## El control de calidad del hormigón. La durabilidad

### ENRIQUE MAYA MIRANDA

DR. ARQUITECTO

La exigencia de calidad total en la edificación, en lo que respecta al hormigón, tiene su reflejo en las propuestas que, elaboradas por la Comisión Permanente del Hormigón, establecen la conveniencia de impulsar de forma decidida una mejora de su calidad, potenciando su durabilidad. Esta exigencia se articula desde las propuestas al definir el proceso de

En este artículo se analiza el contenido de las propuestas aportando nuevos datos y criterios que pueden servir para la definición del nuevo articulado antes de su adopción reglamentaria con su incorporación en la revisión de la Instrucción EH-91.

The requirement of total quality in construction, including that of concrete, has lead the "Comisión Permanente del Hormigón" to elaborate new guidelines that will enforce quality improvement and better durability of concrete. This paper analyzes the content of the proposed guidelines, and provides new data and criteria prior to the definition and revision of the concrete code EH 91.

La creciente sensibilización sobre la importancia del control de calidad en general y en la edificación en particular debe tener necesariamente un reflejo normativo en el ámbito de las estructuras de hormigón armado. Este material, considerado "eterno" desde una visión simplista de su comportamiento, manifiesta que los costes de la no calidad por falta de durabilidad crecen geométricamente,por lo que ya no es posible construir en hormigón sin garantizar aquella.

En esta situación, resulta lógico que desde las "Propuestas para mejorar la calidad del hormigón", elaboradas por la Comisión Permanente del Hormigón se incida fundamentalmente en el control de su durabilidad.

El proceso de control, recogido en las propuestas de la Comisión Permanente, se basa en el "Estudio comparativo sobre las limitaciones de permeabilidad del hormigón en las normativas española y europea", realizado en el CEDEX<sup>2</sup> para complementar el articulado básico de la Instrucción EH-91.

En la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Navarra (ETSAN) se ha realizado el "Estudio de la permeabilidad al agua de los hormigones fabricados con árido de las canteras de Navarra"3, que aporta datos y conclusiones que pueden servir de contraste con los aportados desde las propuestas.

Con objeto de dotar de mayor claridad a este artículo, en lo sucesivo se designará como CEDEX y ETSAN respectivamente los datos o análisis que provengan de los citados estudios.

### **CONTROL DE DURABILIDAD DESDE LAS PROPUESTAS**

El control experimental de la durabilidad (se supone un correcto control documental de la relación A/C y contenido de cemento), se define en el articulo 65.2 de las propuestas, y se realiza del siguiente modo:

- 1. El ensayo consiste en determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión de acuerdo a UNE. 83.309/90.
- 2. Se toman tres probetas por cada tipo de hormigón (de distinta consistencia ó resistencia), pertenecientes, preferentemente, a una de las primeras amasadas de cada tipo.
- 3. Se obtienen las profundidades máximas de penetración y se ordenan de menor a mayor ( $Z_1 \le Z_2 \le Z_3$ ).
- 4. Se obtienen las profundidades medias de penetración y se ordenan de menor a mayor  $(T_1 \le T_2 \le T_3)$ .
- 5. Se acepta el tipo de hormigón ensayado si:

$$Z_{m} = \frac{Z_{1} + Z_{2} + Z_{3}}{3} \le 50 \text{ mm}$$
  
 $Z_{3} \le 65 \text{ mm}$ 

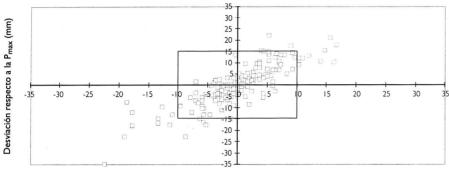
$$T_{m} = \frac{T_{1} + T_{2} + T_{3}}{3} \le 30 \text{ mm}$$
 $T_{3} \le 40 \text{ mm}$ 

6. En caso contrario se podrá, a juicio del Director de Obra y a costa del constructor, realizar un estudio de evaluación de los resultados y de las características reales del hormigón empleado.

