

CONCEPTO Y DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES R.C.C.

Joaquín Díez-Cascón Sagrado.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Juan Antonio Polanco Madrazo.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

RESUMEN

En este artículo, se presenta un nuevo concepto de hormigón R.C.C. y derivado de ello, se propone una línea de estudio e investigación de dicho material. Así, se describe un método objetivo para el diseño (dosificación) de estas mezclas, basado en la definición de su consistencia mediante el desarrollo de una nueva metodología. También, se dedica un último apartado a la recopilación de las tendencias actuales acerca del estudio de un tema fundamental en la construcción de presas de R.C.C. cual es la unión entre tongadas, reseñando los puntos de vista de los diversos grupos de investigación a ello dedicados.

ABSTRACT

From a new idea of R.C.C. concrete, this article goes on to propose a line of study and investigation of this material. Details are given of a way of measuring the proportions of the mixture by means of a new method of defining its consistency. Mention is made of some recent trends in the study of a subject that is of vital importance in the construction of dams, i.e. the joining of sections, with the opinions of the various research groups.

1. UNA VISIÓN SOBRE EL HORMIGÓN R.C.C. COMO MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PRESAS

1.1. INTRODUCCIÓN

En la construcción de presas deben emplearse materiales cuyas propiedades intrínsecas, su puesta en obra y la evolución de sus características sean susceptibles de control.

El hormigón fresco es un estado durante el cual los granos de sus constituyentes -conglomerante, arena y grava- son susceptibles de tener movimientos independientes los unos respecto de los otros. En la práctica, el hormigón, en este

estado, está expuesto a la segregación, pero ofrece la oportunidad de ser consolidado, minimizando su porosidad inicial. Para la comprensión y control del comportamiento del hormigón en este estado, se ha desarrollado la idea y los métodos de medición de la consistencia.

El hormigón endurecido es un sólido, un conglomerado, un medio poroso cohesivo y dinámico. La estructura de un sólido, en sentido general, se define como la relación entre la posición espacial de los elementos individuales primarios y las fuerzas de unión entre ellos.

La interacción de unos elementos estructurales con otros o con el medio ambiente debe ser estudiada en los diferentes niveles estructurales

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
junio de 1996.

Recibido en ROP:
marzo de 1996

del hormigón. Una clasificación de estos niveles puede ser:

a).-Nivel atómico-molecular. Es el nivel más elemental o primario de la composición estructural del hormigón. A este nivel corresponderían las propiedades de:

- ▼ Solubilidad en agua
- ▼ Posibilidad de reaccionar con el agua o de resistir su acción
- ▼ Estabilidad térmica
- ▼ Atracción a diferentes clases de compuestos químicos

Estas son características químicas del material y determinan su resistencia a los agentes agresivos del ambiente.

b).-La superficie de la interfase entre las diversas partículas primarias determina el nivel siguiente en la complejidad estructural. La energía superficial de cada partícula condiciona su correspondiente conducta en relación con el resto de las partículas que la rodean.

c).-En un tercer nivel están las formaciones de multipartículas y los huecos de aire. En este nivel, las propiedades del hormigón determinan su capacidad de resistir numerosas influencias agresivas, incluidos los ciclos de congelación y deshielo.

Es en este nivel donde aparece el concepto de porosidad. Además, la resistencia, densidad y permeabilidad del hormigón se ensayan sobre muestras cuya composición se caracteriza por este tercer nivel.

d).-Nivel de elemento estructural, que condiciona la distribución de tensiones.

El hormigón es un material de gran heterogeneidad y dinámico en función del medio ambiente. El carácter poroso del hormigón y la fase acuosa contenida en los poros, entre otros parámetros, juegan un papel fundamental en la evolución del hormigón y, por lo tanto, de sus características intrínsecas.

Los poros y la fase acuosa que aquéllos contienen constituyen un sistema termodinámicamente abierto, en continua interacción, cuyos equilibrios fluctúan en función del medio ambiente exterior, humedad relativa, penetración de agentes etc... La composición química de la fase

acuosa contenida en los poros regula los mecanismos de reacción.

La estructura de los poros y la configuración de las fisuras, así como el contenido de agua en las mismas, son factores que determinan la permeabilidad del hormigón que, a su vez, controla, en gran medida, su relación con el medio ambiente que lo rodea.

Otra visión de la estructura del hormigón estaría derivada, dada su heterogeneidad, del análisis de sus diferentes fases. Si se observa el aspecto que presenta el hormigón endurecido, se pueden distinguir claramente dos fases: áridos, con diversidad de tamaños y formas, y medio cementado, compuesto por una masa porosa, poco definida, de pasta de conglomerante hidratada que, en adelante, se denominará h.c.. En el sistema macroscópico, el hormigón puede considerarse como un material de dos fases: áridos dispersos y h.c..

A nivel microscópico, se manifiesta la complejidad de la estructura y se revela la no homogeneidad de las dos fases. En algunas áreas, la masa h.c. parece ser tan densa como el árido, mientras en otras se muestra altamente porosa. En presencia de áridos, la estructura de la h.c. en su vecindad es muy diferente a la del resto del sistema. De hecho, muchos aspectos del hormigón bajo carga sólo pueden explicarse cuando la interfase h.c.-árido se trata como una tercera fase de la estructura del hormigón. Así, las características de la estructura del hormigón se pueden resumir de la siguiente forma:

Primero, se distinguen tres fases, áridos gruesos, h.c. y zona de transición que no es otra cosa que la región comprendida entre el árido grueso y la h.c.. Existe una típica corteza de 10 a 50 μm de espesor alrededor del árido grueso, "la zona de transición", generalmente, más débil que las otras dos fases, y que, por ello, ejerce una gran influencia, entre otros, en el comportamiento mecánico del hormigón.

Segundo, cada una de las tres fases es, en sí misma, multifase. Por un lado, tanto la zona de transición como la matriz de h.c. contienen una distribución heterogénea de diferentes tipos y cantidades de fases sólidas, poros y microfisuras, y, por otro, cada partícula de árido puede presentar en su composición varios minerales, además de microfisuras y poros.

Tercero, a diferencia de otros materiales de ingeniería, la estructura del hormigón no permanece estable; tanto la h.c. como la zona de transi-

ción están sujetas a cambios en el tiempo, propiciados por su relación con el medio ambiente.

La fase árido es, fundamentalmente, la responsable de la densidad, del módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional.

La fase h.c. influye de manera decisiva en todas las características deseables en el hormigón endurecido -resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad-, que dependen de las proporciones presentes y sus propiedades, las cuales son función de las características de sus microestructuras, por ejemplo del tipo, cantidad y distribución de sólidos y poros.

La fase de transición h.c.-árido es, generalmente, el eslabón más débil de la cadena e influye también, de forma decisiva, en las propiedades deseables del hormigón.

1.2. EL HORMIGÓN R.C.C.

La técnica de construcción de presas con hormigón R.C.C., nacida bajo los auspicios de una construcción más rápida y económica, debería exigir, en principio, que, con una puesta en obra por tongadas sucesivas y consolidación por vibración y compresión externa, con o sin tratamiento entre tongadas, se obtenga un macizo de hormigón de características homogéneas en todas sus partes. El incumplimiento de esta condición trae consigo la aceptación del hecho de la existencia de dos tipos de material: el hormigón R.C.C. del interior de tongada y el hormigón R.C.C. de interfase entre tongadas, o la consideración de la existencia de una cuarta fase en este tipo de hormigones R.C.C., cual es la interfase entre tongadas. Con esta última visión, los hormigones R.C.C., o con más precisión, la estructura de los sólidos obtenidos mediante técnicas similares a la puesta en obra de los hormigones R.C.C., estarían compuestos por cuatro fases:

- ▼ Fase árido
- ▼ Fase h.c.
- ▼ Zona de transición h.c.-árido
- ▼ Zona de transición entre tongadas

En esta visión se pueden encontrar algunos aspectos semejantes entre las zonas de transición h.c.-árido y la de entre tongadas, por ejemplo las relativas a la diferente porosidad y contenido de agua.

Se podría decir, en general, que al hormigón R.C.C. se le exige que posibilite:

- ▼ Una consolidación mediante una compresión y vibración externa
- ▼ La unión entre tongadas en unas determinadas condiciones
- ▼ La compatibilidad y conformidad del proceso deformacional con el termohidraulicomecánico

En un determinado diseño estructural, el diseño del material para un elemento estructural está condicionado por su relación con los otros elementos y con el medio ambiente. Por lo tanto, no es que deban existir diferentes concepciones del hormigón R.C.C., lo que existen son diferentes diseños estructurales con diferentes relaciones entre sus elementos y acciones ambientales.

En todo caso, el nivel estructural de las muestras en las que se ensayan y controlan las características -resistencia, permeabilidad, deformabilidad- de los diversos diseños del hormigón es el nivel de formaciones de multipartículas y huecos de aire, y en este nivel aparece como propiedad intrínseca más relevante la porosidad.

Se podría decir que el objetivo fundamental que debe perseguirse en un proceso de dosificación de hormigones es el de obtener, con unos determinados materiales, un hormigón con mínima porosidad. La porosidad, es decir, el volumen relativo ocupado por el aire y el agua, decrece cuando la madurez aumenta, es decir, con el grado de hidratación, pudiendo tender a un valor mínimo, característico del tipo de conglomerante utilizado y de su dosificación. A menudo, este límite no se alcanza en la práctica, debido a que la porosidad del hormigón endurecido está muy influida por el valor de la porosidad inicial, es decir, por la porosidad que existe en el hormigón inmediatamente después de su puesta en obra.

En todo hormigón, y el R.C.C. lo es, y para cualquier tipo de puesta en obra, si se varía su contenido de agua, a partir de una determinada cantidad, la porosidad inicial no depende de la puesta en obra. Por lo tanto, se podría intentar analizar, por una parte, la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra y, por otra, su nivel competencial, por ejemplo su resistencia. De acuerdo con esta observación, se han desarrollado aparatos que, imitando en ciertos aspectos la forma en la cual va a ser puesto en obra un determinado hormigón, permiten clasificarlo, en laboratorio, según su aptitud para ser puesto en obra. Estos aparatos se denominan de medición de consis-

tencia, y al producto de su aplicación, consistencia.

