arroz.

A manera de obtener las propiedades físicas y químicas de la CCA, se efectuaron los siguientes ensayos.

a).- Análisis químico de la CCA.- Se efectuaron análisis químicos de las muestras de ceniza de acuerdo con ASTM C573. Esto fue para investigar el efecto de las temperaturas de quemado y del procedimiento de enfriado en la composición de la CCA.

b).- Gravedad específica.- Se estudió la influencia de las temperaturas de quemado y métodos de enfriado sobre la gravedad específica de la CCA. La densidad de las muestras de ceniza se determinó utilizando un matraz Le Chatelier estándar de acuerdo con ASTM C188.

c).- Superficie específica.- El efecto de las temperaturas de quemado y los métodos de enfriado sobre la reaccionabilidad de la ceniza pueden estudiarse investigando la superficie específica de la ceniza. Se determinó el área específica de la CCA mediante un aparato de permeabilidad Blaine de acuerdo con ASTM C204.

d).- Análisis de Difracción de Rayos X.- La reaccionabilidad de la CCA depende principalmente de la forma del sílice en la ceniza. Se considera que la ceniza reacciona si el sílice se encuentra en forma amorfa, pero se vuelve no reactivo si la forma del sílice es cristalina. El ensaye de difracción de rayos X implicó el uso de rayos X para identificar la forma del sílice en las muestras de ceniza. El procedimiento de ensaye se resume a continuación.

Se obtuvieron patrones de difracción de la CCA con un aparato de difracción de rayos X utilizando radiación $\text{Co-K}\alpha$, y filtro Fe. La velocidad de barrido era de 2°C por minuto. Generalmente deben molerse las muestras en un mortero antes de ensayarse. En este caso, no fue necesario ya que todas las muestras de ceniza eran lo suficientemente finas. El recipiente de aluminio se llenó con ceniza (aprox. 2 grs.) y se fijó al difractómetro. El ángulo de difracción, 2°C , se colocó en 3° y se corrió un rayo X con velocidad de barrido de 2°C por minuto. Se varió el ángulo de difracción de 3° hasta 75° . Se ensayaron muestras de ceniza obtenida de quemado en campo abierto, ceniza de calentador y polvo de cáscara de arroz con el difractómetro de rayos X para identificar la forma del sílice. Para el polvo de cáscara de arroz fue necesario eliminar el material orgánico tratándolo con peróxido de hidrógeno.

Resistencia a la Compresión del Cemento Portland CCA.

Para investigar el efecto de la temperatura de quemado y los métodos de enfriado sobre la reaccionabilidad de la CCA, se determinaron las resistencias a la compresión del cemento Portland CCA a los 3, 7 y 28 días. La CCA obtenida como se mencionó anteriormente se mezcló con cemento Portland en una proporción constante de 30:70 en peso, y posteriormente molidos en un molino de bolas durante 30 minutos. La designación dada a los cementos Portland CCA se presenta en la Tabla I. Las relaciones agua-cemento para los morteros de cemento Portland CCA se determinaron de tal manera que sus trabajabilidades fueran las mismas que la de los morteros de cemento Portland con una relación agua-cemento de 0.485 y relación arena-cemento de 2.75. Esto se logró obteniendo los mismos valores de fluidez en los ensayos de fluidez.

Las resistencias a la compresión de los morteros se determinaron con cubos de $51 \times 51 \times 51 \text{ mm}$ ($2 \times 2 \times 2$ pulg) de acuerdo con el estándar ASTM C109 "Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico". Los especímenes de ensaye se mantuvieron en un cuarto de curado durante 24 horas. Después de sacar los cubos de los moldes, se sumergieron en agua saturada con cal hasta el momento de ser ensayados. Los cubos de mortero se ensayaron a los 3, 7 y 28 días para determinar su resistencia a la compresión. Los detalles de todo el programa de ensayos se muestra en la Tabla 2.

RESULTADOS Y DISCUSION.

Propiedades de la Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA)

Las propiedades de la CCA con respecto a su composición química, gravedad específica y superficie específica, están tabuladas en la Tabla 3.