### **BASES PARA UNA NUEVA PROPUESTA**

Para analizar el proceso de control resumido en el apartado anterior y las determinaciones establecidas se van a comparar éstas con las definidas para el control de resistencia a compresión del hormigón:

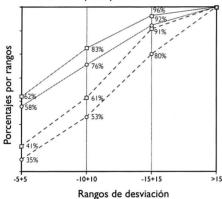
#### Ensayo de penetración de agua Desviaciones respecto de las medias



Desviación respecto a la P<sub>med</sub> (mm)

Gráfico I

### Desviaciones para penetraciones máximas

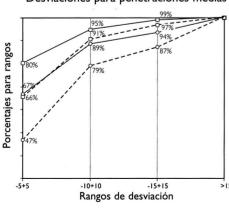


\_\_\_\_\_ % En amasadas Zm < 50 mm

- o - - % Amasadas totales en rango

———— % Amasadas totales en rangos para Zm < 50 mm

### Desviaciones para penetraciones medias



\_\_\_\_\_ % Probetas por rangos

—**□**— % e n amasadas Tm < 30 mm

\_ \_ -o\_ \_ . % amasadas totales en rangos

- -n- - . % Amasadas totales en rangos para Tm < 30

#### Gráfico 2

## Definición de los valores de penetración en una amasada

En el artículo 10.3 de la Instrucción EH-91, que se refiere a las características mecánicas del hormigón, se establece que la media de los valores de rotura de las tres probetas de una misma amasada se considera representativa de la misma cuando cada valor se encuentra dentro del rango ± 15% de ese valor medio.

Por el contrario, desde las propuestas que se analizan nada se señala a este respecto, y se aceptan implícitamente desviaciones medias muy superiores al admitirse valores de hasta 40 mm para las penetraciones medias y de 65 mm para las máximas con media de 30 y 50 mm respectivamente.

Esta diferencia de exigencia se deriva de las conclusiones del ya citado trabajo realizado en el CEDEX en el que se justifican esas desviaciones por comprobación de que en los ensayos realizados, el 90% de las probetas se encuentran en el rango ± 10 mm para penetraciones medias y ± 15 mm para penetraciones máximas, de forma que se considera aceptable una amasada cuando, además de cumplir con el valor de la media antes señalado, ninguna probeta excede de las citadas desviaciones.

En los ensayos realizados en la ETSAN se han obtenido las desviaciones recogidas en el gráfico 1, que resultan prácticamente iguales a las de aquel estudio. Así, el 89% de las desviaciones para penetraciones medias no supera los  $\pm$  10 mm, mientras que para las máximas el 92% de las probetas no supera los  $\pm$  15 mm

Sin embargo no resulta lógico, desde el punto de vista de la fiabilidad estadística, aceptar esos valores de desviación por la simple constatación de que prácticamente ninguna probeta los supere, por cuanto con ese criterio resulta que, en la práctica, se aceptan todas las amasadas que cumplen con los valores medios de penetración, con independencia de las dispersiones de los valores. Por ello, es preciso profundizar en el análisis de este aspecto del articulado.

Un primer análisis se centra en conocer los valores de las desviaciones sólo para aquellas amasadas que cumplen con los valores medios exigidos ( $T_m \le 30 \text{ mm \'o } Z_m \le 50 \text{ mm}$ ). En este caso, el porcentaje de cumplimiento para penetraciones medias (rango ± 10 mm) es del 95% y del 96% para las máximas (rango ± 15 mm). Con este criterio, pudieran definirse unos valores inferiores de desviación, es decir, ± 5 mm para penetraciones medias y ± 10 mm para máximas, en cuyo caso los porcentajes de cumplimiento serían del 80% para penetraciones medias y del 83% para las máximas.

Sin embargo, continuado con el mismo análisis, si se consideran exclusivamente las amasadas en las que todas las probetas cumplen con esos valores de desviación, siempre en el caso de cumplimiento de valores medios, resulta que sólo el 66% de ellas se encontrarían en el rango ± 5 mm para medias y el 61% en el rango ± 10 mm para máximas (gráfico 2).