Siendo la consistencia una magnitud física producto de una medición en un determinado aparato, no se puede hablar si no es de consistencia en el aparato Vebe, en el cono de Abrams etc... Es, por lo tanto, una propiedad que empareja hormigón - aparato.

El método Vebe modificado es el más comúnmente utilizado para la medición de consistencias de los hormigones R.C.C.. Con este método y aparato, se persigue definir un hormigón que, después de una determinada puesta en obra, vibración y compresión externa, tenga una mínima porosidad inicial.

Con la utilización del método Vebe, y de otros posibles tal como el método U.C., se puede definir un "dominio operacional" de hormigones que son susceptibles de ser puestos en obra mediante una determinada compresión y vibración externa, y minimizar sus porosidades iniciales.

Como se ha señalado anteriormente, una de las condiciones exigidas al hormigón R.C.C. es que posibilite su puesta en obra en tongadas y que, después de ser consolidado y para determinadas condiciones, se obtenga una fábrica continua.

En el dominio operacional, rango de variación de parámetros definidores de una dosificación optimizada, el parámetro que más influye en la ampliación o relajación de las condiciones necesarias para obtener una adecuada unión entre tongadas es el agua.

La obtención de un mínimo de porosidad inicial y una continuidad de la fábrica no son fines excluyentes y se puede definir un conjunto intersección de parámetros definidores de la dosificación que posibilitan y/o facilitan la consecución de estos fines. La utilización de aditivos, retardadores y/o plastificantes, amplía el conjunto intersección.

El conglomerante, en un hormigón, tiene dos funciones. Por un lado, la de relleno y por otro, la de ligante. Atendiendo a su función de ligante, su dosificación depende del nivel de prestaciones exigidas. En relación con su finalidad de relleno, depende de las necesidades para obtener un mínimo de porosidad inicial. Generalmente, la demanda de finos para relleno es mayor que la que se requiere para adquirir un determinado nivel de prestaciones y, por lo tanto, la adecuada definición del tipo y cantidad de conglomerante y de

finos aportados se muestra especialmente relevante.

Como tercera condición en el diseño de un hormigón R.C.C., se ha señalado la necesidad de que posibilite la compatibilidad y conformidad del proceso deformacional con el termohidráulicomecánico. Los conglomerantes hidráulicos en su proceso de hidratación desarrollan reacciones exotérmicas y, por ello, se hace necesario que el conglomerante utilizado en los hormigones R.C.C. sea de bajo calor de hidratación. Este conglomerante es, generalmente, un cemento con adiciones, es decir, compuesto de cemento portland y uno o más materiales inorgánicos que toman parte en las reacciones de hidratación, contribuyendo sustancialmente a la formación de los productos hidratados. Uno de los materiales inorgánicos más utilizados es la ceniza volante.

La ceniza volante no se hidrata sola, necesita la presencia de álcalis y CH (portlandita) para que se produzca la reacción de hidratación, reacción puzolánica. Los hidratos generados en las mezclas de cementos con cenizas volantes son los mismos que en los del cemento portland, diferenciándose, en todo caso, en la relación C/S de los CSH (Silicato cálcico hidratado) que, generalmente, es menor en el caso de presencia de cenizas volantes.

De las cuatro fases estructurales de un hormigón R.C.C.:

- ▼ Fase árido
- ▼ Fase h.c.
- ▼ Zona de transición h.c.-árido grueso
- ▼ Zona de transición entre tongadas

Las que pudieran ser más diferenciadoras respecto al hormigón convencional son las tres últimas.

A.-FASE h.c.

La fase de conglomerante hidratado está compuesta de elementos sólidos y de huecos rellenos de agua y aire. La utilización de conglomerantes mixtos no introduce en la fase h.c. diferencias sustanciales respecto a la obtenida con un cemento portland puro.

Los productos de hidratación, elementos sólidos, son los mismos, únicamente se establecen diferencias en el momento y cantidad relativa en que se forman cuando varía el contenido de adiciones puzolánicas, cenizas volantes. Las formas

mejor cristalizadas se producen más lentamente cuanto mayor es el contenido de adiciones puzolánicas.

La transformación de la estructura porosa de la fase h.c. con la madurez es más notable cuanto más elevada es la presencia de cenizas volantes en el conglomerante. La presencia de pequeños porcentajes de cenizas volantes en el conglomerante induce una reducción de la porosidad y una pequeña transformación en el tamaño de los poros. Con altos porcentajes de cenizas volantes, se produce una reducción del tamaño de poros y una relativa menor disminución de la porosidad total.

La sustitución de cemento por cenizas volantes en un conglomerante, incluso en altos porcentajes, genera estructuras en la fase h.c. que, a largo plazo, inducen capacidades resistentes iguales o superiores a las obtenidas con un cemento portland puro. En lo que se refiere a la impermeabilidad, se obtienen los mismos resultados, incluso a corto plazo.

B.-FASE DE TRANSICIÓN h.c.-ÁRIDO GRUESO

La zona de transición entre la h.c. con los áridos, aun estando compuesta por los mismo elementos que la h.c., se estructura y presenta unas propiedades diferentes a las de ésta.

En el hormigón en estado fresco, se forma una película de agua alrededor de los áridos gruesos y, por lo tanto, la relación w/c en su proximidad es superior. En este medio, los iones producidos por la disolución del sulfato cálcico y de los compuestos de aluminio y calcio se combinan para formar etringita e hidróxido cálcico. Debido a la alta relación agua/cemento, los productos hidratados en la vecindad de los áridos gruesos se desarrollan en grandes cristales y, por tanto, forman un entramado más poroso que el de la fase h.c..

En la fase de transición h.c.-árido de cementos portland, con el avance del proceso de hidratación, los cristales laminares de hidróxido cálcico tienden a formar capas orientadas; los C-S-H, pobremente cristalinos, y una segunda generación de pequeños cristales de etringita e hidróxido cálcico comienzan a llenar los huecos que existen en el entramado primitivo y aumentan la densidad y, por ende, la resistencia de la zona de transición. La presencia de ceniza volante, puede trastocar este modelo en lo que se refiere, fundamentalmente, al desarrollo de la segunda generación de hidróxido cálcico.

La resistencia de la zona de transición depende del volumen y tamaño de los huecos presentes. Aun con una baja relación agua/cemento, caso del hormigón R.C.C., a tempranas edades el volumen y tamaño de huecos en la zona de transición es más grande que en la fase h.c. y, como consecuencia, su resistencia es menor.

Con el aumento del tiempo de hidratación, la resistencia de la zona de transición puede mejorar, como resultado de la cristalización de nuevos productos al producirse reacciones químicas lentas entre los constituyentes de la pasta y el árido.

Además del gran volumen de poros capilares, otra característica de la zona de transición es la presencia de microfisuras. La cantidad de microfisuras depende de muchos parámetros: tamaño y graduación de los áridos, contenido de agua, contenido y tipo de conglomerante, grado de consolidación del hormigón fresco, condiciones de curado, humedad ambiental e historia térmica del hormigón. Evidentemente, pueden existir diferencias, en lo que se refiere a estos parámetros, entre los hormigones R.C.C. y los convencionales.

Por ejemplo, en los hormigones que contengan áridos pobremente graduados, tamaños máximos elevados, o con deficiente coeficiente de forma, se favorece la creación de películas de agua gruesas alrededor de los áridos gruesos. Bajo estas condiciones, la zona de transición será susceptible de fisuración cuando esté sometida a tracciones inducidas por movimiento diferenciales -secado o enfriamiento del hormigón- entre el árido y la fase h.c..

C.-ZONA DE TRANSICIÓN ENTRE TONGADAS

La estructura del hormigón y sus características evolucionan con el tiempo y su relación con el medio ambiente. Por ello, la parte superior de una tongada de hormigón R.C.C. evoluciona de diferente forma que su interior. Por otro lado, la zona superior de la tongada puede tener una composición diferente que la interior, en lo que se refiere a la distribución de elementos sólidos -áridos y conglomerante- y agua. Este hecho se ve favorecido por la forma de puesta en obra, extensión en tongadas, y por la vibración y compresión externa.

También, la parte inferior de la tongada superior tiene distinta relación con el medio ambiente que la zona interior, e incluso puede tener composición diferente. Por ejemplo, en lo que se re-

fiere al contenido de agua que puede ser absorbida por la tongada inferior al haber sufrido cierto proceso de desecación.

En todo caso, la zona de transición entre tongadas, parte superior de la tongada inferior y zona inferior de la tongada superior, está formada por diferentes materiales en lo que se refiere a su edad y circunstancias, y la unión entre ellos depende de su composición, historia y futuro. O lo que es lo mismo, la fase de transición entre tongadas está formada por la unión de dos hormigones, de historia diferentes, y necesariamente desacompañados en lo que se refiere a su proceso cinético de hidratación y, a resultados de este hecho, sometida a tensiones internas y, por ende, a una posible microfisuración y/o desunión.

Se sugiere, para el estudio e investigación de esta fase, la aplicación de modelos y mecanismos en ciertos aspectos similares a la fase de transición árido-h.c.. Asimismo se hace necesario trabajar en el campo de la reología del hormigón fresco, su proceso de endurecimiento, y en la cinética del proceso de hidratación de conglomerantes mixtos.

Con fundamento en esta visión del hormigón R.C.C. se puede concluir, que no pueden existir diferencias sustanciales entre los hormigones convencionales y los R.C.C. salvo aquellas derivadas de la fase de transición entre tongadas. Por ello, se considera que la profundización en el conocimiento científico-técnico de esta fase es de vital importancia.

2. DOSIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES R.C.C.

2.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha expuesto en el apartado anterior, se puede decir, en general, que al hormigón H.C.R. se le exige que posibilite:

- ▼ Una consolidación mediante una compresión y vibración externa.
- ▼ La compatibilidad y conformidad del proceso deformacional con el termo-hidráulico-mecánico.
- ▼ Una adecuada unión entre tongadas.

Evidentemente, no se pueden tratar estos condicionantes de forma independiente, siendo

el proceso de dosificación un conjunto de decisiones armónicas cuyo fin es diseñar un hormigón adecuado. Sin embargo, y analizando los conceptos de forma independiente, en este apartado se presenta cómo se pueden alcanzar los dos primeros fines. En el siguiente apartado, se debate la solución al tercero.

