

Caracterización del curado del hormigón en elementos estructurales de tipología superficial ⁽¹⁾

FRANCISCO JAVIER SAINZ DE CUETO TORRES (*)

RESUMEN. Se presenta un Método que permite una correcta caracterización del curado del hormigón después de su ejecución.

El campo de aplicación, que potencia el estudio, es el de los elementos estructurales de tipo superficial, donde los pavimentos de hormigón manifiestan una especial relevancia. En los elementos superficiales la casuística del curado es más amplia y compleja. El sistema deberá englobar la interacción entre el hormigón y su entorno ambiental, contemplando los intercambios termohigrométricos de la superficie.

El Método reduce a doce las variables en consideración además del tiempo transcurrido, ofreciendo una sistemática en el seguimiento integral del fenómeno.

Una de las etapas esenciales es la evaluación de la hidratación en función de la eficacia del curado aplicado y su repercusión en las características mecánicas del hormigón.

Se considera la resistencia a flexotracción como parámetro representativo de singular importancia, analizándose la influencia en la misma de la eficiencia de retención húmeda. La experimentación desarrollada muestra, de forma paralela, la importancia de un curado bien diseñado sobre la hidratación de la pasta de cemento, optimizando sus fracciones volumétricas. La aplicación de tratamientos superficiales con productos filmógenos resulta de una gran utilidad para la verificación experimental del Método.

CHARACTERISTICS OF CONCRETE HARDENING IN STRUCTURAL ELEMENTS ON THE SURFACE

ABSTRACT. In this paper is settled a new Method for the proper characterization of the curing of concrete after its casting. The clear open application field, established by the study, is on the structural surface elements with shallow typology, where concrete pavements fill a noticeable place.

Control of curing on surface members gets a wider and more complex casuistry, because the system ought to be enlarged in order to enclose interaction between concrete and environmental conditions. Therefore the planning must have a more general aim and include the thermal and hygrometrical interchanges that takes place through the surface.

The present Method decrease the number of deterministic variables taken into account to twelve, in addition to the passed time, and offer a clear procedure for the full survey of the phenomena. One of the main steps into the Method is the hydration valuation, in relation with the efficiency of the applied curing, and its effect on the mechanical properties of the obtained concrete.

Flexural strength has been taken into consideration as a convenient representative parameter of the strength development of concrete and analysis of the water retention efficiency influence has been carried out.

Simultaneously, developed testing shows the importance of a competent curing on the cement matrix hydration, by improving its relative volume fractions.

The curing procedure by superficial membrane-forming curing compounds was very useful for experimental verification of the Method, because graduation in moisture retention was easily admitted. Conclusions of this work point out several lacks in the standards and in force regulations. Some solutions are supplied to correct the present situation. Likewise new investigations lines are open for studies in the future.

(1) Este artículo ha sido presentado como ponencia en el Congreso Internacional del Hormigón Preparado, Madrid, 23-26 junio 1992.

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Sector Ciencia de Materiales, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. MOPT.

INTRODUCCION

La tendencia al máximo control posible sobre el curado de un hormigón es una de las decisiones de mayor trascendencia en el logro de un hormigón de calidad. En elementos prefabricados cabe el establecimiento de un control activo pudiendo actuarse sobre la mayoría de los parámetros implicados. En general es más frecuente

el establecimiento de un **control pasivo** en donde determinados parámetros sólo admitirán su seguimiento. Hay condicionantes de **difícil control** como el clima. Otros pueden catalogarse como de **relativo control** como el hormigón diseñado. Finalmente, otros estarán en el terreno del **posible control**, como la temperatura de puesta en obra del hormigón, el tratamiento superficial, etc. En elementos superficiales la casuística del curado es más compleja y, en muchos casos las hipótesis de partida son más discutibles.

DESARROLLO DEL METODO

El Método para la Caracterización del Curado en Elementos Superficiales de Hormigón pretende aportar una sistemática operativa, clara y concisa, que pueda ser orientadora en los estudios de valoración del curado y madurez del hormigón y permita racionalizar sus aplicaciones prácticas.

La primera cuestión que sugiere el planteamiento podría ser la siguiente:

¿Se trata de un método de previsión, para su utilización «a priori» en el sondeo previo de hipótesis, proyecto y programación de obra?, o bien ¿Se trata de un método de seguimiento y valoración «a posteriori», utilizable por tanto en la cuantificación de las características del hormigón puesto en obra, recepción del mismo, homologación de productos de curado, etc.?

