

USO DE LA ESCORIA COMO UN MATERIAL DE MEZCLADO EN EL LUGAR.

En la presente investigación, la escoria se ha tratado como otro ingrediente de mezclado en el concreto, siendo mezclada con el cemento manualmente antes de hacer la revoltura. La escoria también puede añadirse directamente a la mezcladora, un método que parece tener cierto número de ventajas, siendo la principal que la relación de cemento a escoria se puede variar según se desee. Como las escorias son duras y requieren más energía para molerla, entremoliéndola con el clínker de cemento Portland, el cual es más suave, puede resultar con fineza excesiva el componente del cemento Portland. Además de las consideraciones de ahorro en energía, la entremolienda puede ser también menos atractiva por la variación en el consumo de energía que es aproximadamente el cuadrado del valor de la fineza por el método de Blaine (17).

OBJETO DE LA INVESTIGACION.

En este estudio, se hicieron un total de 32 mezclas de 0.062 m^3 . La relación Agua:Cemento + escoria (A:C+E) de las mezclas variaron de 0.30 a 0.65 y el porcentaje de escoria usada para reemplazar al cemento Portland normal varió de 25 a 65% respecto al peso de cemento. Todas las mezclas fueron con aire incluido y a algunas se les añadió un superplastificante además del agente incluyente de aire. Se fabricaron cilindros de $100 \times 200 \text{ mm}$ para ensayos de compresión axial y tensión diametral a edades mayores de un año. También se fabricaron prismas de $90 \times 100 \times 405 \text{ mm}$, para determinar la resistencia a la flexión y la resistencia en ciclos de congelación y deshielo de acuerdo con el procedimiento B del estándar C-666 de A.S.T.M.

MEZCLAS DE CONCRETO.

Las mezclas de concreto se hicieron en el laboratorio de CANMET entre marzo y julio de 1978 usando los siguientes materiales:

CEMENTO:

Cemento Portland normal, CSA Tipo 10 (ASTM Tipo I), fue usado. Sus propiedades físicas y Análisis Químico están dadas en la Tabla 2.

AGREGADOS.

El agregado grueso fue de caliza triturada de menos de 19 mm y arena local como agregado fino. Para guardar la granulometría uniforme para cada mezcla la arena fue separada en fracciones de diferente tamaño que fueron luego combinadas para una granulometría específica. La granulometría de los agregados grueso y fino están dadas en las tablas 3 y 4.

AGENTE INCLUSOR DE AIRE.

Un agente incluyente de aire (AIA) del tipo hidrocarburo sulfonado se usó en todas las mezclas.

SUPERPLASTIFICANTE.

Se usó un condensado de melamina formaldehído sulfonado de origen alemán. Se utiliza como un 20% de solución acuosa con una densidad de 1100 Kg/m^3 y es transparente a ligeramente turbio o lechoso en apariencia.

ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO.

Desde una planta en Hamilton, Ontario, la escoria se usó como un reemplazo parcial en el cemento. La escoria y el cemento fueron mezclados manualmente antes de meterlos a la mezcladora. Las propiedades físicas y el análisis químico de la escoria está dado en la tabla 2.

La fineza de la escoria fue de $4,656 \text{ cm}^2/\text{g}$ y la gravedad específica 2.7 g/cm^3 .

PROPORCIONAMIENTO:

Los proporcionamientos de las mezclas de concreto están resumidas en la tabla 5. Para todas las mezclas, los agregados gruesos y finos se pesaron en condiciones de cuarto seco.

El agregado grueso se saturó en agua durante 24 hrs.; el exceso de agua se decantó y el agua retenida por el agregado se determinó por diferencia de pesos. Una cantidad predeterminada de agua se añadió al agregado fino el cual se mantuvo en reposo durante 24 horas.