El hormigón fresco es un material esencialmente heterogéneo, puesto que en él coexisten tres fases: la sólida (áridos y cemento), la líquida (agua) y la gaseosa (aire atrapado). A su vez, la fase sólida es heterogénea entre sí, ya que sus partículas son de naturaleza y dimensiones variables.

Algunos autores consideran que entre las propiedades, atributos o cualidades esenciales del hormigón fresco se encuentran la consistencia y la docilidad, definiéndolas como (Ref.1,2 y 3):

“La consistencia es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse”.

“La docilidad es la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación que se dispone”.

Asimismo, se utiliza el concepto de trabajabilidad del hormigón como una medida de la cantidad de trabajo interno útil que es necesario para producir una compactación completa.

Existe un gran número de aparatos para la medición de la consistencia de un hormigón. En la mayoría de los métodos, la variación de la consistencia es una función monótona de la dosificación de agua. Esto se corresponde con la idea intuitiva, para los hormigones convencionales, que un hormigón se coloca mejor cuanto más fluido es, teniendo esta situación el límite en una excesiva dosificación de agua que produciría la segregación del material.

Si la consistencia fuese un atributo o cualidad esencial del hormigón fresco, la clasificación por consistencias de una cierta familia de hormigones sería la misma utilizando un aparato u otro de medición. Ciertamente el hecho anterior no se cumple, lo que queda de manifiesto observando la figura 1 (Ref. 4)

En ella, se presentan los valores de consistencia determinados utilizando el método de descenso del cono de Abrams (en ordenadas) frente a los determinados empleando el método L.C.L. (en abscisas).

En el caso de analizar hormigones que no difieren más que en su dosificación de agua, se obtiene la curva monótona (1) y para hormigones que se diferencian en su relación arena/grava se

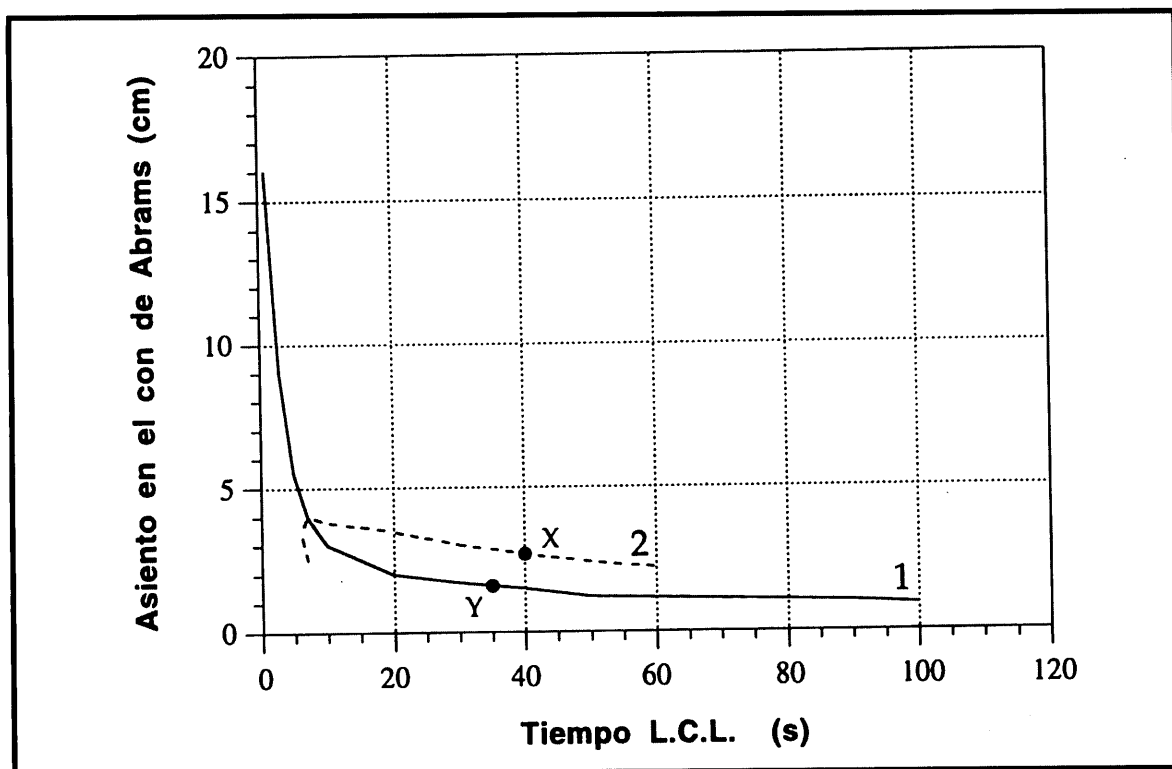


Figura 1.
Relación entre la consistencia usando el cono de Abrams y el consistómetro L.C.L.

obtiene la curva (2). En el caso más general, se pueden encontrar hormigones X que asientan más que los Y según el cono de Abrams y que, por el contrario, en el aparato L.C.L. tardan más tiempo en fluir, es decir, son menos plásticos.

Por lo tanto, no se puede considerar a la consistencia como una propiedad del hormigón fresco, siendo obligado, a la hora de su definición, reflejar la dependencia existente con el método para su determinación. Así una posible definición sería: "Una magnitud física (tiempo, longitud,...), producto de una medición realizada tras someter al hormigón fresco a un determinado ensayo en un determinado aparato".

En función de lo expuesto, cabe plantearse la siguiente pregunta: ¿cuándo las características tecnológicas de la consistencia toman valor de características intrínsecas del hormigón (mezcla)? La respuesta a esta cuestión es (Ref.4 y 5):

1.- Cuando la composición en finos (activos + inertes) de los hormigones comparados esté próxima a la dosificación de máximo relleno.

2.- Cuando el aparato de medida refleje fielmente la puesta en obra.

En estas circunstancias, se puede definir el concepto de manejabilidad en la forma siguiente:

"Manejabilidad es la propiedad de los hormigones frescos, determinable en laboratorio, que

permite clasificar en orden de porosidades decrecientes a los hormigones obtenidos después de un proceso de puesta en obra dado" (Ref.4). O, lo que es lo mismo:

"Manejabilidad es la propiedad de los hormigones frescos que permite clasificarlos previamente en laboratorio según su facilidad de puesta en obra (en la obra) y su porosidad de obra" (Ref.4).

2.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE CONSISTENCIAS DE HORMIGONES R.C.C.

El hormigón H.C.R. es un hormigón seco, existiendo para este tipo de hormigones numerosos aparatos y métodos de determinación de consistencias. El más utilizado para los hormigones R.C.C. es el método Vebe Modificado, consistente en medir el tiempo que tarda en refluir la pasta de una muestra de hormigón fresco sometida a una vibrocompresión externa.

Este método presenta una componente de subjetividad, dejando a criterio del operario la valoración del instante en que refluye la pasta. Por otra parte, en ciertos rangos de consistencia, no es sensible a la variación de los parámetros de definición de la dosificación. Volviendo a la defini-

ción de manejabilidad: "propiedad de los hormigones frescos que permite clasificarlos previamente en laboratorio (consistencia) según su facilidad de puesta en obra (en la obra) y su porosidad de obra", veamos si el método Vebe Modificado posibilita este hecho.

En las figuras 2 y 3 (Ref.6), se muestra la variación del tiempo Vebe y de diversas características físicas (porosidad, permeabilidades al agua y al oxígeno) de un hormigón en el que a un esqueleto fijo de sólidos (árido+conglomerante) ($T_{max}=40$ mm.) se le añaden diferentes cantidades de agua. Las características físicas se determinan después de una puesta en obra consistente en:

1) Anclar firmemente un molde cilíndrico de fabricación de probetas normalizadas mediante los dispositivos adecuados a la mesa vibrante del consistómetro Vebe.

2) Rellenar el molde en tres capas, compactando cada una con una pesa de 8,5 kg. en su superficie y sometiendo el conjunto a vibración durante 1 minuto.

Este procedimiento es el utilizado habitualmente para la fabricación de probetas durante el control de ejecución de una obra de hormigón R.C.C..

Se observa que, para el ejemplo presentado, el método Vebe Modificado clasifica a los hormigones en orden a su consistencia, pero solamente hasta tiempos Vebe ≥ 40 s. en orden a sus porosidades y permeabilidades al agua y al oxígeno.

Si se acepta lo recogido en la bibliografía, y comprobado en obra, en lo relativo a tiempos Vebe aconsejables de 15 ± 5 s., el método se situaría fuera del rango de aplicación para esta familia de hormigones.

En función de esta situación, se ha intentado desarrollar un método alternativo con las ideas rectoras siguientes:

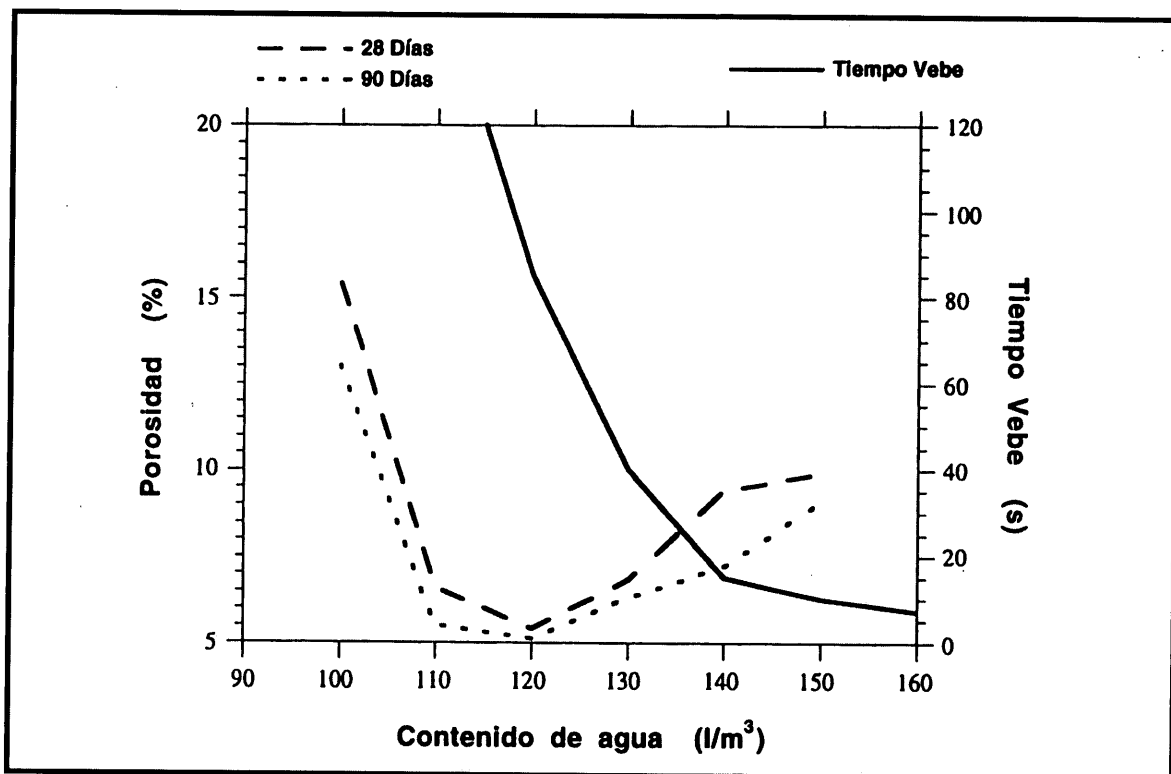
- 1.- Que refleje la puesta en obra
- 2.- Que se mida una magnitud, generada por una acción predeterminada, no derivada de la aparición de una cierta situación (medición subjetiva).