La respuesta es que el Método puede servir para

cubrir el doble objetivo, siempre que se consideren adecuadamente sus hipótesis y aspectos operativos.

El Método se organiza en diferentes fases y etapas sucesivas. Los distintos pasos pueden modelizarse y formularse matemáticamente para ciertas variables, que son perfectamente deterministas y susceptibles de establecimiento en su caso.

Por otra parte, existen variables aleatorias o de difícil valoración y control, que pueden exigir un tratamiento estadístico y una experimentación de apoyo. Cuando se pueda disponer de experiencias previas suficientes, la experimentación de apoyo puede irse reduciendo o eliminando, transformándose los parámetros aleatorios o de difícil control en datos contrastados por la práctica.

El Método propuesto se estructura de forma que pueda informatizarse con facilidad y admita la aplicación de Sistemas Expertos para el perfeccionamiento de aplicaciones concretas.

En cualquier caso, no parece aconsejable, en una materia tan empírica como el curado, prescindir totalmente del apoyo de laboratorio. Pese a ello, una programación adecuada del Método, exclusivamente matemática, nos dota de una herramienta útil para un conocimiento previo, rápido y suficientemente aproximado de las múltiples hipótesis y posibles circunstancias de curado que queremos probar.

El diagrama de flujo que se diseña debe distribuirse en ciclo cerrado, de manera que las modificaciones suce-

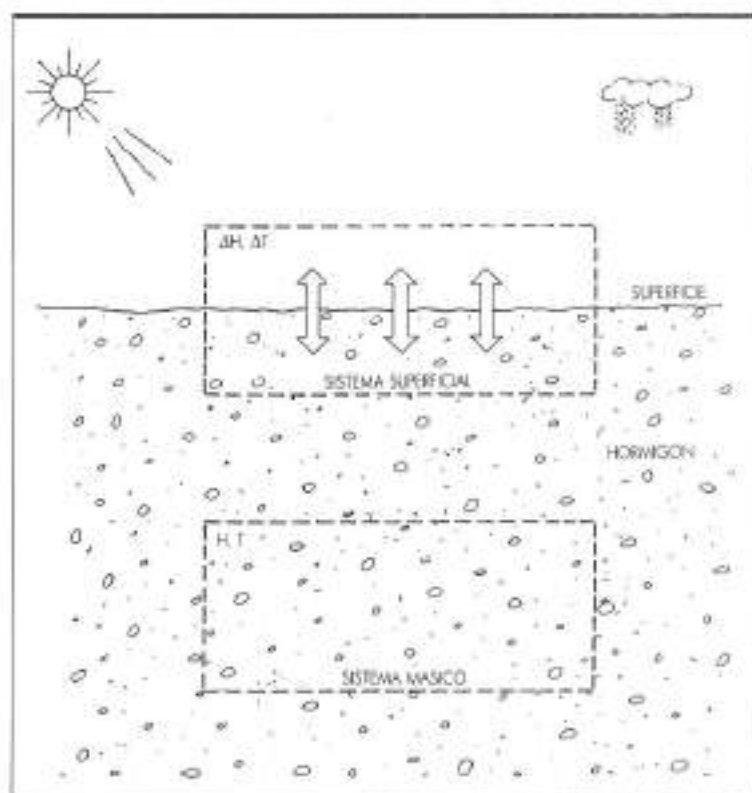


FIGURA 1. Interacción hormigón-ambiente en elementos superficiales.

slas de variables puedan realimentar el sistema, convergiendo por aproximaciones sucesivas a la solución final con unos márgenes de tolerancia.

Las etapas básicas del Método para la Caracterización del Curado son las que se exponen seguidamente:

- Fijación de las variables a considerar.
- Determinación de parámetros indicadores.
- Evaluación de la temperatura interna del hormigón.
- Cálculo de la madurez del hormigón.
- Cálculo del grado de hidratación teórico.
- Evaluación de la hidratación en función del curado.
- Cálculo de la resistencia teórica.
- Evaluación de la resistencia en función del curado.
- Contraste de hipótesis y convergencia del método.

Un esquema general para el diagrama de flujo es el que se indica en las figuras:

- En cuando a fijación de variables a considerar por el Método, en principio se recopilan doce variables deterministas de control o seguimiento, además del tiempo transcurrido desde la finalización del hormigonado.