En cualquier caso, con independencia de lo anterior, para la definición de las dispersiones admisibles en cada amasada respecto de la media

de las tres probetas no debieran definirse las desviaciones totales, en mm, sino desviaciones medias ó dispersiones que son las que, a partir del valor medio de las muestras, definen los valores del cuantil del 95%.

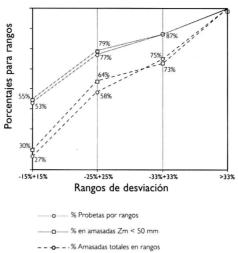
Con este criterio, se observa en el gráfico 3 cómo el 61% de los valores de penetración media se encuentran en el rango del ± 15% de desviación media mientras que para las penetraciones máximas sólo se llega al 55%. Las amasadas con todas las probetas en el rango ± 15%, apenas superan el 35%, tanto para penetraciones medias como máximas. Considerando una dispersión media del 25% se observa que aproximadamente las dos terceras partes de las amasadas se encuentran con todas las probetas en ese rango.

En conclusión parece razonable establecer un criterio más restrictivo que el definido en la propuestas, aceptando inicialmente sólo aquellas amasadas en las que todos sus valores de penetración presenten una desviación media no superior al 25% respecto de la media aritmética, tanto para penetraciones medias como máximas. Se acepta que la medición se va a realizar con 1 mm de precisión.

### Criterios básicos para la definición de los ensayos

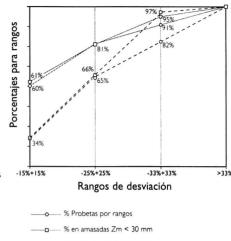
Para poder tomar cualquier decisión sobre un proceso determinado a la vista de los resultados obtenidos en una muestra de población es necesario definir previamente el nivel de confianza con que quiera tomarse esa decisión. En el control de resistencias ese nivel es del 95%, de manera que se define como Resistencia de proyecto (f<sub>ck</sub>) aquel valor que se adopta en proyecto asociado a un nivel de confianza del 95%. En el caso del control de permeabilidad se desconoce el valor de dicho nivel de confianza. Debe entenderse que éste también es del 95%, por lo que en

Desviaciones medias para penetraciones máximas



- - - - - - - - - - - - - - - MAMASADAS totales en rangos para Zm<50 mm

Desviaciones medias para penetraciones medias



- - -o- - · % Amasadas totales en rangos

- - - - - - - - - - - Masadas totales en rangos para Zm<30 mm

Gráfico 3

realidad a los valores de penetración se les debiera designar como T<sub>ck</sub> y  $Z_{ck}$ , debiendo cumplirse:

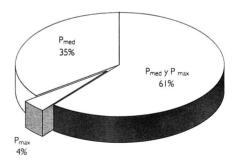
$$T_{ck} \le 30 \text{ mm}$$
  
 $Z_{ck} \le 50 \text{ mm}$ 

El control de la permeabilidad tiene entonces por objeto comprobar el cumplimiento de dichas exigencias en base a criterios estadísticos, a partir normalmente del valor medio y de las dispersiones de las muestras que se tomen.

En este sentido, resulta sorprendente comprobar cómo desde las propuestas se exigen unos determinados valores de penetración y en cambio no se establecen los medios necesarios para su control con los adecuados niveles de confianza.

En el caso del control de resistencias se definen distintos procesos de comprobación estadística, en función de que se trate de ensayos previos, característicos o de control. En el caso del control experimental de la durabilidad, a la vista de la complejidad de los ensavos a realizar, parece razonable definir el control a partir de un número inferior

Motivos de incumplimiento ensayo Cedex (Considerando  $T_m$ ,  $Z_m$ )



Motivos de incumplimiento ensayo ETSAN (Considerando  $T_m$ ,  $Z_m$ )