2.3. MÉTODO DE MEDICIÓN DE CONSISTENCIAS U.C.

2.3.1. DESARROLLO DEL MÉTODO

El germen de este método es el método Cabrera (Cabrera, Ref. 7). Es decir, medir el asiento

Figura 2.-
Porosidad-Tiempo
Vebe. $AG/Af = 1$.
Conglomerante =
220 kg/m³



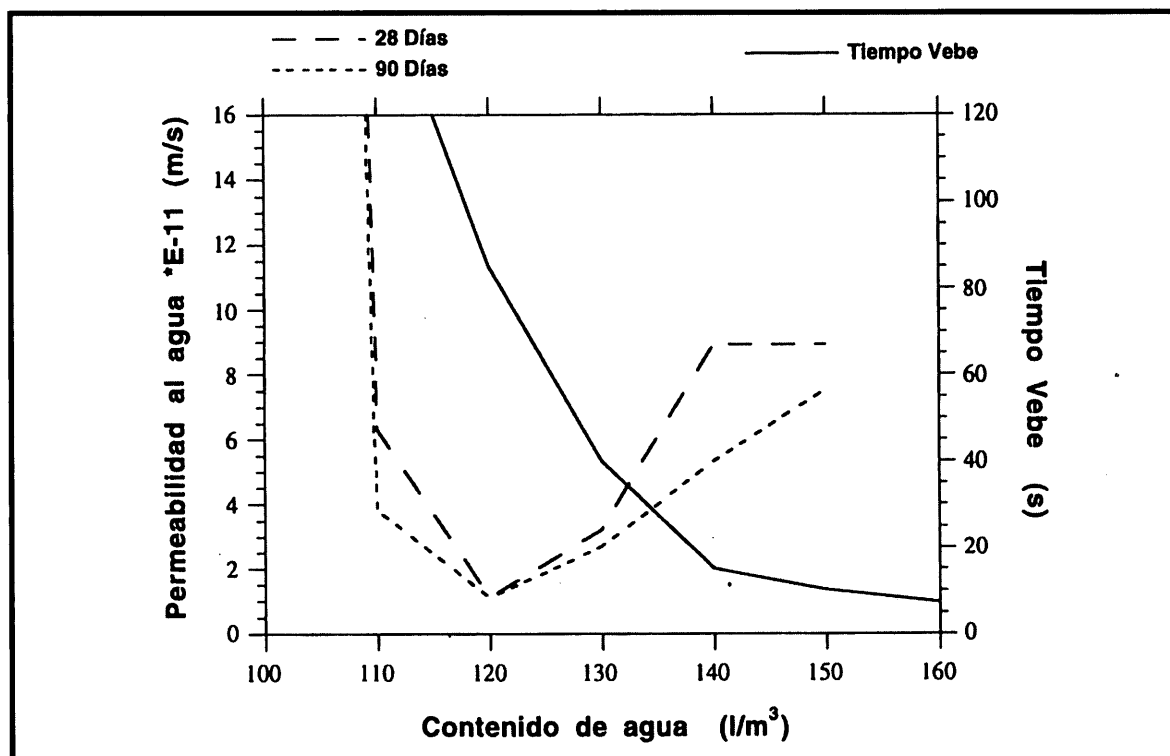


Figura 3.
P. Agua-Tiempo Vebe. $AG/Af = 1$.
Conglomerante = 220 kg/m^3

de una muestra de hormigón fresco sometida a una acción externa durante un cierto tiempo.

En el desarrollo del método de medición de consistencias U.C. (Universidad de Cantabria) se han contemplado muy variadas opciones relativas a:

- ▼ Tipo de molde (forma y volumen)
- ▼ Cantidad de muestra (volumen o peso fijo a introducir en el molde)
- ▼ Tipo de precompactación (necesidad o no de una compactación previa)
- ▼ Tipo de compactación (frecuencia de la mesa vibrante, peso de la tara y tiempo de aplicación de la vibrocompresión)

De las combinaciones analizadas variando estos parámetros de ensayo, se ha elegido como idónea:

- ▼ Empleo del molde normalizado para la fabricación de probetas (cilíndrico de $15 \times 30 \text{ cm.}$)
- ▼ Volumen fijo (el de la probeta normalizada)
- ▼ Sin precompactación
- ▼ Compactación final con pesa de 8.5 kg. y 30 s. de vibrocompresión a la frecuencia normalizada para el consistómetro Vebe

2.3.2. PROPUESTA DE MÉTODO U.C. , (UNIVERSIDAD DE CANTABRIA) PARA MEDICIÓN DE CONSISTENCIAS DE HORMIGONES R.C.C.

Los aparatos y medios de ensayo necesarios para determinar el descenso U.C. son:

▼ Mesa vibratoria

Se trata de la misma mesa vibratoria utilizada para el Método Vebe (Norma UNE 83-314-90) provista de un brazo móvil para guiado de la pesa durante la vibración.

▼ Molde cilíndrico, tolva y barra metálica

Los definidos en la Norma UNE 83-301-91

▼ Pesa de compactación

Se utiliza una pesa cilíndrica, de $8.500 \pm 50 \text{ g}$ unida a una varilla con escala para medición del descenso. El diámetro de la pesa es de $145 \pm 1 \text{ mm.}$

▼ Material complementario

Un reloj interruptor para controlar el tiempo de vibrocompresión, un cogedor para el llenado y unos dispositivos que permitan sujetar firmemen-

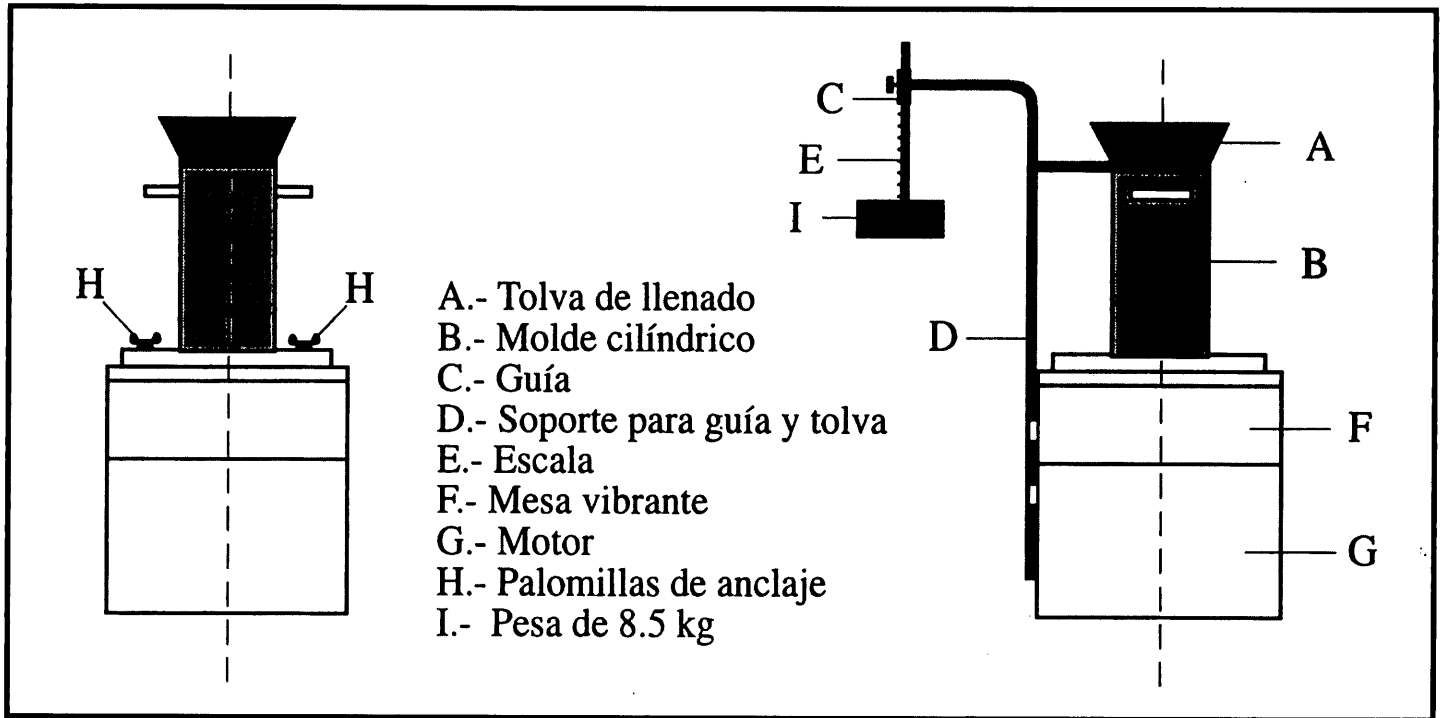


Figura 4.
Equipo para la
determinación del
asiento U.C

te el molde a la mesa vibrante. El conjunto del utillaje, se muestra en la figura 4.