Existen otras numerosas variables aleatorias o

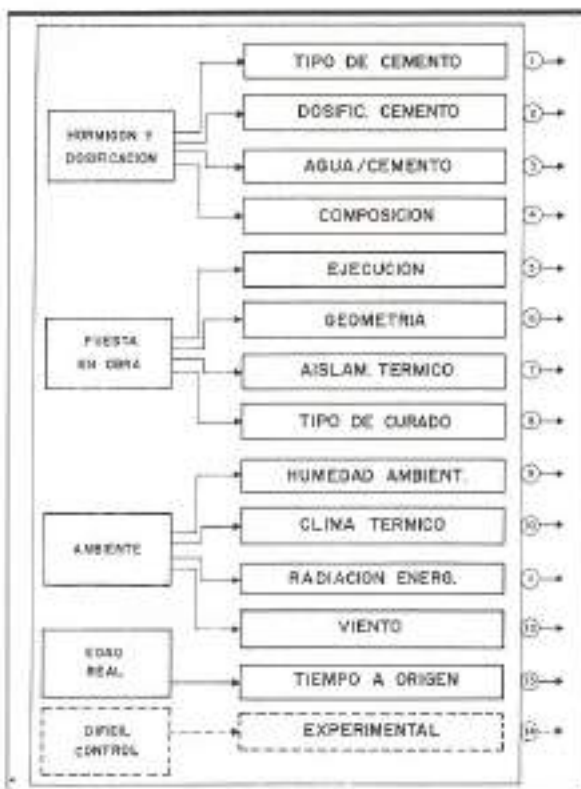


FIGURA 2. Variables por grupos.

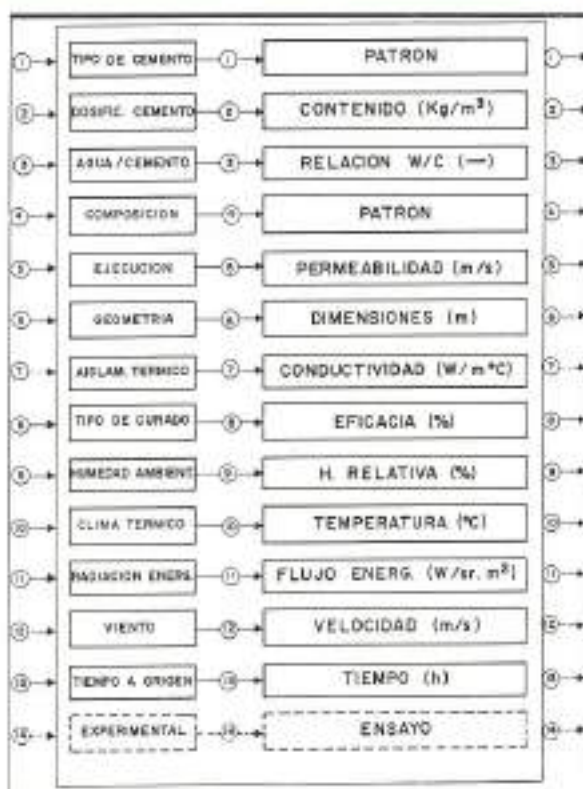


FIGURA 3. Parámetros indicadores.

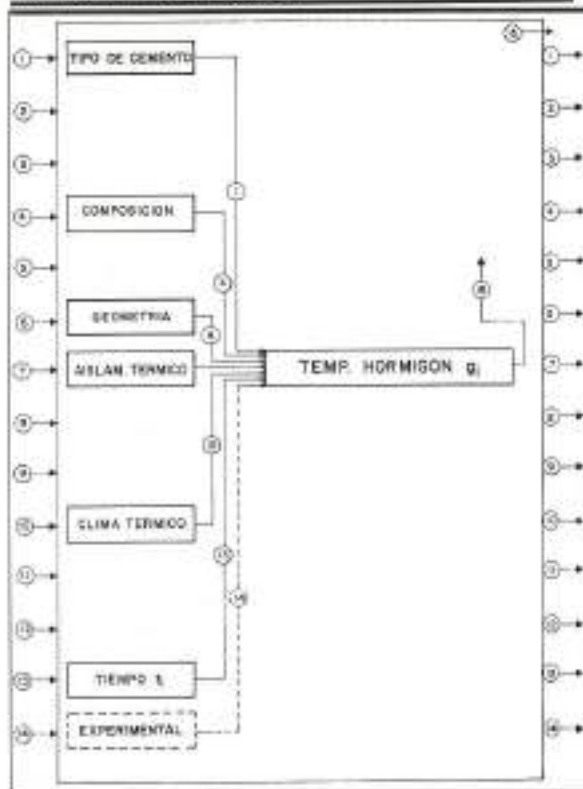


FIGURA 4. Temperatura del hormigón.

