



MR. RONALD H. MILLS

B I O G R A F I A

El Sr. Ronald H. Mills es profesor de Ingeniería Civil en la Universidad de Toronto. Su área de especialidad es la de materiales con interés especial en micro-estructuras de concreto.

Ha sido profesor visitante en las Universidades de Cambridge y Sydney, y fue un profesor privado en la Technische Hochschule en Braunschweig. Actualmente cuenta con una casa en el Clare Hall en Cambridge.

El profesor Mills es un miembro de los Comités 209 y 307 del ACI, es también miembro de la Sociedad Americana de Cerámica y delegado de la RILEM en Canadá.

EVALUACION DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO COMO CEMENTO.

R. H. Mills*

RESUMEN

La escoria de alto horno(EAH) peletizada puede usarse como agregado o finamente molida y usarse como substitución parcial del cemento Portland.

Para manejabilidad equivalente, resistencia especificada, durabilidad y estabilidad volumétrica, las cantidades de material cementante dependen de la resistencia pretendida, demanda de agua y la correlación entre la resistencia y la relación agua/cementante. El comportamiento del componente de escoria de alto horno (EAH) de un cemento mezclado, se expresa como un factor de eficiencia - no dimensional derivado de la masa equivalente de cemento Portland (CP).

* Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Toronto, Toronto M5S 1A4 Canadá.

INTRODUCCION

La producción mundial de cemento Portland (CP) es aproximadamente de 803 MT por año, requiriendo 5.6×10^9 GC de energía para producirse. Esto es aproximadamente el 2% del consumo mundial de energía, equivalente a 212 millones de toneladas de carbón (MICE) (1, 2).

Las plantas de cemento Portland más eficientes en consumo de energía, requieren 3,400 MJ/T de cemento. Esto puede compararse con el promedio Norteamericano de 6,600 MJ/T y el mínimo irreducible para la conversión química de materias primas = 1780 MJ/T (3).

La escoria de alto horno (EAH) en estado vítreo, posee energía "encontrada", la cual puede ser liberada por medio de exposición al agua y un activador apropiado como el Hidróxido de Calcio o cemento Portland. El procesar la escoria de alto horno peletizada para que actúe como un cemento hidráulico, requiere solamente de 750 MJ/T menos de 1/4 de la energía requerida en la planta de cemento Portland (CP) más eficiente. Hasta ahora, la oposición al uso de la EAH como un reemplazamiento parcial del CP proviene de la estrategia comercial basada en la energía relativamente barata.

La escalada de costos de la energía, y la necesidad de conservar la energía a pesar del costo, han situado a la escoria de alto horno en lugar prominente como viable sustituto del cemento Portland. La escoria puede agregarse a la carga del horno, puede molerse juntamente con cemento Portland (CP), puede molerse separadamente y luego mezclarse con el cemento Portland en la fábrica de cemento, o puede venderse, después de molerse, para ser añadida en la revolvedora de concreto. Puesto que la escoria de alto horno es más dura que el cemento Portland, el molido de una mezcla de ambos, conduce a un cemento Portland extra fino y a una EAH gruesa. Lo experimentado en Sud-Africa, Australia, el Reino Unido y Canadá ha mostrado que no hay diferencia entre el comportamiento de una mezcla de cemento Portland/escoria de alto horno (CP/EAH), hecha en la revolvedora de concreto, comparada con aquella que es pre-mezclada en la fábrica de cemento.

En la experiencia del que esto escribe, la versatilidad ofrecida de mezclar en la revolvedora de concreto, compensa ampliamente el costo de controlar un ingrediente extra.

El principal propósito de este trabajo es ofrecer un método de ensayar el valor de cualquier combinación posible de CP/EAH sobre la base de parámetros tales como la relación entre la resistencia y la relación agua/cemento y la demanda de agua.

Es un asunto de experiencia común que las mezclas cemento portland/escoria de alto horno (CP/EAH), tienen demanda de agua más baja para la misma manejabilidad, pero también requieren valores más bajos de relación agua/cemento para igualar la resistencia comparable del concreto de cemento Portland especialmente a edades tempranas.

El concreto hecho con mezclas de CP/EAH tiene menos variabilidad, según mediciones por medio de la desviación estándar, que aquél que se hace con solamente CP como cementante. De este modo, el margen entre la resistencia pretendida y la resistencia especificada puede reducirse cuando se usa cemento mezclado.

Usualmente se supone, con algo de justificación, que las propiedades deseables del concreto, varían con la resistencia y ésta se refleja en la Bibliografía y en la mayoría de las especificaciones. Antes de discutir un procedimiento en el cual la manejabilidad del concreto fresco y la resistencia del concreto endurecido son los únicos criterios de calidad, es tal vez apropiado, discutir brevemente algunos otros atributos del cemento Portland (CP) y de la relación cemento Portland/escoria de alto horno (CP/EAH), los cuales pueden, en circunstancias especiales hacer destacar el criterio acerca de la resistencia.