El procedimiento operativo para obtener la consistencia U.C. es el siguiente:

- 1) Se procede a sujetar firmemente el molde cilíndrico a la mesa vibratoria mediante los dispositivos oportunos.
- 2) Se coloca la tolva de llenado sobre el molde cilíndrico y se procede al relleno de éste. Durante el proceso de llenado se apoya siempre el cogedor sobre la tolva en el momento de verter el hormigón.
- 3) Se procede a retirar la tolva y, por medio de la barra metálica, se elimina el material sobrante, enrasando con el borde superior del molde.
- 4) Se coloca la pesa de 8,5 kg. sobre la superficie libre del hormigón, guiada por el brazo móvil, y se somete el conjunto a una vibración durante 30 segundos.
- 5) Se procede a medir el descenso ocasionado utilizando para ello la escala impresa en la varilla de la pesa. Este descenso (expresado

en milímetros) da la medida de la consistencia del hormigón.

2.3.3. COMPROBACIÓN DE LA VALIDEZ DEL MÉTODO

Se han analizado numerosas familias de hormigones, extremas en algunos casos, y comprobado la repetitividad, sensibilidad y rango de variación de la consistencia U.C. Se presentan los casos siguientes:

- ▼ Esqueleto de áridos constante, curva continua tipo Fuller, 220 kg/m³ de conglomerante y variación de la cantidad de agua de amasado de 90 a 160 l/m³ (Figura 5)
- ▼ Esqueleto de áridos constante, curva tipo Fuller, agua constante (140 l/m³) y variación del contenido de conglomerante.
- ▼ Manteniendo fija la composición del mortero (S/C/W = 76/15.4/8.6 % en peso), se varía la relación árido grueso/árido fino (Figura 6).

Del análisis de estos resultados se puede concluir que:

- 1) El método se muestra sensible a las variaciones de los parámetros que definen una dosificación de hormigón.

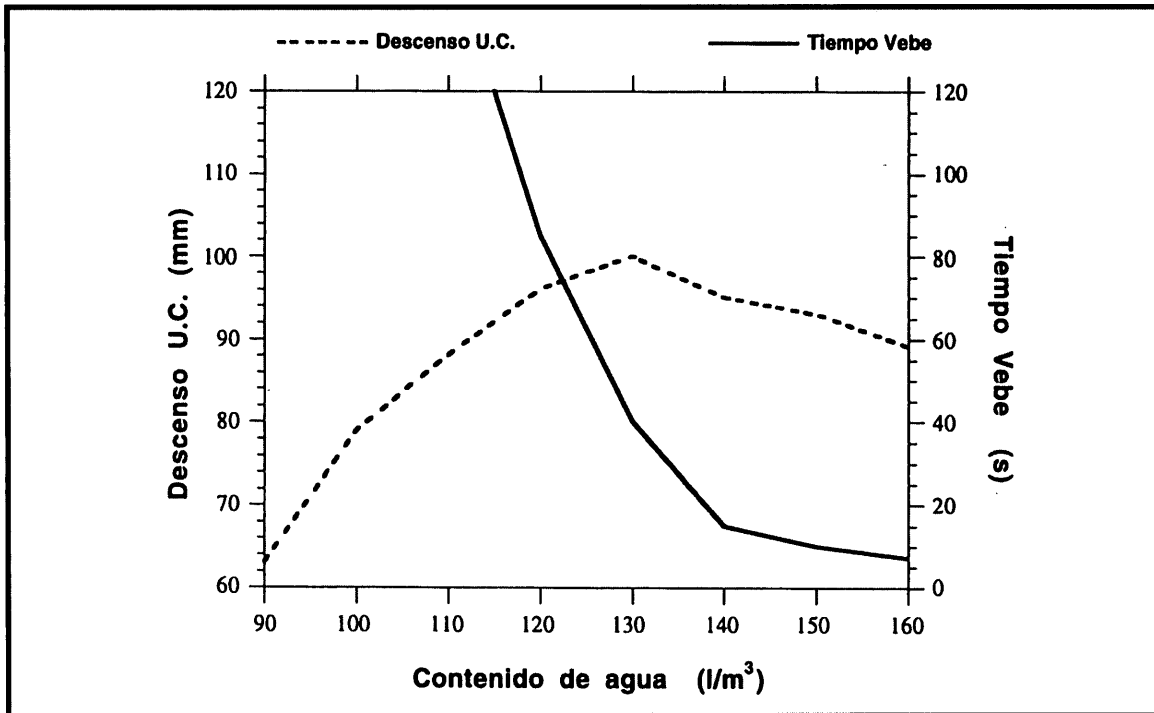


Figura 5. Descenso UC y Tiempo Vebe-Contenido de agua.

- 2) Se obtiene una adecuada repetitividad.
- 3) El método resulta sencillo y objetivo.
- 4) Clasifica los hormigones en orden a sus consistencias.

Se hace necesario demostrar que la clasificación de los hormigones por consistencias se co-

rresponde con una clasificación de los mismos en orden a sus porosidades (características) después de su puesta en obra (en la obra). Para ello, en las figuras 7, 8, 9 y 10, se presentan las porosidades y permeabilidades al oxígeno de las series anteriores, cuando la puesta en obra es la reseñada en el apartado 2.2.

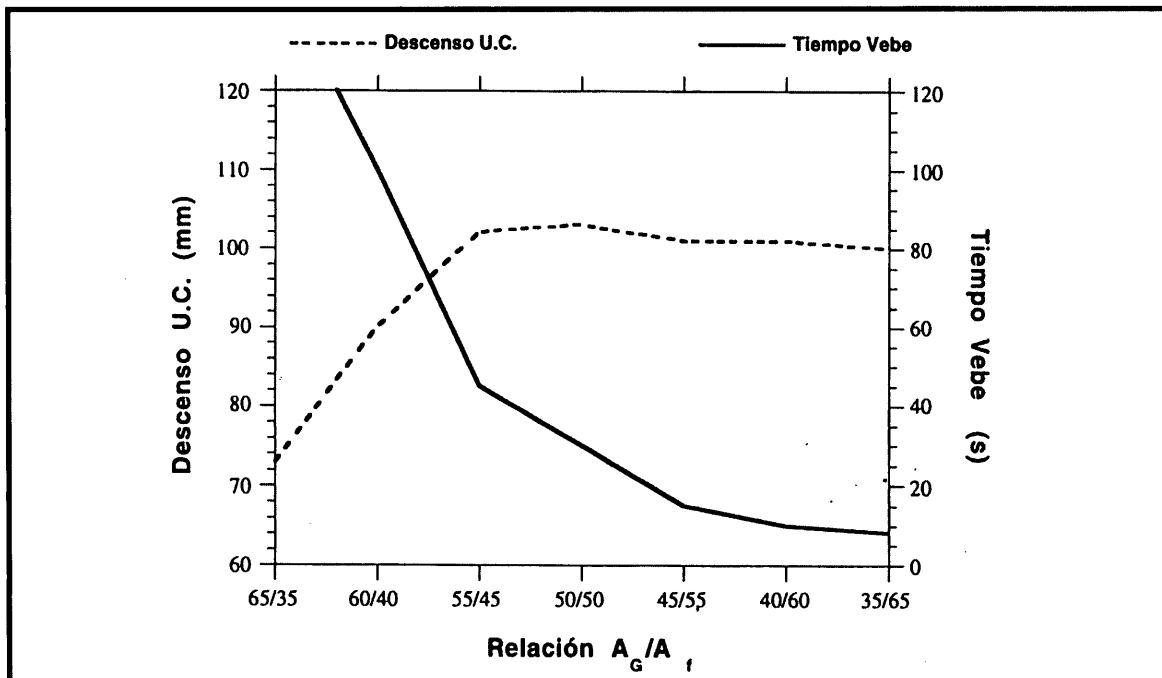


Figura 6. Descenso UC y Tiempo Vebe-Relación AG/Af.