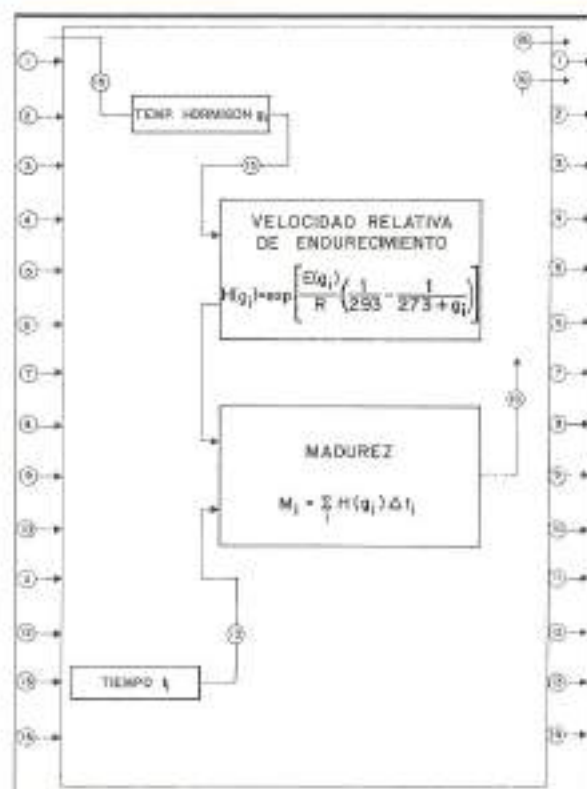


FIGURA 5. Madurez del hormigón.

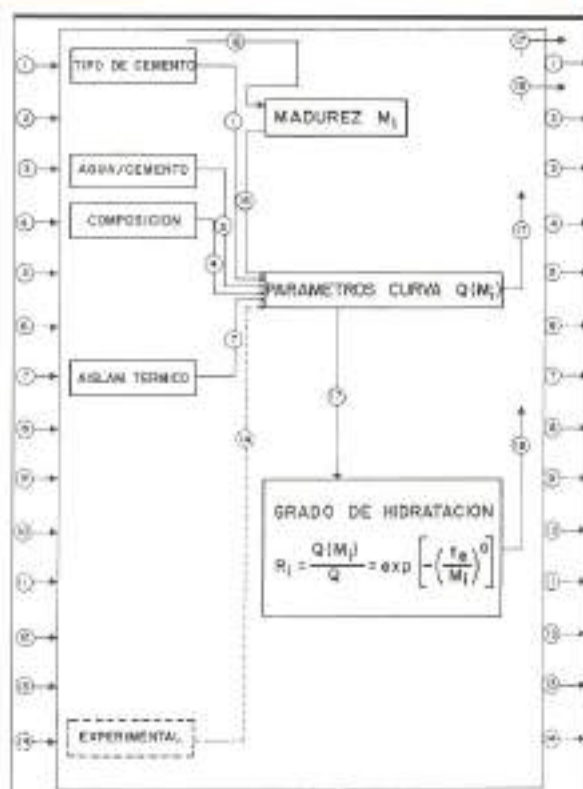


FIGURA 6. Grado de hidratación.

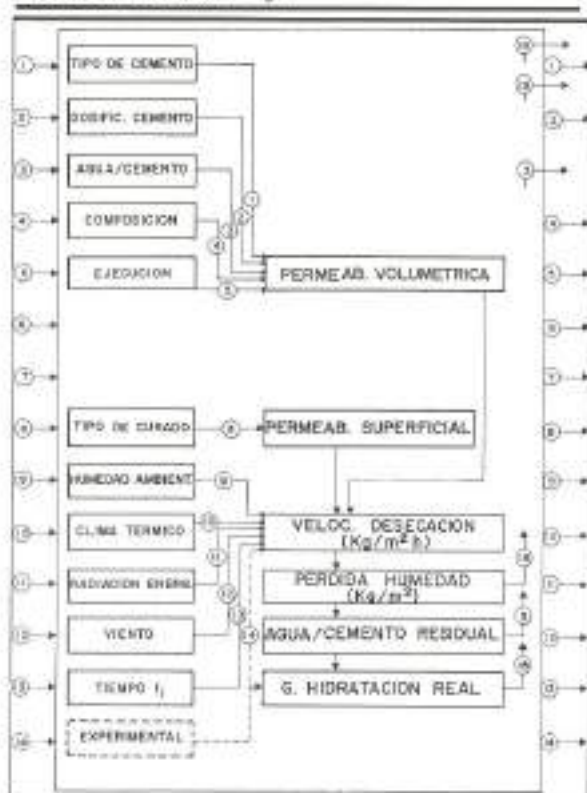


FIGURA 7. Hidratación modificada.