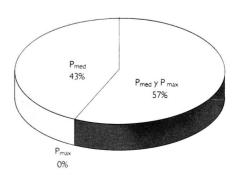
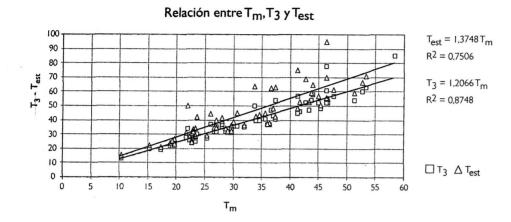
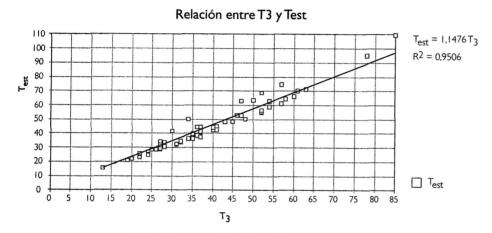
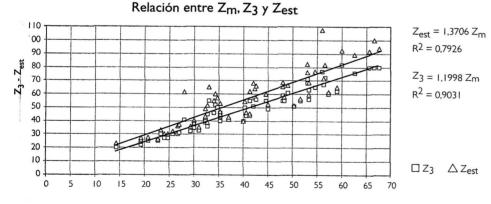
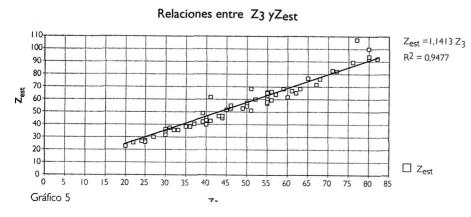


Gráfico 4









de probetas, tomando como punto de partida los aparatos de ensayo de 3 ó 6 celdillas.

En el supuesto más desfavorable, es decir, ensayo de tres probetas sobre una sola amasada, no basta con conocer el valor de la media de los tres valores y comprobar si la desviación media de cada probeta se encuentra en el rango ±25%, por cuanto ello no resulta estadísticamente fiable.

En tanto no se disponga de datos ciertos y suficientes sobre las dispersiones que se producen en este tipo de ensayo es preciso estimar el cuantil del 5% en la distribución teórica de penetraciones obtenidas por el tratamiento estadístico de los valores individuales aplicando la teoría de las pequeñas muestras a partir de la Distribución de Student.

La adopción de este criterio implica adoptar la igualdad:

# Valor estimado = Valor medio × $\times (1 + 2,065 \delta)$

siendo  $\delta$  el coeficiente de dispersión de la muestra.

Con las notaciones empleadas desde las propuestas se pueden definir las ecuaciones:

$$T_{est} = T_{m} (1 + 2,065 \delta)$$

$$Z_{est} = Z_{m} (1 + 2,065 \delta)$$

El control tiene entonces por objeto comprobar que:

$$T_{est} \leq T_{ck}$$

$$Z_{est} \le Z_{ck}$$

# Exigencias en los valores de penetración de agua

Continuando con la comparación entre los ensayos realizados en el CEDEX y los efectuados en la ETSAN (gráfico 4) se puede observar que, en ambos casos, los incumplimientos apenas tienen lugar por causa exclusiva de las penetraciones

Esto justifica nuevamente que resulta razonable la propuesta de establecer el nivel de exigencia en las penetraciones medias 30 mm en lugar de los 20 mm propuestos desde la Normativa Europea y que incluso pudiera establecerse una limitación aún menos exigente.

También resulta significativo comprobar cómo en los motivos de incumplimiento no tienen ninguna incidencia los valores  $T_3$  y  $Z_3$  de forma que son únicamente los valores de  $T_m$  y  $Z_m$  los que van a definir la calidad de impermeable de un hormigón.

Esto demuestra nuevamente que los valores admisibles para  $T_3$  y  $Z_3$  son excesivos.

# Definición del control de la permeabilidad

En este punto, se pretende aportar aquellos datos que se entiende pueden resultar de interés para la definición de los ensayos de durabilidad de los hormigones.