Figura 7.
Porosidad y
Descenso UC.
AG/Af = 1.
Conglomerante =
220 kg/m³

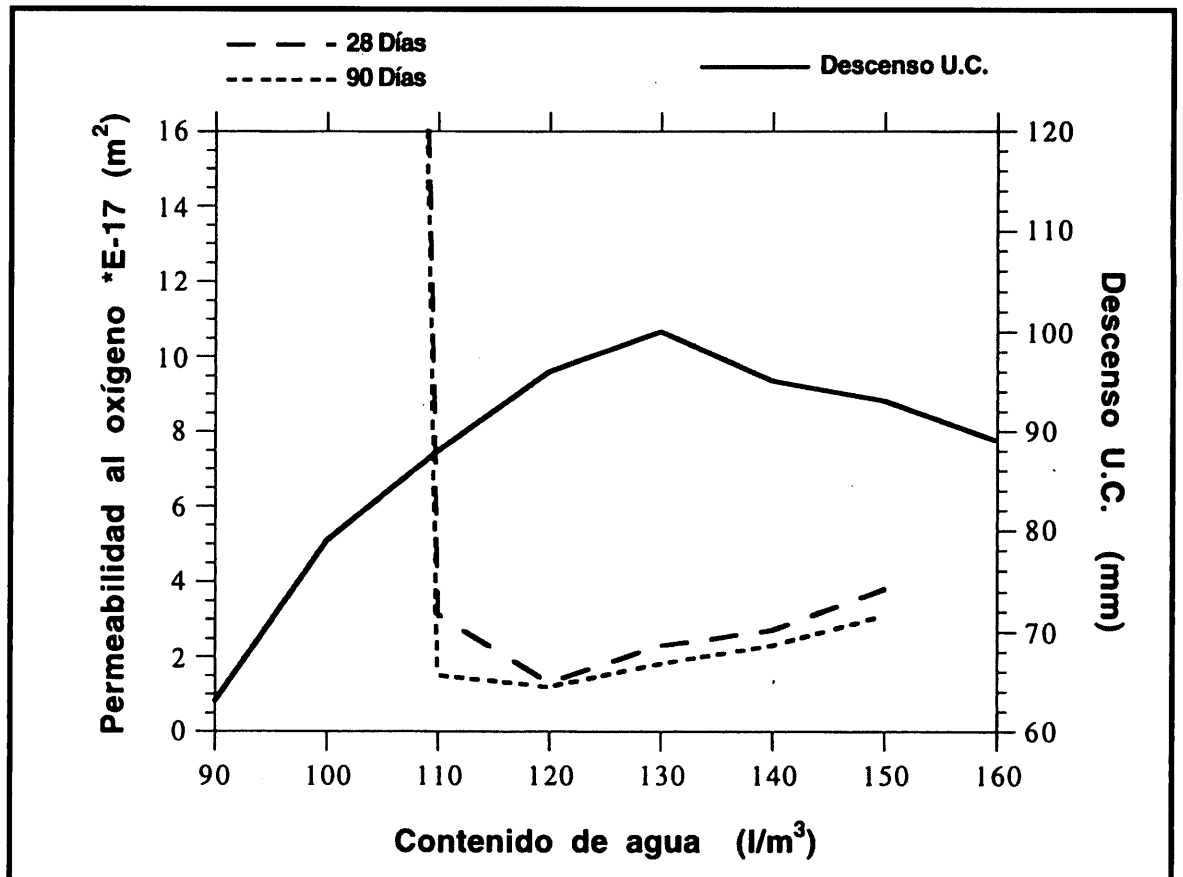
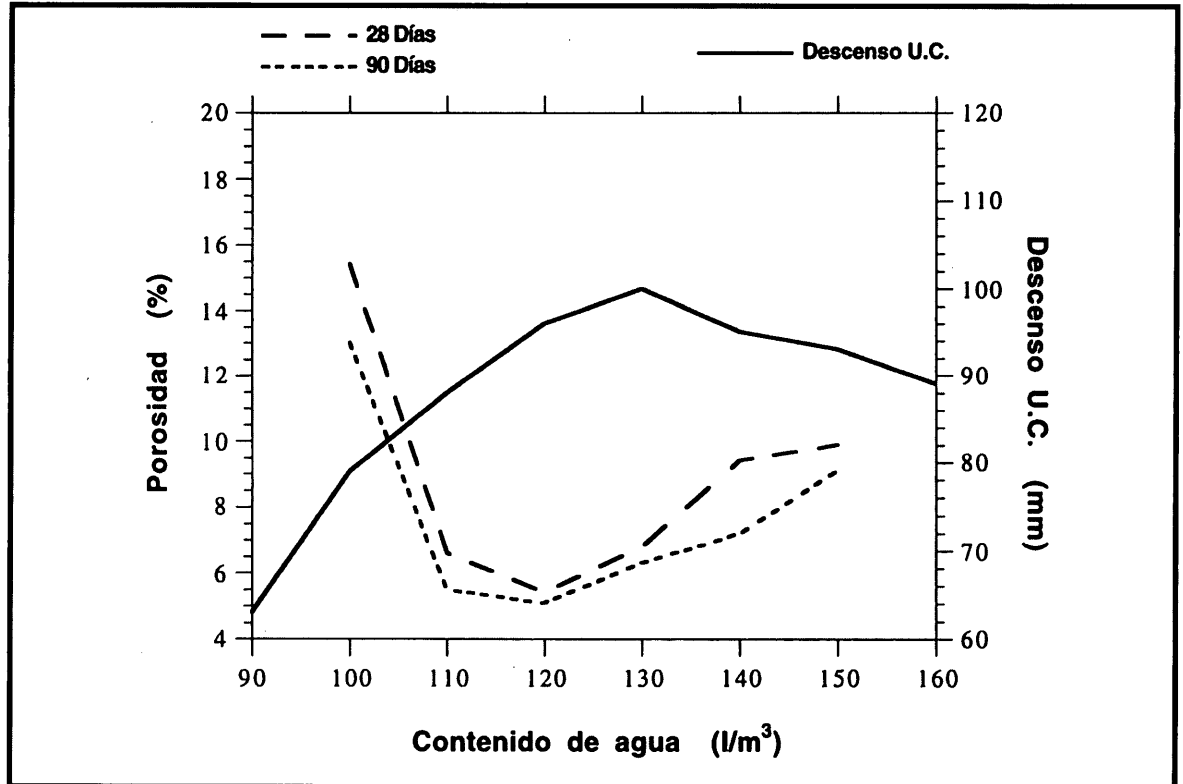


Figura 8. P. Oxígeno
y Descenso UC.
AG/Af = 1.
Conglomerante =
220 kg/m³

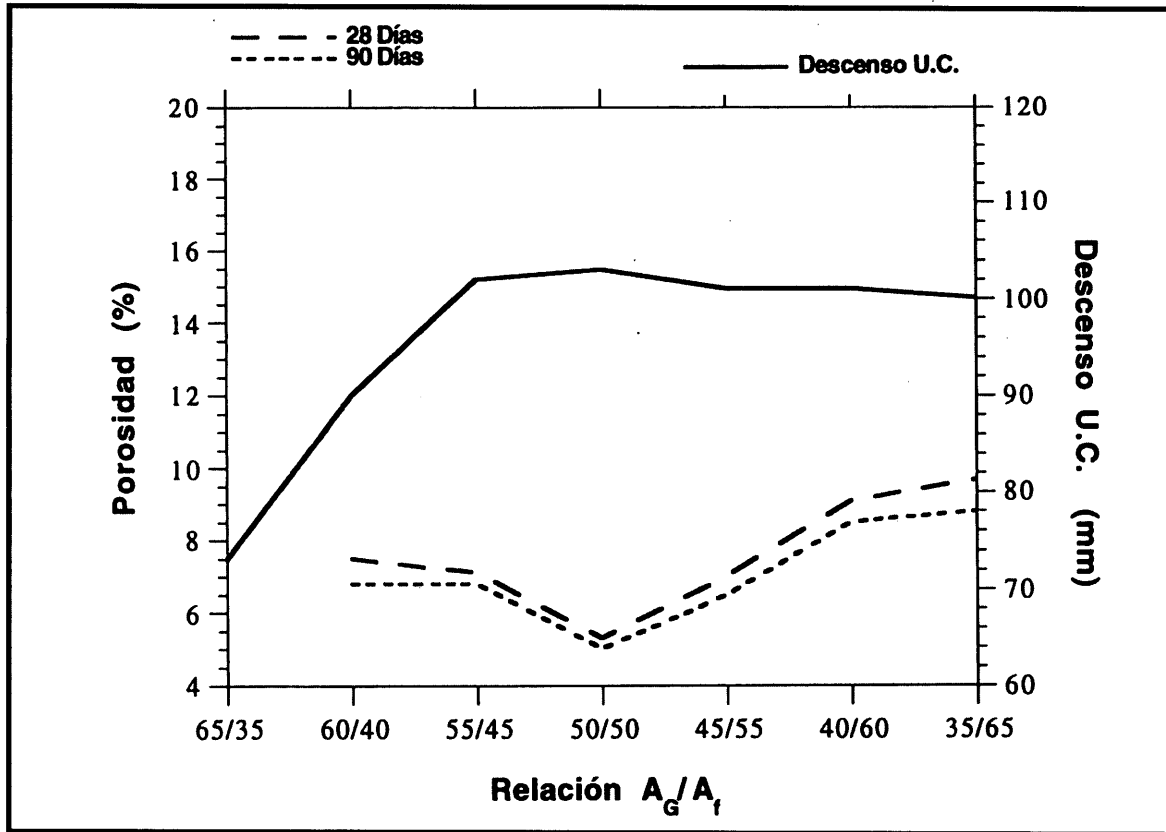


Figura 9.
Porosidad y
Descenso U.C.-
Relación A_g/A_f .

Del análisis de los resultados, se concluye:

dencia biunívoca entre valores de consistencia y de porosidad.

1) Las curvas obtenidas en la caracterización de las dosificaciones presentan formas similares a las obtenidas en la medición de consistencias. Existen valores máximos, mínimos en su caso, y zonas estables en las que los parámetros de caracterización se mantienen prácticamente constantes.

2) Si bien los máximos descensos obtenidos en la consistencia no coinciden, en todos los casos, estrictamente con el hormigón de las mejores características, si coinciden claramente con el rango en que estas características son más adecuadas y tienen una cierta estabilidad. A este rango se le denomina dominio de manejabilidad.

3) El método propuesto señala para cada curva estudiada el rango de variación de consistencias para el cuál es válido. Este rango está definido por los puntos correspondientes a la zona ascendente (en general la de más pendiente) y a la zona de máximos en donde existe una correspon-

3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DEFINICIÓN DE CONSISTENCIAS U.C. AL DESARROLLO DE UN MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES R.C.C.

Si se ensayan hormigones con un esqueleto de áridos fijo, curva tipo Fuller, y se varían sus contenidos de conglomerante y de agua y se determinan sus tiempos Vebe y descensos U.C. se obtiene el siguiente resultado (Figura 11).

Como se observa, un determinado tiempo Vebe (p. ej. 20 s.) se puede obtener para diversas combinaciones de agua y conglomerante, sin embargo, descensos U.C. de 100 mm. sólo se pueden obtener para unas determinadas condiciones. Así mismo, se señala que el máximo maximum de los descensos (103.8 mm) se corresponde con un tiempo Vebe de 20 s., que está en el rango recomendado para conseguir con este tipo de hormigones fábricas impermeables tanto en lo que respecta al material como a la unión entre juntas.

Figura 10. P.
Oxígeno y Descenso
UC-Relación AG/Af.