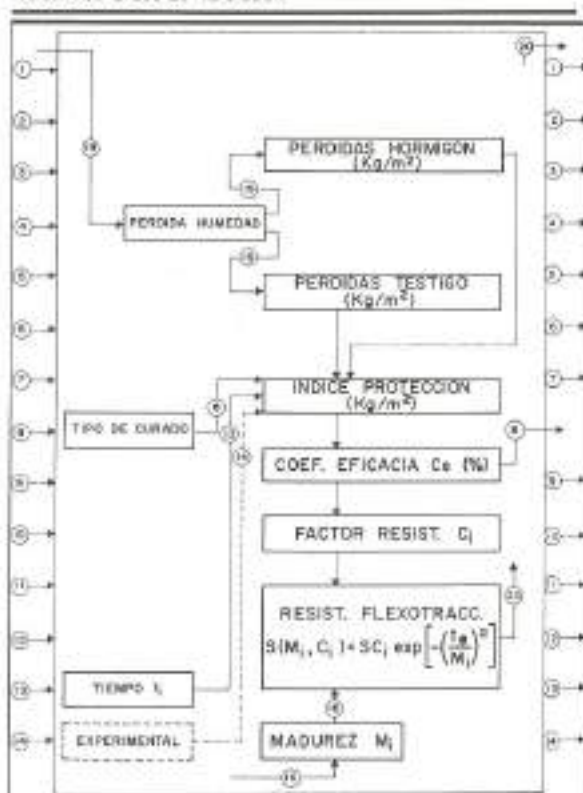


FIGURA 8. Resistencia modificada.

de difícil control, que influyen en el resultado final y precisan de una experimentación de apoyo en laboratorio, o bien de la disposición de un notable bagaje empírico debido a una práctica dilatada, para poder acotarlas acertadamente.

Partiendo de los conocimientos adquiridos durante la experimentación básica desarrollada para el presente trabajo, así como del análisis detenido de trabajos llevados a cabo por otros autores, se han seleccionado las doce principales variables indicadas, que pueden agruparse en tres bloques:

- Grupo de variables concernientes al hormigón y su dosificación.
- Grupo de variables concernientes a la puesta en obra.
- Grupo de variables concernientes al entorno ambiental.

- En cuanto a la Determinación de Parámetros Indicadores, que permitan representar biunívocamente y cuantificar las variables destacadas, es de enorme importancia referir a indicadores de fácil medida y seguimiento durante los procesos.

El conjunto de circunstancias que rodean la ejecución del hormigón durante la puesta en obra y que el Método recoge como una sola variable denominada ejecución, indicativa de la calidad obtenida, puede perfectamente ser representada por un parámetro indicador tan potente como es la propia permeabilidad conseguida. Según se ha señalado, la permeabilidad es un buen índice de la homogeneidad y compacidad logradas con una buena ejecución.

La geometría del elemento de hormigón puede cuantificarse por las dimensiones del mismo. En el caso de elementos superficiales la dimensión fundamental es el espesor. Dicho espesor será determinante de la transmisión térmica y de humedad a través de la masa.

- La Evaluación de la Temperatura Interna del hormigón es un paso preliminar para poder calcular su madurez.

A medida que el tiempo transcurre, a partir de la finalización del hormigonado, la temperatura del hormigón se modifica sucesivamente dando lugar a una historia térmica en el interior del hormigón. De esta manera en cada instante concreto de tiempo t_i se produce una temperatura g_i en $^{\circ}\text{C}$.

Durante el desarrollo del proceso de maduración podemos hacer un seguimiento experimental de las temperaturas internas g_i , mediante la colocación en la masa de hormigón de termopares en los puntos deseados. De tal forma dispondríamos en cada instante t_i de la temperatura g_i y de la historia térmica previa.

- El cálculo de la Madurez del Hormigón en cada instante t_i es una fase esencial en la aplicación del Método propuesto.

Para el desarrollo del presente trabajo se ha partido de la formulación presentada por P. Freisleben

Hansen y E. J. Pedersen, del Concrete and Structural Research Institute 1984, y recogida en el Boletín del Comité Europeo del Hormigón (C.E.B.).

