

Consideraciones para la definición de los ensayos de control de permeabilidad al agua del hormigón

ENRIQUE MAYA MIRANDA, ARQUITECTO

INDICE GENERAL

0. Sumario.
1. La permeabilidad al agua en la Instrucción EH-91.
2. El control de calidad del hormigón en relación a su permeabilidad: Criterios generales.
3. Bases para la definición de los ensayos de control.
4. Conclusiones.

0. SUMARIO

En la Instrucción EH-91, en los comentarios a su artículo 24.4, se considera por primera vez la posibilidad expresa de realizar ensayos de permeabilidad del hormigón al agua, de acuerdo con la Norma UNE 83309/90 para la determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión. La introducción de este comentario en el artículo que se refiere a la "Prevención y protección contra acciones físicas y químicas" define por sí misma la importancia que la instrucción otorga al conocimiento de la permeabilidad en relación a la durabilidad del hormigón.

En el artículo que se expone a continuación se analizan aquellos aspectos que se han considerado de interés en relación a lo señalado en la instrucción a la luz de los ensayos efectuados en el Laboratorio de Edificación de la ETSAN.

1. LA PERMEABILIDAD AL AGUA EN LA INSTRUCCION EH-91

En la Instrucción EH-91 se establecen dos modos distintos de control de la permeabilidad al agua del hormigón (Artículo 24.4):

CONTROL INDIRECTO: Es el que se denomina "preventivo" y consiste en adoptar todas las medidas necesarias antes y durante la ejecución del hormigón para conseguir un valor de permeabilidad suficientemente bajo. Se trata de controlar el valor de la relación agua-cemento, del contenido de cemento y prever unos recubrimientos mínimos de las armaduras. Con este control, supuesta una correcta granulometría y un compactado y curado adecuados, se consiguen hormigones durables en

cualquiera de los ambientes recogidos en la instrucción.

CONTROL DIRECTO: Consiste en medir la permeabilidad mediante el ensayo recogido en la Norma UNE 83309, cuya realización se recomienda en casos especiales

En realidad la instrucción no aporta nada nuevo con este comentario por cuanto ésta ya prevé, en el artículo 4.4, la posibilidad de realizar ensayos destinados a medir características especiales del hormigón mediante métodos de ensayo no incluidos en la misma. Tampoco se establece si existe algún caso en que el ensayo deba realizarse preceptivamente. Sólo se deduce que debería realizarse en obras sometidas a un ambiente extremadamente agresivo superior incluso a nivel III ya que la propia instrucción señala que en este último suele ser suficiente con el control indirecto.

El aspecto más positivo de la instrucción a este respecto es la aportación de unos límites a cumplir en los valores de penetración para poder considerar el hormigón como impermeable.

Los límites establecidos por la instrucción son de 50mm. para la penetración máxima y 20mm. para la media, medidas de acuerdo a la Norma UNE 83309 (figura 1)

2. EL CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGON EN RELACION A SU PERMEABILIDAD: CRITERIOS GENERALES

Centrando el análisis en el control directo, debe destacarse la diferencia de tratamiento que existe en la instrucción entre este control y el de la resistencia a compresión.

La norma UNE define la forma en que se realiza

el ensayo sobre un mínimo de tres probetas, aportando como datos, entre otros de menor interés, los valores de penetración máxima y media de cada una de ellas, expresando los resultados con un redondeo a 5 mm. No aporta, y no tiene por qué hacerlo, criterio alguno para el tratamiento de dichos datos. Por ello, cuando la instrucción define los límites a los valores de penetración no se sabe si se refiere a cada probeta individualmente, a la media de ellas, si deben tenerse en cuenta las dispersiones o qué influencia tiene el número de probetas ensayadas.

Para intentar responder a estas cuestiones debe acudir a la propia instrucción con objeto de adoptar criterios al respecto.