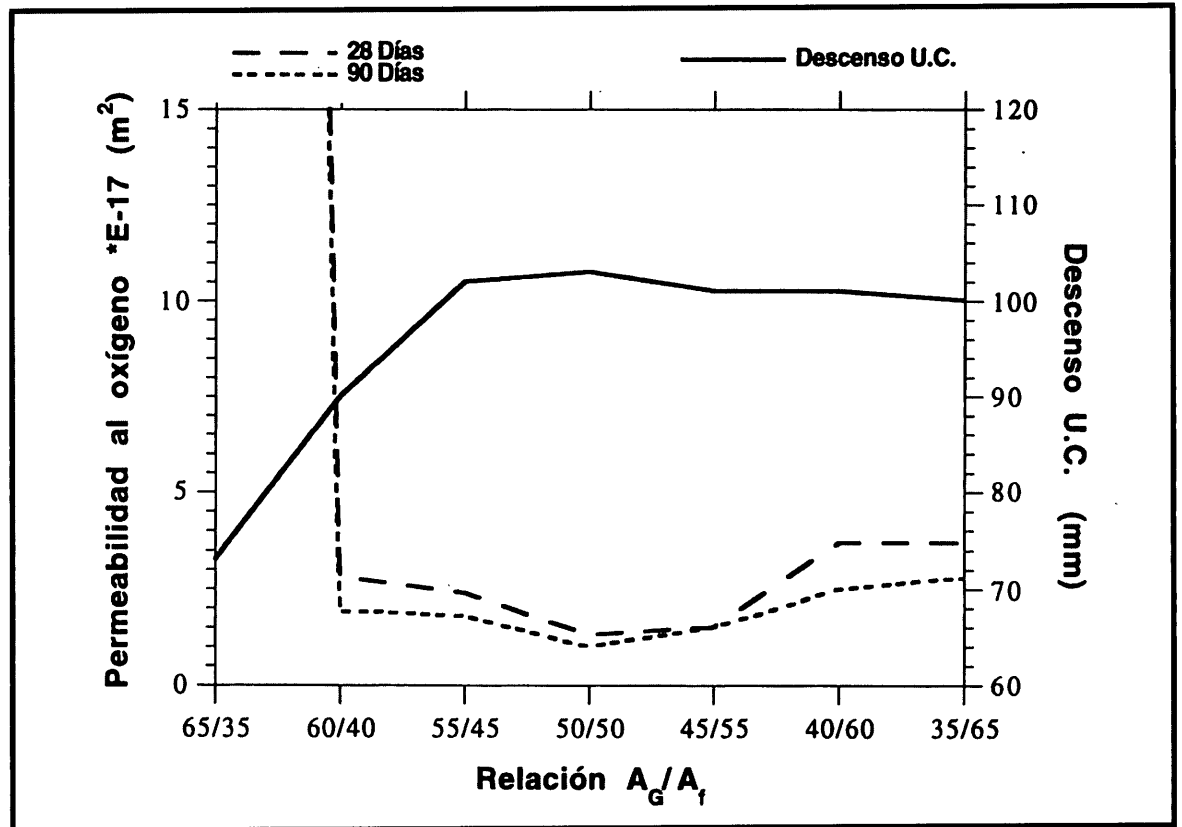


Figura 11.
Descenso UC y
Tiempo Vebe.
 $AG/A_f = 1$.
Variación agua y
conglomerante.

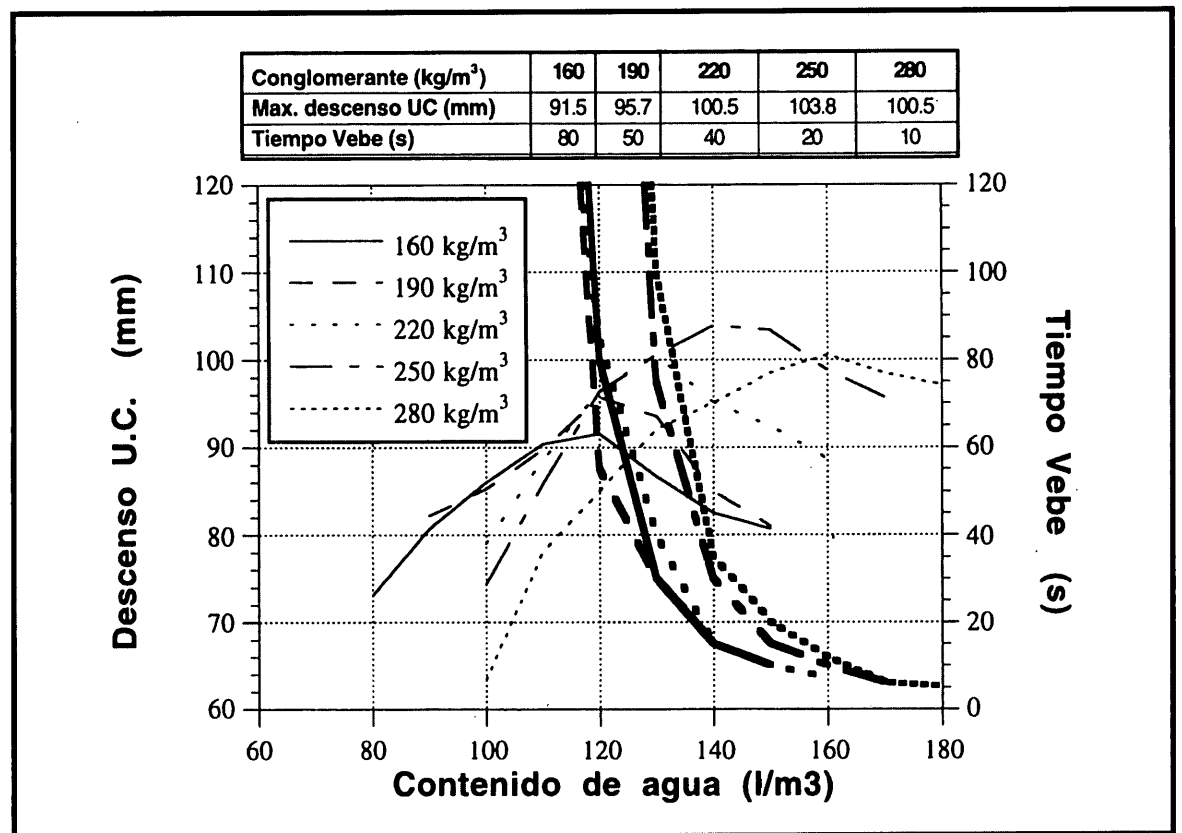
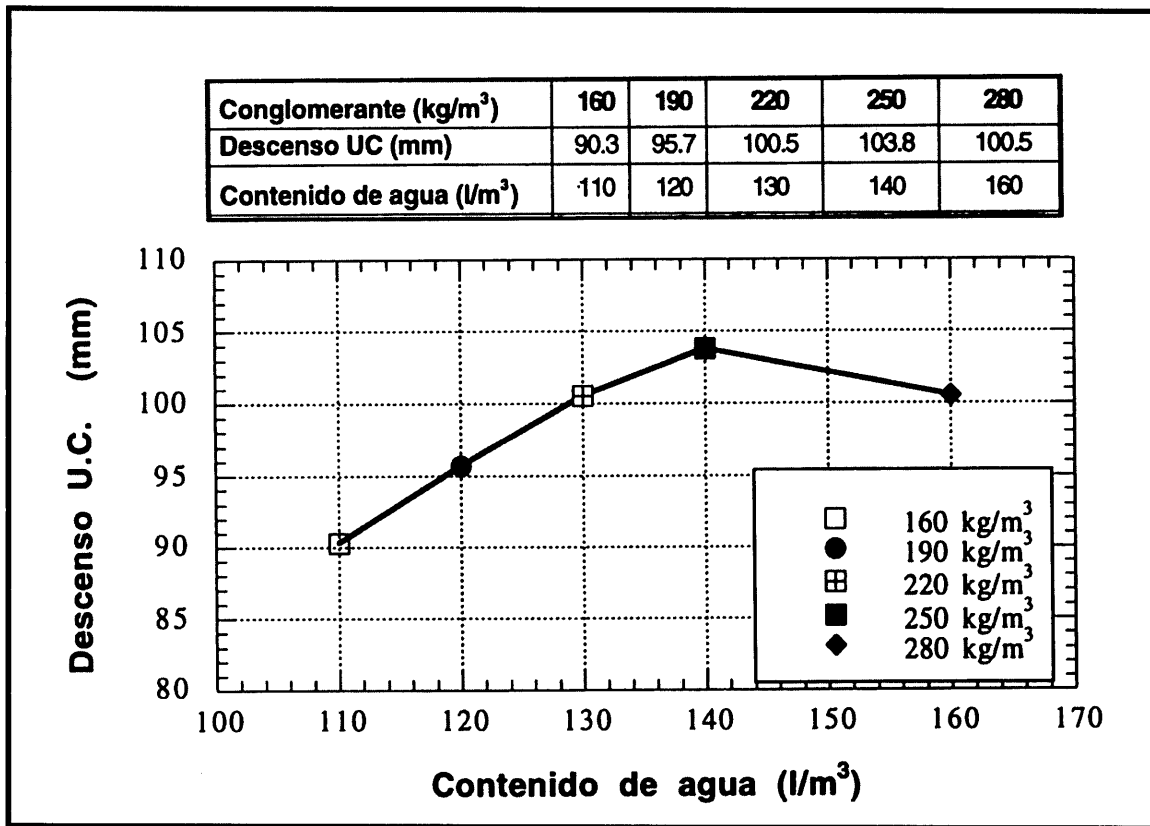


Figura 12.
Descenso UC.
Envolvente de
máximos.



Si se representa la envolvente de las curvas anteriormente presentadas, se obtiene la curva de la figura 12.

Puestos en obra estos hormigones, con el método expuesto anteriormente, se obtienen los siguientes resultados en sus características (tabla n° 1).

Del análisis de la misma, se puede deducir que las características del hormigón definido en la serie con 250 kg/m³ de conglomerante y 140 l/m³, pueden considerarse, en forma conjunta, las más adecuadas.

Por lo tanto, este método determina como dosificaciones adecuadas, para los condiciones ex-

TABLA N° 1

Cantidad conglomerante (kg/m ³) [agua(l/m ³)]	Resistencia a compresión (kg/cm ²)			Dsss (t/m ³)	Porosidad (%)		Permeabilidad agua*10-11 (m/s)		Permeabilidad oxígeno*10-17 (m ²)	
	7 días	28 días	90 días		28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
160 [110]	108.7	139.0	222.8	2.398	7.92	5.94	3.62	3.98	3.62	2.43
190 [120]	109.8	180.3	270.5	2.427	6.25	5.41	1.69	1.57	2.00	1.20
220 [130]	127.4	206.7	275.8	2.429	6.81	6.29	3.21	2.65	2.28	1.78
250 [140]	183.9	245.4	341.4	2.435	5.33	5.16	3.61	3.13	1.25	1.07
280 [160]	198.6	281.6	318.0	2.415	5.25	5.03	1.77	1.36	1.52	1.23

TABLA N° 2

Tamaño máximo del árido (mm)	Porcentaje de finos (%)
100	10.5
80	10.8
60	11.2
40	12.0

presadas, los comprendidos dentro del dominio definido por $250 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ en cantidad de conglomerante y $140 \pm 5 \text{ l/m}^3$ en contenido de agua.