- En cuanto al Cálculo del Grado de Hidratación Teórico, para condiciones no carenciales de humedad, en el desarrollo del presente trabajo se considera la hipótesis razonable de evolución lineal de las fracciones volumétricas de la pasta de cemento portland, en función del grado de hidratación.

El grado de hidratación R , como es sabido, señala el estado de avance de la hidratación del cemento mediante una cifra del intervalo (0,1) entre el comienzo y la finalización del proceso.

Por otra parte, un buen indicador del desarrollo de la hidratación es el calor liberado por las reacciones químicas exotérmicas. Para un sistema cerrado en condiciones adiabáticas el calor emitido, y consecuentemente el grado de hidratación R , se puede expresar en función de la madurez.

$$R = \frac{Q(M)}{Q} = \exp(- (t_0/M)^{\alpha})$$

- En cuanto a la Evaluación de la Hidratación en Función del Curado, el presente trabajo aporta la novedad de incluir en el Método de Caracterización una corrección del Grado de Hidratación, que tome en cuenta las pérdidas de humedad que tienen lugar en la red porosa del hormigón a través de la superficie, dependiendo del tipo de tratamiento superficial que proporcione el curado.

El comportamiento teórico lineal de las fracciones volumétricas de la pasta de cemento se modifica, pues la relación (W/C) agua/cemento ya no es una constante, sino que va disminuyendo la proporción de agua a medida que el tiempo transcurre.

Al ser menor el agua disponible para el progreso de la hidratación, ésta va aminorando su celeridad y, por tanto, el grado de hidratación R_p en un determinado tiempo t_p es inferior al que se lograría si no hubiera pérdidas.

Lo expuesto parece sugerir que sería más realista generalizar el concepto «madurez» (maturity) de manera que englobase la historia de temperaturas y de humedades. No obstante, no parece oportuno tratar de modificar un término con definición tan precisa y aceptada universalmente. Únicamente resaltar su sentido fundamentalmente teórico ligado exclusivamente a la historia térmica del hormigón.

Conocida la velocidad de desecación a lo largo del tiempo podemos integrar la historia previa a cualquier instante t_p para tener las pérdidas de humedad en kg/m^2 acumuladas hasta ese momento.

En laboratorio es muy elemental el seguimiento de las pérdidas acumuladas mediante un control periódico por pesaje de la masa de hormigón ensayada.

La pendiente de la tangente a la curva de pérdidas de humedad acumuladas, en cada instante t_p ,

representa la velocidad de desecación del hormigón a través de su superficie, para dicha edad t_p .

Una vez determinada la ley de pérdidas de humedad, de una cierta masa en estudio de hormigón, es muy simple conocer la evolución de la relación agua/cemento. Como quiera que la relación agua/cemento inicial corresponde a la de amasado, no hay más que restar a la dosificación inicial de agua la pérdida por superficie hasta dicho momento y referir al cemento dosificado.

Como se ha señalado anteriormente la relación agua/cemento residual es la que proporciona el valor del Grado de Hidratación real del proceso de endurecimiento del hormigón.

- En cuanto al Cálculo de la Resistencia Teórica se vincula el proceso al grado de endurecimiento alcanzado por la pasta de cemento y, por tanto, a su madurez.

Como es sabido el concepto de endurecimiento ligado a la madurez es relativamente reciente.

- En cuanto a la Evaluación de la Resistencia en función del Curado, el presente trabajo aporta el aspecto igualmente novedoso de incluir en el Método de Caracterización una corrección de la resistencia teórica del hormigón, que cuente con las pérdidas de humedad que habitualmente sufre la red porosa a través de la superficie.

El desarrollo teórico que hemos supuesto de la resistencia se puede comprobar experimentalmente que es acertado, siguiendo el modelo exponencial negativo de Arrhenius, pero es operativo en el supuesto de que la hidratación de la pasta de cemento de desenvuelva sin alteraciones en la relación agua/cemento, esto es, sin mermas de humedad por evaporación al exterior. Cuando hay aislamiento perfecto con respecto al exterior, o bien el hormigón se encuentra en un ambiente de curado normalizado de laboratorio, el agua de amasado evoluciona según se ha visto y el Grado de Hidratación indica el estado de avance de la hidratación.

Para condicionamientos externos que impliquen pérdidas se ha señalado que es conveniente realizar una corrección para la obtención del Grado de Hidratación Real, en cada instante.