### Relación entre valores medios, máximos y característicos

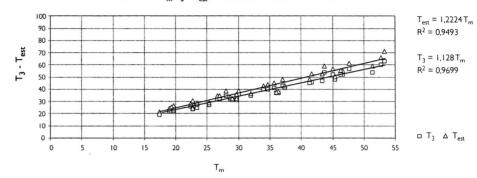
Tomando como punto de partida el ensayo sobre tres probetas, se obtienen las siguientes relaciones: (gráfico 5)

$$T_{est} = 1.3748 T_m = 1.1476 T_3$$
 $Z_{est} = 1.3706 Z_m = 1.1413 Z_3$ 
 $T_3 = 1.2066 T_m$ 
 $Z_3 = 1.1998 Z_m$ 

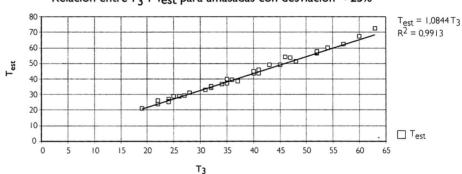
Estas relaciones vienen a verificar lo siguiente:

- La consideración del valor medio de los valores de penetración, máxima o media, da lugar a un error del orden del 40% respecto al valor estimado con un nivel de confianza del 95%.
- El valor estimado de penetración es del orden del 15% superior al

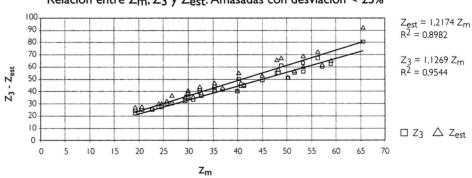
### Relación entre $T_m$ , $T_3 Y T_{est}$ . Amasadas con desviación < 25%



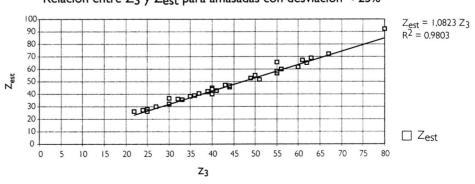
Relación entre T<sub>3</sub> Y T<sub>est</sub> para amasadas con desviación < 25%



Relación entre  $Z_m$ ,  $Z_3$  y  $Z_{est}$ . Amasadas con desviación < 25%



Relación entre Z<sub>3</sub> y Z<sub>est</sub> para amasadas con desviación < 25%



Gráfica 6

#### LIMITACIONES PARA EL CONTROL DE LA PENETRACIÓN DEL AGUA

| PROPUESTA   | PENETRACIÓN MEDIA         | PENETARCIÓN MÁXIMA        |  |  |
|---|---------------------------|---------------------------|--|--|
| CEDEX   | Tm < 30 mm<br>T3 < 40 mm  | Zm < 50 mm<br>Z3 < 65 mm  |  |  |
| E.T.S.A.N.  | Tm < 30 mm<br>T3 < 40 mm  | Zm < 50 mm<br>Z3 < 65 mm  |  |  |
| E.T.S.A.N. I  | Tck < 30 mm               | Zck < 50 mm               |  |  |
| E.T.S.A.N. 2  | Tck < 40 mm               | Zck < 60 mm               |  |  |
| E.T.S.A.N. 3<br>(Amasadas con desviación < 25%)   | T3 < 40 mm                | Z3 < 60 mm                |  |  |
| E.T.S.A.N. 4 (*)<br>(Amasadas con desviación < 25%)   | Tck < 40 mm<br>T3 < 40 mm | Zck < 60 mm<br>Z3 < 60 mm |  |  |
| (*): En esta propuesta se incluyen las que cumplen una u otra limitación. (ETSAN 2 ó ETSAN 3) |                           |                           |  |  |

Cuadro I

#### **CUMPLIMIENTO DE LAS LIMITACIONES DE LAS DISTINTAS PROPUESTAS**

| PROPUESTA    | CUMPLEN | INCUMPLEN PENETRACION |        |       |
|--------------|---------|-----------------------|--------|-------|
|              |         | MEDIA Y MAXIMA        | MAXIMA | MEDIA |
| CEDEX        | 46%     | 33%                   | 2%     | 19%   |
| E.T.S.A.N.   | 53%     | 27%                   | 0%     | 20%   |
| E.T.S.A.N. I | 22%     | 57%                   | 2%     | 20%   |
| E.T.S.A.N. 2 | 48%     | 35%                   | 3%     | 13%   |
| E.T.S.A.N. 3 | 38%     | 47%                   | 5%     | 10%   |
| E.T.S.A.N. 4 | 48%     | 32%                   | 5%     | 15%   |

Cuadro 2

valor máximo de las tres probetas de la amasada.