3.1. PROPUESTA DE UN MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES R.C.C. (MÉTODO U.C.)

El método de dosificación que se propone es el siguiente:

- 1.- Caracterización de los materiales.
- 2.- Se aproxima la combinación de los áridos parciales a una curva continua tipo Fuller, cuya forma viene definida por la ecuación (1):

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1)$$

en la que:

y, es el tanto por ciento en volumen elemental que pasa por el tamiz de abertura d.

d, es la abertura de cada uno de los tamices de la serie empleada en mm.

D, es el tamaño máximo del árido, en mm.

- 3.- Se predetermina un tipo de conglomerante. Caso de utilización de cementos tipo I y cenizas volantes clase F, se aconsejan unas proporciones entorno al 40/60 en peso.

4.- En la curva granulométrica de sólidos, la cantidad de finos, entendiéndose por finos la suma de los aportados por los áridos y el conglomerante, debe ser aproximada a las expresadas en la tabla n°2 en función del tamaño máximo del árido (los finos es el material que pasa por el tamiz n° 200 ASTM).

- 5.- Con la granulometría de áridos y cantidad de finos determinada se procede a variar la cantidad de agua y realizar los ensayos de medición

de consistencias de las mezclas por el método propuesto. Se aconsejan, en una primera fase, variaciones de agua de 10 l/m^3 .

6.- Se varía la cantidad de conglomerante determinada en el punto n° 4 por arriba o por abajo, según proceda, y con ésta fija, se varía la cantidad de agua. Se aconsejan en una primera fase variaciones de conglomerante de 15 kg/m^3 .

7.- Se repite el paso 6 hasta conseguir una envolvente de máximos que a su vez presentará un máximo.

8.- Los valores de conglomerante y agua definidos por el máximo de la envolvente nos fijan la dosificación del mortero. Manteniendo estas proporciones, se procede a variar la relación Volumen total/Volumen mortero, debiéndose obtener también en este caso un máximo.

9.- En función de los resultados obtenidos se procede o no a la realización de nuevos ensayos.

10.- Analizar la necesidad de variar la composición del conglomerante en función de las características exigidas.

Con esta metodología, se obtiene una dosificación para los hormigones R.C.C. de máxima manejabilidad y mejores características después de la puesta en obra, de una forma totalmente objetiva, y con un dominio de garantía amplio (dominio operacional de manejabilidades).

4. UNIÓN ENTRE TONGADAS

Como tercera característica, al hormigón R.C.C. se le exige que posibilite la unión entre tongadas bajo unas determinadas condiciones. La definición de las mismas para alcanzar una adecuada soldadura e impermeabilidad de las intercapas es un tema de trascendental importancia en el desarrollo de la técnica de construcción de Presas de R.C.C.

Cuando se mezcla un conglomerante con agua se inicia su rigidización que, en su primera fase, viene marcada por dos estadios: el inicio y el final del fraguado. Se establece el inicio de fraguado cuando la pasta comienza a perder su plasticidad y el final de fraguado se produce cuando desaparece totalmente. De acuerdo con las teorías de cinética de la hidratación de los conglomerantes hidráulicos, inmediatamente después de la mezcla del conglomerante con el agua la mezcla toma la forma de una estructura de gel (coloidal), mostrando un comportamiento tixotró-

pico. En este período, cuando actúa una fuerza exterior (vibración), esta estructura coagulativa del gel se destruye y se recupera, gradualmente, cuando cesa su acción. Con el transcurso de la hidratación, se transforma en una estructura coagulativa-cristalina y, finalmente, en una cristalina. La pasta de cemento de estructura cristalina no exhibe tixotropía.

Antes del inicio del fraguado la pasta presenta una estructura coagulativa. El inicio del fraguado señala el momento del comienzo de su transformación hacia una estructura cristalina. Finalizado el fraguado, la estructura es cristalina.

Numerosos investigadores han puesto de manifiesto la relación entre la resistencia a la penetración y el desarrollo de este proceso de transformación de la estructura de la pasta de un conglomerante hidráulico.

En pastas de conglomerantes con cenizas volantes, el tiempo durante el cual se mantiene una estructura coagulativa es mayor y se incrementa cuando su proporción en la mezcla aumenta. Con el incremento de la relación agua/producto cementicio, también se incrementa el período de estructura coagulativa.

Cuando se adicionan áridos y/o arena a una pasta, la misma se transforma en un hormigón y/o mortero. En este caso, la relación agua/producto cementicio disminuye al ser absorbida una parte del agua por los áridos creando una zona alrededor de los mismos con unas características peculiares, como ya se ha descrito en el apartado primero de este artículo. Sin embargo, el proceso cinético de hidratación del conglomerante y su relación con la resistencia a la penetración se mantienen.

También se han de tener en consideración las condiciones ambientales, ya que las mismas, para un determinado material, repercuten en su proceso de hidratación y, por lo tanto, en el desarrollo de su estructura interna.

4.1 INVESTIGACIÓN CHINA

Los investigadores chinos han desarrollado una intensa labor con el fin de profundizar en el conocimiento de la influencia de los parámetros de dosificación y de las condiciones medioambientales en la aptitud frente a la unión entre las tongadas de los hormigones R.C.C.. En este apartado, se presentan, de modo informativo, sus ideas rectoras.

La influencia de los parámetros medioambientales en el inicio del fraguado es la siguiente:

▼ El inicio del fraguado de una mezcla tiene una relación de tipo logarítmico con la temperatura.

▼ El inicio de fraguado de una mezcla muestra una relación de tipo lineal con la humedad del aire y su velocidad en la superficie. Esta relación es básicamente la misma para diferentes tipos de mezclas.

En las presas de R.C.C., la calidad de la unión entre tongadas está directamente relacionada con el estado de endurecimiento de la tongada inferior en una cierta profundidad. Si la tongada superior se coloca en obra antes del inicio de fraguado, bajo la acción de la vibración del compactador, la interfase entre tongadas se fusiona y, después del endurecimiento, las características de la interfase, impermeabilidad y resistencia a cortante, son las mismas que las del resto del material. Es decir, la presa está compuesta por un único material. Cuando la tongada superior se extiende en obra entre el principio y el final de fraguado de la tongada inferior, la calidad de la unión disminuye, empeorando a medida que avanza el proceso. Si la tongada superior se coloca después del final del fraguado, la calidad de la unión es pobre (aun con un hormigón rico en pasta, la resistencia a cortante es inferior a la del resto de la masa).

Los investigadores chinos han desarrollado una metodología de ensayo que permite determinar el inicio de fraguado en función de la resistencia a la penetración. De su aplicación, han formulado una serie de relaciones que se recogen en la referencia 8.

4.2 INVESTIGACIÓN FRANCESA

La investigación francesa discurre paralela a la china, pero con algunas matizaciones (Ref. 9). Las ideas rectoras son las mismas, siendo la relación del proceso de rigidización con la resistencia a la penetración, la base de todo el desarrollo de su trabajo.

Mediante un método similar (Proctor needle) al propuesto por los investigadores chinos, se obtiene una relación entre la resistencia a la penetración y el tiempo para unas determinadas condiciones ambientales y se determina el denominado índice DARC (resistencia a la penetración = 50

MPa), que es el tiempo máximo para el cual se obtiene una óptima unión entre tongadas. Mediante técnicas ultrasónicas, se determina el denominado índice ETP-VS, que fija el momento en el cual se produce la formación masiva de SCH.

La unión entre tongadas es óptima, si no ha transcurrido el tiempo definido por el índice DARC. Entre este índice y el índice ETP-VS, la unión va perdiendo calidad a medida que se acerca al segundo. Después del índice ETP-VS, la unión entre tongadas es pobre.

4.3 INVESTIGACIÓN DEL GRUPO SOBRE R.C.C. DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Los trabajos desarrollados por este grupo en el último año y medio, se desarrollan en el mismo sentido que las investigaciones anteriormente expuestas. Los trabajos realizados muestran resultados en el mismo camino que los obtenidos en las ya comentadas.

En la actualidad, se está desarrollando un aparataje de laboratorio que permita reflejar fielmente el fenómeno de variación de la resistencia a la penetración y su relación con el proceso cinético de hidratación del conglomerante. Con este fin, se analiza la influencia de:

- ▼ Velocidad de penetración
- ▼ Forma y tamaño de la sonda
- ▼ Máxima penetración de medida
- ▼ Forma de obtención de datos

Asimismo, se trabaja en la creación de una metodología que permita determinar el estado de las tongadas frente a su aptitud frente a la unión en obra.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **Jiménez Montoya, P., García Meseguer, A. y Morán Cabré, F.** "Hormigón Armado". Gustavo Gili. España, 1979.
- 2.- **Fernández Cánovas, M.** "Hormigón". Rugar-te. España, 1989.
- 3.- **Neville, A. M.** "Concrete Technology". Londres, 1987.
- 4.- **Baron, J, Sauterey, R.** "Le Beton Hydraulique". París, 1982.
- 5.- **Lesage, R.** "Etude Experimentale de la Mise en Place du Béton Frais". París, 1974.
- 6.- **García, R.** "Diseño y caracterización de hormigones compactados con rodillo. Aplicación a presas de fábrica". Tesis Doctoral. Escuela de Caminos, Canales y Puertos. Santander (España), 1993.
- 7.- **Cabrera, J. G., Lee, R. E.** "A new method for the measurement of workability of high pulverised fuel ash concrete". 7th Ash Utilization Symposium. Orlando (Florida), 1985.
- 8.- **Zeng Li, Fang Kunhe.** "The setting state of RCC and the control of binding quality between the layers" Symposium on RCC. Santander (España), 1995.
- 9.- **Ho Ta Khanh, Delorme, F, Valon, R.** "RCC laboratory tests: experience acquired in the past ten years and new developments" Symposium on RCC. Santander (España), 1995.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Gómez Laá, G.** "Evolución de los hormigones de Presas hacia el RCC". No publicado
- Kumar Mehta, P.** "Concrete, structure, properties and materials". Prentice Hall. N. J. 1993
- Baron, J. & Sauterey, R.** "Le beton hydraulique". Presses L.E.N.P.C. París. 1992. ●