Podemos disponer de la curva de velocidad de desecación a través de la superficie y de la curva de pérdidas acumuladas. También por cálculo podemos disponer de la curva de relación (W/C) en función de la edad y finalmente de la curva de evolución del Grado de Hidratación Real con la edad $R_i(M_i)$.

La secuencia indicada puede aplicarse tanto sobre un hormigón tratado superficialmente con algún producto de curado como sobre un hormigón sin tratamiento. Este último hormigón, que denominamos testigo, se ha fabricado y puesto en obra de idéntica forma y ha tenido una historia similar en el mismo entorno ambiental.

Podemos, pues, realizar un seguimiento de uno y otro hormigón y analizar el desenvolvimiento de la hidratación y de las pérdidas experimentadas por ambos.

En el Método propuesto se define el **índice de protección** como la cantidad de agua, por metro cuadrado (kg/m^2), que el tratamiento superficial realizado ha evitado perder al hormigón en una determinada edad o madurez.

Puede, pues, calcularse, por diferencia entre las pérdidas del hormigón testigo y del hormigón tratado, el Índice de Protección, en función del tiempo t_p , o de la madurez M_i .

También define el Método propuesto el **coeficiente de eficacia** como el valor anterior expresado en tanto por ciento (%) respecto a las pérdidas de agua del hormigón testigo.

La ley seguida por el Coeficiente de Eficacia con la madurez es una curva con aspecto constante, ligeramente decreciente. Los tratamientos suelen ir perdiendo su eficacia con el tiempo, pero la mantienen durante las edades más tempranas, que es cuando su repercusión positiva es importante.

Para valorar con una única cifra la eficiencia de un tratamiento, o producto de curado, se puede dar el valor del Coeficiente de Eficacia de 24 ó 72 h.

El método propuesto define un factor corrector de la resistencia denominado **Factor de Resistencia** C_r , función de la madurez $C_i(M_i)$. Dicho factor representa una minoración de la resistencia dependiendo de la merma de humedad que haya tenido el hormigón durante su hidratación.

Para el cálculo del Factor de Resistencia C_r , el Método considera una variación lineal de la resistencia, para una determinada eficacia de curado, entre la resistencia teórica en condiciones óptimas de humedad y la resistencia del hormigón testigo en las condiciones de humedad más desfavorables.

Se cumplen, por tanto, las relaciones:

$$S(M_i) = S R_i \quad ; \quad S_r(M_i) = S_r R_{ri}$$

donde:

- $S(M_i)$ = Resistencia teórica para madurez M_i (MPa)
- S = Resistencia teórica para M infinita (MPa)
- R_i = Grado de hidratación teórico (-)
- $S_r(M_i)$ = Resistencia testigo para madurez M_i (MPa)
- S_r = Resistencia testigo para M infinita (MPa)
- R_{ri} = Grado de hidratación testigo (-)
- C_r = Coeficiente de Eficacia (%)

El factor de Resistencia viene definido por la expresión:

$$C_r = ((100 - C_e) S_r(M_i) + C_e S(M_i)) / S(M_i)$$

Y la resistencia real modificada viene definida por:

$$S(M_i, C_r) = C_r S(M_i) = C_r R_i S$$

El Método considera la resistencia a flexotracción del hormigón como la más representativa e interesante en las aplicaciones concretas sobre elementos con geometrías esencialmente superficiales.

BIBLIOGRAFÍA

SAINZ DE CUETO, F. J. Método para la caracterización del curado en elementos superficiales de hormigón. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos C. y P. Madrid, marzo 1991.

SAINZ DE CUETO, F. J. Pliego de condiciones para el Estudio de los Productos de Curado en Pavimentos de Hormigón. Informe para la Dirección General de Carreteras. MOPU. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. Madrid, marzo 1990.

SAINZ DE CUETO, F. J. Porosidad, Humedad y Curado del Hormigón. Curso sobre Aplicación de Técnicas Físicas de Análisis al Estudio y Control de Materiales. CEDEX. Madrid, febrero 1990.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. Productos Filmógenos de Curado del Hormigón. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, N.º 14. Madrid, julio 1989.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. Experimentación de Cámara Climática de los productos Filmógenos para el curado de Hormigón. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, N.º 15. Madrid, octubre 1989.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. Comportamiento en

Ambiente Real de los Productos Filmógenos para Curado del hormigón. Ensayo de Retención Diferida. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, N.º 17. Madrid, marzo 1990.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. Estudio en Túnel de Viento de los Productos de Curado. Normativa MELC. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, N.º 18. Madrid, mayo 1990.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. Influencia de la eficacia del curado en la hidratación y porosidad de los hormigones. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, N.º 26. Madrid, septiembre 1991.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. Influencia de la eficacia del curado en la resistencia mecánica de los hormigones. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, N.º 27. Madrid, noviembre 1991.