• En su artículo 10.2 se recogen las dos exigencias que deben tenerse en cuenta para **controlar cualquier característica del hormigón** :

a) Las condiciones deben cumplirse por todas las masas componentes del total, admitiéndose un porcentaje máximo de defectuosas que debe ser definido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. La instrucción define este porcentaje únicamente en el control de resistencia a compresión, limitándolo a un 5%. No obstante, señala

que, con el nivel actual de la tecnología, es perfectamente aceptable ese nivel de confianza del 95% para la mayoría de las características del hormigón.

b) Cualquier característica de calidad medible de una masa vendrá expresada por el valor medio de las determinaciones efectuadas (en número mayor o igual a tres).

En los comentarios al artículo 10.3 (Características Mecánicas) se señala que cuando la desviación de los resultados de una misma masa sobrepase ciertos límites parece razonable no concederles representatividad, estableciéndose que pueden considerarse en tal situación resultados que difieran de la media en +/- 15%. El hecho de adoptar como valor la media presupone la completa homogeneidad de la masa atribuyendo las dispersiones a errores propios de los métodos de ensayo.

• Aparte de estas consideraciones generales existe una total indefinición respecto de las condiciones a exigir en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares respecto de la forma de controlar la permeabilidad del hormigón al agua. Ante esta situación parece interesante recordar lo que la instrucción señala respecto al control de resistencia del hormigón:

a) En primer lugar, se establecen las definiciones de:

- RESISTENCIA DE PROYECTO (f_{ck}): Valor que se adopta en proyecto asociado a un nivel de confianza del 95%

- RESISTENCIA CARACTERISTICA REAL ($f_{c\ real}$): Valor del cuantil del 5% de la distribución de resistencia en obra.

- RESISTENCIA CARACTERISTICA ESTIMADA (f_{est}): Valor que cuantifica la real de obra a partir de un número finito de datos.

b) En segundo lugar se establece que el objeto del control es garantizar que a lo sumo el 5% de las masas tiene una resistencia igual o menor a la de proyecto.

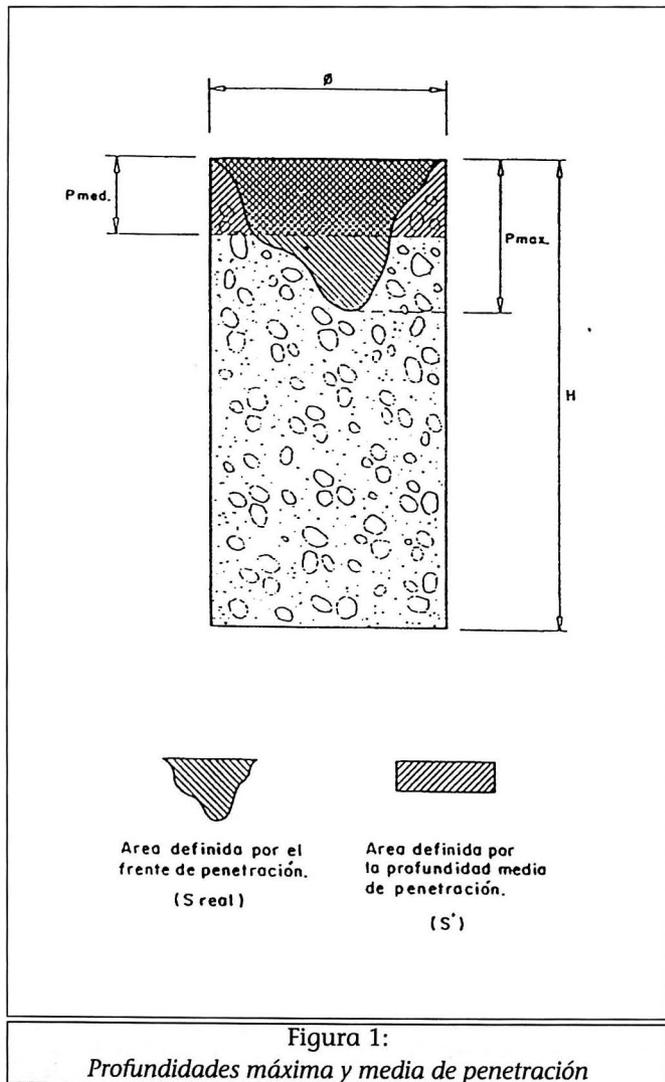
c) En tercer lugar, se definen los ensayos a realizar:

- E. PREVIOS: Se realizan en laboratorio sobre cuatro masas de tres probetas para establecer la dosificación a emplear. Son preceptivos, salvo experiencia previa.