Se hicieron cinco series de mezclas de concreto. Las mezclas de ensayo en las Series A y E tenían una relación A:C+E de 0.30 y 0.65 en peso respectivamente. Las mezclas de ensayo en las series B, C y D cubrían relaciones A:C+E de 0.38, 0.46 y 0.56 respectivamente. Los especímenes de ensayo para las mezclas Series A y E se usaron para la determinación de la resistencia a la compresión a edades tempranas. En tanto que los de las mezclas Series B, C y D, se usaron para la determinación de la resistencia a la compresión a edades mayores de un año, así como para la determinación de la resistencia a la flexión, tensión por compresión diametral y la durabilidad a la congelación y al deshielo.

El concreto preparado en laboratorio se mezcló durante un total de 6 minutos, excepto para aquellos a los que se le añadió superplastificante. En estas últimas mezclas, el superplastificante se añadió al final de los 6 minutos, y el concreto se mezcló por un tiempo adicional de 2 minutos.

PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

Las propiedades de las muestras del concreto fresco como son: Temperatura, revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire están dadas en la Tabla 6.

PREPARACION Y MOLDEO DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYE

Mezclas de concreto No. 1 a 4 (Series A) y 29 a 32 (Series E)

20 cilindros de 100 x 200 mm. se moldearon de cada muestra. Todos los cilindros, se moldearon en dos capas, cada capa se compactó usando un vibrador plano. Después del moldeo, todos los especímenes se cubrieron con costales de ixtle húmedo y guardado en el cuarto de moldeo a $24 \pm 1.3^\circ\text{C}$ y humedad relativa de 50% durante 24 horas. Luego se desmoldearon y llevaron al cuarto de curado durante el tiempo requerido para los ensayos de compresión a edades de 1, 2, 3, 5, 7, 21 y 28 días.

MEZCLAS DE CONCRETO No. 5 a 28 (Series B, C y D).

Se usaron 25 cilindros de 100 x 100 mm y 25 prismas de 90 x 100 x 405 para el moldeo de cada mezcla. Todos los cilindros y prismas se moldearon en dos capas y los moldes se compactaron usando un vibrador plano. Después del moldeo todos los especímenes se cubrieron con costales de ixtle húmedos y guardados en el cuarto de moldeo a $24 \pm 1.3^\circ\text{C}$ y 50% de humedad relativa por 24 horas. Se desmoldaron y se llevaron al cuarto de curado donde permanecieron el tiempo requerido para los ensayos.

ENSAYE DE LOS ESPECIMENES.

Los especímenes moldeados se ensayaron a compresión, flexión, tensión por compresión diametral y a congelación y deshielo a varias edades, de acuerdo con el plan de la tabla 7. Todos los especímenes para ensayos a compresión se recaparon con una mezcla de azufre y arena cuarzosa antes del ensaye. Los ensayos de compresión y tensión por compresión diametral se hicieron con una máquina de 272,000 kg de capacidad. Los de flexión con una de 27,200 kg de capacidad.

Los ensayos de congelación y deshielo se realizaron en una unidad automática de congelación y deshielo con capacidad de 8 ciclos por día (un ciclo completo va desde $4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$ a $-17.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$, y regresar a $4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$ tomando alrededor de 3 horas. Al final del período inicial de 14 días de curado húmedo la temperatura de cada conjunto de prismas se redujo hasta una temperatura uniforme de $4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$ colocando el gabinete en la fase de deshielo durante una hora. La medida inicial y todas las anteriores de los especímenes de congelación y deshielo y los especímenes para ensaye de referencia se hicieron a esta temperatura. Después que las medidas iniciales de los prismas fueron tomadas, se colocaron dos prismas en el gabinete para ensayos de congelación y deshielo y dos prismas de comparación dentro del cuarto de curado para propósitos de referencias.

Los especímenes, ensayados a congelación y deshielo, se examinaron visualmente al final de cada 50 ciclos de intervalo. Se midieron sus longitudes y sus pesos también, se ensayaron por frecuencias de resonancia y por el método

de PUNDIT' aproximadamente a cada 100 ciclos de intervalo. El ensaye de congelación y deshielo se terminó a los 700 ciclos excepto en los prismas que hubieran fallado antes de completar los ciclos programados. Enseguida, tanto los prismas de referencia como los de congelación y deshielo se ensayaron a flexión.