SAINZ DE CUETO, F. J., y PRENDES, N. Influence of membrane-forming compounds in curing of concrete. Tercer Euroseminario de Microscopía aplicada a los materiales de construcción. Barcelona, septiembre 1991.

HANSEN, P. F., y PEDERSEN, E. J. Curing of Concrete Structures. Concrete and Structural Research Institute, diciembre 1984.

**FLYGT****ALQUILADA**

¡Alquile una bomba sumergible Flygt!

Economía:

Comprar una bomba para un trabajo eventual o transitorio puede ser una inversión poco rentable. Simplemente alquilela, y pague sólo el tiempo que la utilice.

Disponibilidad:

Usted puede conseguir, **cerca y con toda rapidez**, el equipo de bombeo que necesite.

Servicio:

Detrás del equipo de bombeo que Ud. alquila, está la Organización Técnica TFB, que atiende más de 25.000 instalaciones en España y que le asegura su permanente funcionamiento.

Garantía:

FLYGT tiene la gama de bombas sumergibles más extensa del mundo, y la Red de Servicio TFB es la más completa y eficaz en todo el territorio nacional.

FLYGT es en España:

**TFB**

TECNICAS DE FILTRACION Y BOMBEO, S.A.

MADRID. Tel. (91) 533 35 08* - **BARCELONA.** Tel. (93) 232 47 61* - **BILBAO.** Tel. (94) 453 01 94

VALENCIA. Tel. (96) 152 32 40 - **SEVILLA.** Tel. (95) 467 30 00

ALMERIA. (961) 26 15 11 - **BURGOS.** (947) 22 22 22 - **CIUDAD REAL.** (926) 21 51 23 - **GRANADA.** (958) 20 77 27 - **LA CORUÑA.** (981) 236 66 80
HUELVA. (956) 23 12 28 - **HUESCA.** (974) 22 59 16 - **LEON.** (987) 25 23 75 - **MÉRIDA.** (924) 30 17 57 - **OVIEDO.** (98) 579 71 51 - **PALMA DE MALLORCA.** (971) 20 22 01 - **LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.** (928) 31 36 17 - **SALAMANCA.** (923) 50 00 97 - **SAN SEBASTIAN.** (943) 37 07 85
SANTANDER. (942) 34 76 49 - **VALLADOLID.** (983) 39 66 77 - **VIGO.** (986) 27 15 07 - **ZARAGOZA.** (976) 44 28 78

VENTA • ALQUILER • SERVICIO



Acceso a la Expo 92. Puente Camas-Cartuja.

I.CO.S.

- Pilotes de pequeño y gran diámetro.
- Pantallas continuas prefabricadas o plásticas.
- Elementos portantes.
- Hinc y extracción de tablestacas.

I.CO.S., S.A.

OFICINAS CENTRALES
Alcalá, 65 - 4º, 28014 Madrid
Teléfs.: 577 71 40 - 577 71 50
Telex: 22038 GROUT E
Telefax: 576 88 58



No existen dos obras iguales. Cada nuevo proyecto exige respuestas diferentes. Por eso, en Prefabricados Lemona, S.A. queremos ofrecerle algo más que productos, queremos ofrecerle soluciones.

En unos casos se tratará de adaptar un elemento de serie a sus necesidades concretas; en otros, de diseñar y fabricar un elemento totalmente distinto. Cualquiera que sea la situación, no dude en consultarnos. Podemos proponerle soluciones.



Prefabricados Lemona, S.A. Zubiarte, 12

NOMBRE: _____

EMPRESA: _____

DIRECCION: _____

LOCALIDAD: _____

TELEFONOS: _____

Deseo recibir información sobre:

☐ Matière® ☐ Galerías en general ☐ Prefabricados en general



Prefabricados Lemona, S.A.

Licenciataria de ENTREPRISE
MATIÈRE - Francia

*fabricamos
soluciones*

Si desea más información sobre nuestras soluciones, remítanos el cupón adjunto o llame a uno de estos teléfonos:
(94) 6313227 - 6313105 - 6313307

Fax: (94) 6314185

Nos encantará atenderle.

48330 LEMONA - Vizcaya

1C