OTROS ATRIBUTOS, ADEMAS DE LA RESISTENCIA, DEL CONCRETO ENDURECIDO.

DURABILIDAD

El constituyente más soluble de la pasta de CP endurecida, es el Hidróxido de Calcio (CH). Cuando la EAH se mezcla con CP consume Hidróxido de Calcio (CH) en una cantidad de aproximadamente un 30% de la masa de la escoria de alto horno. Siendo así, las mezclas de CP/EAH son inherentemente más resistentes a los agentes agresivos, tales como sulfatos (5, 6).

Las mezclas de CP/EAH son, sin embargo, más sensibles a la carbonatación (7) y esto requiere consideración especial cuando el concreto va a estar expuesto a una atmósfera densamente contaminada. Cuando la EAH es activada por medio de yeso y cal (YC/EAH) en lugar de cemento Portland, el cemento resultante es de fraguado lento pero resistente a ambos, sulfatos y carbonatación.

El calor de hidratación es aproximadamente el mismo para la misma resistencia en mezclas de CP/EAH de diferentes proporciones (5) pero la velocidad de evolución de calor, disminuye a medida que aumenta la proporción de EAH. Esto aligera el problema de escasa durabilidad debido a los esfuerzos térmicos en el concreto fresco.

A causa de que la EAH consume hidróxido de calcio (CH) en grandes cantidades, el riesgo de la reacción álcali-agregado disminuye (8); pero, paradójicamente, la incorporación de EAH no reduce el ataque de los álcalis al vidrio en el concreto reforzado con vidrio (9).

La EAH se usa como componente moderador en los cementos compensados por contracción y en cementos expansivos.

ESTABILIDAD VOLUMETRICA

Se ha mostrado (11) que ambos, el flujo plástico y la contracción del

concreto con una proporción de 50/50 CP/EAH es mayor que el de proporción 100/0 CP/EAH. Este es un asunto de apreciación individual, pero se necesita tener cuidado al interpretar los resultados de los ensayos. La resistencia al agrietamiento, es más importante que la contracción, y a este respecto las mezclas CP/EAH son generalmente superiores al CP, aunque los ensayos de contracción pueden indicar lo contrario.

DATOS PARA QUIEN HACE EL PROPORCIONAMIENTO

PARAMETROS BASICOS

Al determinar el proporcionamiento de concreto que satisfaga una resistencia específica $f'c$, el ejecutante requiere la siguiente información:

- a) La resistencia pretendida: En Canadá es

$$\sigma = f'c + 1.45 \quad \text{para } s \leq 3.5 \text{ MPa;}$$

$$\text{o } \sigma = f'c' + 2.45 - 3.5 \quad \text{para } s > 3.5 \text{ MPa}$$

- b) La proporción entre la relación agua/cemento W_0 y la resistencia σ
- c) La manejabilidad requerida.
- d) Las características agua/demanda W en l/m^3 para que los agregados den la manejabilidad deseada.

ESTIMACION DE LAS PROPORCIONES DE LA REVOLTURA

Habiendo determinado W y W_0 , la masa de cemento está dada por:

$$C = W/W_0 \text{ kg/m}^3$$

El volumen de la pasta de cemento es

$$V_p = W \left(1 + \frac{1}{W_0 g_c} \right) l/m^3$$

La masa del agregado es

$$A = g_a (1000 - V_p) \text{ kg/m}^3$$

La masa de agregado grueso es aproximadamente

$$A_c = 400 g_a$$

La masa de agregado fino es entonces

$$A_f = A - A_c$$

EXPERIMENTACION

El programa fue diseñado para obtener información sobre la relación -- agua/cemento, la resistencia, la manejabilidad y la demanda de agua de manera -- que la EAH pudiera evaluarse en términos de la relación entre las masas de CP/EAH necesarias para obtener el mismo comportamiento, tanto para la manejabilidad como para la resistencia.

MATERIALES

La composición de los óxidos de los materiales cementantes está dada -- en la Tabla 1 y la graduación de agregados en la Tabla 2.

MANEJABILIDAD

La manejabilidad fue medida por medio del ensaye de revenimiento, el -- ensaye Vebe (V-B) y por la prueba del factor de compactación DIN 1048. En ensaye V-B no fue útil, excepto para bajo grado de manejabilidad. Los otros dos ensayos fueron ambas satisfactorios para los rangos de variación de manejabilidad mostrados en la Tabla 3.

El ensaye con la mesa de fluidez no se llevó a cabo, pero aquí se registran valores equivalentes (12) para tener una referencia fácil.