RESULTADOS DE ENSAYES Y SUS ANALISIS

Se ensayaron en total 760 cilindros y 144 prismas. Las densidades de los cilindros de ensaye fueron tomadas 24 horas antes del ensaye; datos seleccionados son mostrados en la tabla 8. El incremento en la demanda para el AIA con el incremento en los porcentajes de escoria se encuentran en las figuras 1 y 2. Un resumen de las resistencias a compresión, flexión y tensión por compresión diametral está dado en las tablas 9 a la 12 y los datos se muestran en las figuras 3 a la 13. La variación en los datos de resistencia con respecto a las bachadas está dada en las tablas A1 y A2 del apéndice.

Los cambios en el peso, longitud, velocidad de pulso y frecuencia de resonancia de los prismas de referencia y los de aquellos sujetos a ciclos de congelación y deshielo se muestran en la tabla 13 y un resumen de la resistencia a la flexión de cada uno de ellos se muestra en la tabla 14.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYE.

COLOR.-

Inmediatamente después del ensaye, la porción central de los especímenes de prueba de escoria, se caracterizó por un color verde azulado el cual fue desapareciendo después de dejarlos varios días expuestos al aire en el laboratorio.

El color fue atribuido a la presencia de sulfuro de calcio en la escoria y su decoloración es debida a la oxidación de sulfuros en el aire seco (18).

REQUISITOS DEL AGUA

El programa de ensayos fue diseñado para mantener la relación Agua: Cemento + Escoria (en peso) constante para cada una de las series, con la cantidad de agua requerida para obtener un revenimiento de 75 ± 10 mm. Los datos de los proporcionamientos de mezclas en la tabla 5 indican en general, que la demanda de agua de las mezclas que incluyen escoria es incrementada gradualmente a medida que aumenta el contenido de escoria. Esto fue particularmente en el concreto con una relación A:C+E de 0.30 en peso.

Las razones para esta demanda tan alta de agua pueden ser debidas a la gran superficie específica de las partículas de escoria que es de $1.98 \text{ m}^2/\text{gr}$, comparada con la del cemento Portland que es de $0.99 \text{ m}^2/\text{gr}$, determinada por la técnica de adsorción de Nitrógeno.

No hubo un incremento en la trabajabilidad de las mezclas de concreto

a las que se le añadió escoria, como algunas ocasiones fue reportado (11).

DOSIFICACION PARA UN AGENTE INCLUSOR DE AIRE

La dosificación requerida para un AIA para introducir un volumen de aire deseado se incrementa marcadamente con el contenido de escoria de alto horno (Fig. 1 y 2). Esto confirma los datos publicados (19). Por ejemplo, para un concreto con una relación A:C+E de 0.30 (en peso) la cantidad de aditivo inclusor de aire requerido para incluir un 3.5% de aire se incrementó desde 370 ml/m³ de concreto para las mezclas de control hasta 670 ml/m³ de concreto a las que se les añadió un 65% de escoria.

Sin embargo, para relaciones más altas de A: C + E, el incremento requerido de AIA no fue tan marcado como lo fue para relaciones más bajas. El incremento en la demanda del AIA con el aumento en las cantidades de escoria, está establecido una vez más, que posiblemente es debido a la mayor cantidad de área superficial total de las partículas de escoria.

DOSIFICACION PARA UN SUPERPLASTIFICANTE.

El superplastificante se añadió a la muestra de concreto al finalizar los 6 minutos de mezclado para obtener un revenimiento de 200 ± 10 mm. Para una relación de 0.30 en peso, la dosis requerida de superplastificante para lograr el revenimiento deseado, disminuyó desde 1.3% con respecto al peso del cemento para la mezcla de control hasta 1.0% para las mezclas de concreto a las cuales se les añadió un 65% de escoria. En relaciones de 0.46 y 0.56, no hubo un cambio significativo en la dosis requerida de superplastificante para mezclas con y sin escoria.