Análisis Químico

Los resultados de los análisis químicos de las diferentes muestras de ceniza indican que contienen aprox. un 50% de sílice (dióxido de silicio) y como 3% de óxidos de potasio, calcio, magnesio, hierro y sodio, independientemente de las temperaturas de quemado y métodos de enfriado. Muchas muestras de ceniza indicaron una pérdida por ignición del 45% en peso. La elevada pérdida por ignición puede atribuirse principalmente a la presencia, en la ceniza, de materiales orgánicos sin quemar debido a la combustión incompleta de la cáscara de arroz. La causa principal de la combustión incompleta fue una ventilación inadecuada en el horno, lo cual resultó en una falta de aire para la oxidación.

Gravedad Específica

La gravedad específica de las muestras de ceniza dadas en la Tabla 3, variaron desde 1.69 hasta 1.98. La variación en los resultados es relativamente pequeña. Se puede apreciar que las temperaturas de quemado y los métodos de enfriado no ejercen efecto significativo sobre la gravedad específica de la ceniza.

Superficie Específica

La superficie específica de la CCA obtenida con el aparato de permeabilidad Blaine se da en la Tabla 3. Los resultados obtenidos fueron muy diferentes a pesar de que el tiempo en el molino de bolas fue el mismo para todas las muestras. La variación en los resultados no indican un efecto significativo debido a las temperaturas de quemado y métodos de enfriado. Debe notarse que la superficie específica no puede obtenerse con mucha precisión mediante el método de permeabilidad de aire si la ceniza ensayada es muy fina. Esto se muestra por la variación en los resultados. Se sugiere que se utilice un método más preciso, como el de absorción de gas, en la determinación de la superficie específica.

ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X.

Ejemplos típicos de patrones de difracción de rayos X para muestras de CCA se muestran en las Figuras 1a y 1b. Las interpretaciones indicaron que independientemente de los métodos de enfriado, el sílice en la ceniza quemada entre los 200°C y 800°C estaba en estado amorfo. El sílice presente en las muestras de ceniza quemadas a 1000°C estaba en forma cristobalita, la cual es una forma

cristalina del sílice. Esto implicó que se efectuó un cambio de fase de estudio amorfo a estado cristalino a temperaturas entre 800°C y 1000°C. El patrón de difracción de rayos X para la ceniza obtenida por el proceso de quemado en el campo también indicó una presencia de sílica amorfo. Sin embargo, la ceniza de calentador contenía principalmente sílice en forma cristalina, de acuerdo con la interpretación del patrón de difracción. La temperatura del proceso de quemado del calentador pudo haber excedido la temperatura límite, a la cual se lleva a efecto la transformación de fase amorfa a fase cristalina. Otra razón para el cambio de fase también puede ser el quemado prolongado en el calentador. También se obtuvo el patrón de difracción de rayos X para el polvo de cáscara de arroz, y la interpretación indicó que ésta también contenía sílice amorfo.

RESISTENCIA A LA COMPRESION DE MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND CCA.

La discusión sobre la resistencia a la compresión a diferentes edades del cemento Portland CCA se puede dividir en cuatro casos:

a).- Enfriado a temperatura ambiente.- Los resultados de resistencia a la compresión para los morteros de cemento Portland CCA se muestran en la Tabla 4 y Figura 2. Para el rango de temperaturas de quemado investigado, la resistencia a la compresión a los 3 días para los morteros de cemento Portland CCA eran más o menos iguales a la del cemento Portland normal, excepto para la CCA obtenida a 200°C que dio una resistencia a la compresión relativamente baja. Se observó que la CCA obtenida a 800°C dio la resistencia más alta. La resistencia a la compresión a los 7 días para la CCA obtenida para todas las temperaturas de quemado fue menor que la del cemento Portland normal (CPN). Esto indicó que la rapidez de ganancia de resistencia a edades tempranas fue más lento para el cemento Portland CCA que para el CPN. El promedio de ganancia de resistencia para morteros de cemento Portland CCA, de los 3 a los 7 días, fue del 47%, mientras que para el CPN fue de 111%. Se encontró que la resistencia a la compresión a los 28 días fue más alta para los morteros con cemento Portland CCA que para los de CPN. Esto fue cierto para todas las temperaturas de quemado, excepto para 200°C. La resistencia a los 28 días de morteros con CCA obtenida a 200°C fue considerablemente menor que la del CPN, y que de la resistencia del mortero con cemento Portland CCA. El promedio de ganancia en resistencia de los 7 a los 28 días para morteros con cemento Portland CCA, fue del 72%, mientras que para el CPN fue de sólo 20%. Esto se muestra claramente en la Fig. 2. Se puede observar de la Tabla 4 que, entre todos los tipos de CCA ensayados, la CCA obtenida a los 200°C dio las resistencias más bajas, mientras que la CCA obtenida a 800°C dio las mayores, sin importar la edad del ensaye. En general, el cemento Portland CCA mezclado en proporción 70:30 en peso dio resistencias a la compresión a los 28 días satisfactorias, en comparación con las del CPN. Sin embargo, fue menor el desarrollo de la resistencia hasta los 7 días del cemento Portland CCA.