– La previsión de desviaciones en los valores de penetración establecida desde las propuestas ( $T_3 = 40 \text{ mm}$ ;  $Z_3 = 65 \text{ mm}$ ) resulta excesiva. Con la aplicación de las anteriores igualdades a los valores medios 30 y 50 mm resultaría:

$$T_3 = 36 \text{ mm}$$
  $Z_3 = 60 \text{ mm}$ 

Si se analizan exclusivamente los valores de penetración de aquellas amasadas en las que la desviación de los valores es inferior al 25% resultan las igualdades (gráfico 6):

$$T_{est} = 1,2224 T_m = 1,0844 T_3$$
  
 $Z_{est} = 1,2174 Z_m = 1,0823 Z_3$ 

$$T_3 = 1,1280 T_m$$

$$Z_3 = 1,1269 Z_m$$

Es decir:

– El error cometido al adoptar el valor medio de los valores de penetración, máxima o media como valor estimado se reduciría en este caso al 20%.

- Este valor estimado es del orden del 8% superior al valor máximo de las tres probetas de la amasada.
- La previsión de desviaciones resultaría en este caso:

$$T_3 = 34 \text{ mm}$$
  $Z_3 = 56 \text{ mm}$ 

# Bases para la definición del ensayo

De acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior, resulta razonable establecer las exigencias en los valores de penetración como **valores de proyecto**, comprobando su cumplimiento mediante el cálculo de los valores estimados.

Para comprobar los posibles niveles de exigencia se aporta un análisis comparativo sobre distintas limitaciones que se resumen en el cuadro 1.

Los resultados obtenidos se reflejan en el cuadro 2.

A la vista de los cuadros aportados se puede señalar:

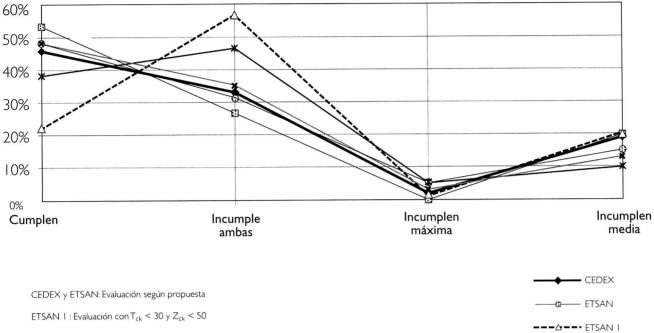
- La consideración de las limitaciones a las profundidades de penetración establecidas desde las propuestas (50-30 mm) como valores de proyecto da lugar a un muy importante incremento de las amasadas que las incumplen, pasándose de un 53 a un 22% de amasadas que se pueden definir como hormigones impermeables.
- Supuesto que la proporción de incumplimientos con las exigencias en los valores de penetración establecidos desde las propuestas fuesen razonables ( $T_{\rm m} < 30~{\rm mm}$ ;  $Z_{\rm m} < 50~{\rm mm}$ ), se pueden definir los valores  $T_{\rm est}$  y  $Z_{\rm est}$  que dan lugar a la misma proporción de cumplimientos que en aquel caso.

Así, en el cuadro anterior se puede observar que la proporción de incumplimientos es similar en aquel caso que en el de establecer los siguientes valores de proyecto:

$$T_{ck} \le 40 \text{ mm}$$

$$Z_{ck} \le 60 \text{ mm}$$

## Motivos de incumplimiento de ensayos de penetración Comparación entre ensayos CEDEX y ETSA



ETSAN 2: Evaluación con  $T_{ck}$  < 40 y  $Z_{ck}$  < 60 (I) ETSAN 3: Evaluación con  $T_3 \le 40$  y  $Z_3 \le 60$  para amasadas de desviación  $\le 25\%$  (II) ETSAN 4: Evaluación con I o II