A primera vista, parece que los datos anteriores están en desacuerdo con la gran demanda de agua y AIA para concreto con escoria. Un vistazo de cerca en la interacción de los materiales superplastificantes y cemento antes, sugiere que el valor de hidratación característico de los materiales cementantes pudiera estar disfrazando los datos reales. Es hipotético que si los efectos de la hidratación se eliminan y las características de flujo de las mezclas son medidas inmediatamente después de añadir el superplastificante, se puede encontrar que para el mismo flujo la demanda de superplastificante es mayor para concretos con escoria que para concretos de control. Ryan y Munn han reportado resultados de investigaciones en los cuales todo o parte del cemento que ha sido reemplazado por el mismo volumen de ceniza volante en un esfuerzo por acertar si las propiedades del concreto superplastificado fueron afectadas primeramente por cambios físicos o químicos en unidades constituidas (20). Los ensayos mostraron que la reversión del concreto fluido a su estado original era dependiente de la presencia de algún cemento Portland. Sin embargo, cuando no había cemento presente en todas, un incremento inicial típico en la fluidez tomó lugar al introducir el superplastificante, pero la reversión al revenimiento original fue

de un endurecimiento muy gradual en la mezcla durante muchas horas. Malhotra ha mostrado que en concretos superplastificados con cemento de alta alúmina, la reversión al revenimiento original, ocurre extremadamente rápido comparado con los concretos superplastificados de cemento Portland normal (21) por ejemplo, el tiempo de reversión para concretos superplastificados con cemento de alta alúmina fue aproximadamente de 5 min, comparado con los 30 min. para concretos superplastificados con cemento Portland normal, los cuales dependen de la dosificación del superplastificante.

LA ESCORIA COMO MATERIAL DE MEZCLADO EN EL CAMPO.

En esta investigación, el uso de la escoria como otro ingrediente en mezclas de concreto, no presentó ninguna dificultad en el programa de mezclas de laboratorio. La escoria y el cemento se mezclaron manualmente justo antes de mezclar el concreto y no se intentó añadir la escoria directamente a la revolvedora. En una operación de premezclado normal, el mezclado de los polvos finos como la escoria y el cemento no es posible, por lo tanto, la escoria tendrá que ser añadida directamente a la revolvedora.

RESISTENCIA A LA COMPRESION.

Los datos sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión se presentan en las tablas 9 y 10 y en las figuras 3 a la 10. Las resistencias a la compresión expresadas como un porcentaje respecto a los valores de 28 días están dados en la tabla No. 11. El patrón de resistencia desarrollada parece ser diferente para baja, media y altas relaciones A:C+E y éstas se discutirán separadamente.

CONCRETO DE RELACION A:C+E BAJA

Los cilindros de ensaye para concreto con una relación de 0.3 se ensayaron para resistencias desarrolladas a edades tempranas (Fig. 3). A edades mayores de 3 días, las resistencias del concreto al que se le incorporó varios porcentajes de escoria, son considerablemente más bajas que la resistencia de los especímenes de control. A los 28 días, la diferencia entre la resistencia de los especímenes de control y la de aquéllos que se fabricaron añadiéndole la escoria, es limitada, no obstante, aún hay una gran diferencia entre las dos. Por ejemplo, la resistencia a los 28 días de los cilindros de control es de 60.1 MPa, comparada con los 47.0 MPa para concreto que contiene un 65% de escoria, indicando que la resistencia posterior nunca podrá igualarse haciendo caso omiso del porcentaje de escoria usada.

Los especímenes de ensaye para concreto con una relación de 0.38 se ensayaron a edades superiores a un año. Sin tomar en cuenta la edad y el contenido de escoria, los especímenes de ensaye hechos de concreto con escoria siempre fueron considerablemente más bajos en resistencia con respecto a los especí