b).- Enfriado a 5°C.- Los resultados de ensaye de resistencia a la compresión para morteros de cemento Portland CCA se muestran en la Tabla 5 y Figura 3. La resistencia a los 3 días de los morteros con cemento Portland CCA fue mayor que la del mortero con CPN. La excepción fue la CCA obtenida a 200°C, la cual resultó sumamente baja. Se observa que la CCA obtenida a 800°C dio la

mayor resistencia, que en este caso fue 65% mayor que el CPN. Los resultados de ensaye muestran que la resistencia a los 7 días para la CCA fue más o menos igual a la del CPN, excepto para la CCA obtenida a 200°C. La Figura 3 demuestra que la resistencia a la compresión a edades tempranas de los morteros de cemento Portland CCA fueron similares a la de los morteros con CPN. El promedio de ganancia en resistencia para los morteros de cemento Portland CCA de los 3 a los 7 días fue del 69% mientras que para los morteros de CPN fue de 111%. La resistencia a la compresión a los 28 días para los morteros de cemento Portland CCA fue más o menos igual a la del CPN. La excepción fue para la CCA obtenida a los 200°C, cuya resistencia a la compresión se aproximaba a la del CPN. El promedio de ganancia en resistencia a la compresión de los 7 a los 28 días fue de 44% para el cemento Portland CCA, y de solamente el 20% para el CPN. Es de interés notar que la rapidez de ganancia en resistencia para el mortero con cemento Portland CCA obtenida a 200°C fue considerablemente alta. Se encontró que los incrementos en ganancia de los 3 a los 7 días y de los 7 a los 28 días fue del 78 y 115% respectivamente. Estos incrementos fueron sumamente altos en comparación con los incrementos observados para la CCA a otras temperaturas. En general, los morteros de cemento Portland CCA dieron resistencias a la compresión satisfactorias a los 28 días al compararse con la del CPN.

c).- Comparación entre los dos métodos de enfriado.- A manera de discutir la influencia de los dos métodos de enfriado, se tabularon y compararon en la Tabla 6 las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días para los morteros de cemento Portland CCA para la CCA enfriada a temperatura ambiente y la enfriada a 5°C. Se obtuvo la relación expresada en porcentaje entre la resistencia de los morteros de cemento Portland CCA enfriada a 5°C sobre la de CCA enfriada a temperatura ambiente. Los resultados se incluyen en la Tabla 6. Se puede apreciar que la resistencia a los 7 días para la CCA enfriada a 5°C se mejoró significativamente. Sin embargo, debe notarse que las resistencias a los 28 días no se vieron afectadas por los métodos de enfriado. Comparando la influencia del enfriado a temperatura ambiente y la de 5°C, el enfriado a 5°C ayuda a mejorar el desarrollo de la resistencia inicial de los morteros de cemento Portland CCA, mientras que las resistencias a los 28 días eran iguales para los dos métodos de enfriado.

d).- Efecto de la temperatura de quemado de la CCA.- La reaccionabilidad de la CCA se reconoció a través de la resistencia a la compresión de los morteros de cemento Portland CCA. Aun cuando se encontró sílice amorfa en todas las muestras de CCA obtenidas mediante quemado a 300°C hasta 800°C, hubo diferencia significativa en la resistencia a la compresión de los morteros. Por lo tanto se puede decir que además del sílice amorfo, las temperaturas de quemado jugaron un papel importante en la reaccionabilidad de la CCA.

La Figura 4 muestra la variación en las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días con respecto a las temperaturas de quemado. Los dos juegos de curvas para la CCA obtenida mediante los dos métodos de enfriado muestran un patrón similar. En general, se puede decir que la CCA obtenida a 800°C arrojó la resistencia más alta, mientras que la CCA obtenida a 500°C dio resultados pobres. De entre las temperaturas de quemado investigadas, la CCA obtenida a 400°C