— etsan 2 — ETSAN 3 - ETSAN 4

Gráfico 7

## Motivos de incumplimiento de ensayos de penetración Comparación entre ensayos del CEDEX y ETSAN

ETSAN  $2:T_{ck} \le 40 \text{ mm} - Z_{ck} \le 60 \text{ mm}$ 

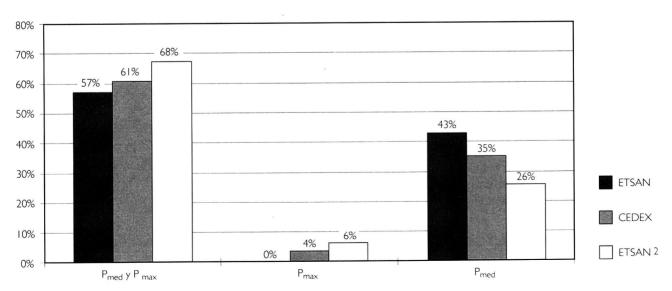


Gráfico 8

– Si se consideran las amasadas en las que todos los valores de penetración, tanto media como máxima, presentan una desviación inferior al 25%, se produce una disminución de los casos de cumplimiento hasta el 38% al considerar:

 $T3 \le 40 \text{ mm}$ 

 $Z3 \le 60 \text{ mm}$ 

- Si se considera la posibilidad de evaluar la permeabilidad indistintamente por cualquiera de los dos procesos anteriores, tomando el más favorable, es decir:
- 1. Comprobar que en la amasada no existe ninguna probeta con desviación media superior al 25%. De ser así, comprobar que:

 $T3 \le 40 \text{ mm}$ 

 $Z3 \le 60 \text{ mm}$ 

2. De no darse cumplimiento a lo señalado en el punto anterior, bien para las desviaciones medias, bien para los valores de penetración, verificar si:

 $Tck \le 40 \text{ mm}$ 

 $Zck \le 60 \text{ mm}$ 

resulta también un 48% de incumplimientos, con un pequeño incremento de incumplimientos parciales (sólo máxima o sólo media) en detrimento de las amasadas que incumplen ambas limitaciones.

En el gráfico 7 se resumen los

motivos de incumplimiento para todas las hipótesis manejadas, mientras que en el gráfico 8 se recogen las tres hipótesis más significativas

## Conclusiones. Nueva propuesta de control

Resulta razonable definir como impermeable aquel hormigón en el que se cumple simultáneamente: (I)

$$T_{ck} \le 40 \text{ mm}$$

$$Z_{ck} \le 60 \text{ mm}$$

siendo el objeto del control verificar que:

$$T_{est} \le T_{ck}$$

$$Z_{est} \leq Z_{ck}$$

para lo cual se podrá llevar a cabo el siguiente proceso:

- 1. Comprobar que en la amasada todos los valores presentan una desviación inferior al 25% respecto de la media
  - 2. Comprobar que

$$T_3 \le T_{ck}$$

$$Z_3 \leq Z_{ck}$$

3. En caso de incumplirse la condición anterior, calcular

$$T_{est} = T_m (1 + 2,065 \delta)$$

$$Z_{est} = Z_{m} (1 + 2,065 \delta)$$

y efectuar la comprobación señalada como (I).

### **BIBLIOGRAFÍA**

- I. COMISION PERMANENTE DEL HORMI-GON. PROPUESTAS PARA MEJORAR LA CALI-DAD DEL HORMIGÓN. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE. 1994.
- 2. MAYA MIRANDA E.: ESTUDIO DE LA PER-MEABILIDAD AL AGUA DE LOS HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDO DE LAS CANTERAS DE NAVARRA. TESIS DOCTORAL. ETSA DE LA UNIVERSIDAD DE NAVARRA. PAMPLONA. 1992.
- **3.** GALLIGO ESTEVEZ, J.M.; RODRÍGUEZ GARCÍA, F.: ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE LAS LIMITACIONES DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN EN LAS NORMATIVAS ESPAÑOLA Y EUROPEA. HORMIGÓN Y ACERO N° 195, 1995.