Las tres categorías de manejabilidad definidas en la Tabla 3, fueron -- determinadas para 5 relaciones agua/cemento variando desde 0.35 a 0.85. Para cada relación agua/cemento, se midió la manejabilidad en un proporcionamiento básico, conteniendo un 70% en volumen de agregado. La revoltura fue entonces regresada a la revoladora y la manejabilidad ajustada añadiendo pasta de cemento para una consistencia más fluida o añadiendo agregado para rigidizar la mezcla. La relación agua/cemento se mantuvo constante hasta que la relación en volumen de -- pasta de cemento a agregado, fue determinada para cada manejabilidad pre-establecida.

DATOS DE RELACION AGUA/CEMENTO (W) Y DE RESISTENCIA (σ)

Los datos de resistencia y de la relación agua/cemento fueron acumulados a partir de un número de programas de ensayos independientes usando los mismos materiales que fueron usados para los ensayos de manejabilidad. Fueron desarrolladas ecuaciones de regresión de la forma $\log \sigma = A + B (W_0)$ para resistencias de cilindros de 100 x 200 mm curados a 22°C durante 7 y 28 días.

ENSAYES A BAJA TEMPERATURA

En un experimento por separado, se hicieron cubos de mortero de 50 mm. con proporciones en masa de 2.75:1 :0:45 de arena Ottawa*: CP + EAH/agua. Estos fueron curados a 2°C, 10°C y 23°C para edades variando de 1 a 112 días.

RESULTADOSResistencia

Las constantes para la ecuación 1 están dadas en la Tabla 4 para varias relaciones CP/EAH y 2 edades. Las curvas correspondientes se muestran en las figuras 1 y 2. La Tabla 5 muestra una correlación satisfactoria de los resultados obtenidos en otro laboratorio (13) con valores calculados de acuerdo con la ecuación 1 ó interpolados en la Fig. 2.

DESVIACION ESTANDAR

Las desviaciones estándar de concreto hecho con escoria de alto horno, fueron significativamente más bajas que aquellas hechas con cemento Portland solo. Las relaciones medias de las desviaciones estándar de concreto de CP/EAH a las desviaciones estándar de concreto de CP comparable, están registradas en la Tabla 6 y mostradas en la Fig. 3. Para comparación con estos resultados, se incluyen los resultados de las pruebas de campo (13).

Con base en estos resultados, pareció seguro suponer que la desviación estándar del concreto hecho con una mezcla de CP/EAH sería menos de 0.8 veces la desviación estándar del concreto equivalente hecho con cemento Portland.

Este descubrimiento es consistente con la experiencia de campo en Australia (14), Sud Africa (15) y Canadá (16). En este trabajo, la relación agua/cemento se calculó a partir de las ecuaciones de resistencia sobre la base de

$$\sigma = 1.14 f'_c \text{ para CP/EAH} = 100/0$$

$$\text{y } \sigma = 1.11 f'_c \text{ para CP/EAH} = 75/25, 50/50 \text{ y } 25/75$$

Los valores de la relación agua/cemento W_0 requeridos para encontrar las resistencias propuestas calculados sobre esta base, están dados para varias resistencias específicas en la Tabla 7.

DEMANDA DE AGUA

El volumen específico de agregado V_a requerido para alcanzar tres nive

* A.S.T.M. C109-64

les de manejabilidad está registrado en la Tabla 8. El volumen correspondiente de pasta de cemento es:

$$V_p = 1000 - V_a$$

Los valores de la demanda de agua $W = V_p/W_0$, para cada resistencia propuesta, están dados en la Tabla 9.

MASA DE CEMENTO PORTLAND Y ESCORIA DE ALTO HORNO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE CONCRETO.

La masa de materiales cementantes calculados como:

$$CP = \frac{RW}{W_0} \text{ ; y}$$

$$EAH = \frac{(1-R)W}{W_0} \text{ ; donde}$$

$$R = \text{porcentaje de cemento Portland}/100$$

Los valores de CP y de EAH para cada combinación de resistencia/manejabilidad, están dados en la Tabla 9.

FACTOR DE EFICIENCIA N

Supongamos que dos revolturas de concreto tienen la misma manejabilidad y que ambas satisfacen el requerimiento:

$$\sigma = f'_c + 1.4 s$$

Supongamos además, que un proporcionamiento contiene C kg/m³ de CP y la otra contiene P kg/m³ de CP y B kg/m³ de EAH.

Luego C-P kg de cemento Portland es equivalente a B kg de escoria de alto horno en cuanto a comportamiento.

El factor de eficiencia de escoria de alto horno se define como:

$$n = \frac{C-P}{B}$$

donde $n > 1$; la EAH es superior al CP y la correspondencia es cierta si $n < 1$.

La recíproca $1/n$ es la relación en masa de escoria de alto horno/cemento Portland que se necesita para un comportamiento equivalente.