-E. CARACTERISTICOS: Se realizan sobre hormigón ejecutado en obra con seis masas de tres probetas para comprobar la dosificación teórica. Son preceptivos salvo experiencia previa.

- E. DE CONTROL: Se realiza sobre probetas tomadas de obra y tiene por objeto comprobar que la resistencia característica de obra es superior a la de proyecto. Son preceptivos en todos los casos. El control puede ser total o estadístico y, éste último, a nivel reducido, normal o intenso.

- E. DE INFORMACION: Se realizan en casos especiales o cuando el ensayo de control no de resulta-



dos satisfactorios, sobre hormigón ya colocado en obra. En general no son preceptivos.

3. BASES PARA LA DEFINICION DE LOS ENSAYOS DE CONTROL

De todo lo recogido hasta ahora, de acuerdo a lo señalado por la instrucción, existen elementos de juicio suficientes para definir las condiciones a cumplir por un hormigón respecto de su permeabilidad.

1º. La definición de valores de penetración que establece la instrucción deben entenderse como penetraciones máxima y media de proyecto. Por analogía con la resistencia de proyecto se pueden simbolizar como P_{Mck} y P_{mck} respectivamente.

2º De acuerdo con el artículo 10.2, y a falta de más datos que pudieran recomendar lo contrario, parece lógico admitir niveles de confianza del 95 % para el control de la permeabilidad del hormigón.

3º Para aceptar o no, de una forma genérica, el valor medio de tres probetas como valor de penetración de agua en cada amasada se parte de la experiencia obtenida en los ensayos realizados en el Laboratorio de Edificación de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Navarra.

En este sentido se observa que, partiendo del margen de +/- 15% establecido por la instrucción para resistencias, poco más del 50% de los valores de penetración máxima cumplen con éste mientras que para las medias, la proporción no llega al 60%.

El porcentaje total de amasadas en que sus tres valores cumplen con la limitación no llega al 40%, para penetraciones medias mientras que para las máximas es del 30%. Poco más del 20% de las amasadas cumple con esta limitación en sus penetraciones máxima y media a la vez. De éstas, sólo el 8% presenta una penetración media inferior a 30 mm. y el 10% una máxima inferior a 50 mm.

El número total de amasadas en las que la desviación de sus tres probetas a sido inferior a +/- 15% que presentan penetraciones máxima y media inferior a 50 y 30 mm respectivamente es de 5 (8%).

Analizando este mismo aspecto desde el punto de vista de los coeficientes de dispersión se observa que éstos varían mucho, tanto por canteras como por consistencias. Así, en una de las canteras, las dispersiones varían entre 0,04 y 0,63 para las penetraciones medias y entre 0,04 y 0,58 para las máximas. Dentro de una misma consistencia se llegan a observar dispersiones entre 0,03 y 0,63.

La media de las dispersiones de todas las canteras es de 0,17 para las penetraciones medias y de 0,20 para las máximas. Estos valores, aunque tienen una escasa representatividad por provenir de

amasadas muy distintas entre sí, pueden ser interesantes por aportar un conocimiento global de los hormigones estudiados.

Las amasadas que cumplen con la limitación del +/- 15% presentan coeficientes de dispersión no superiores a 0,10. Sólo en un caso en que éste es superior (0,11) se cumple aquella condición.

En cualquier caso, parece obvio que los valores obtenidos no aconsejan tomar como valor de penetración, media o máxima, la media de los valores de las tres probetas ya que las dispersiones son muy altas y ese valor no es representativo de la amasada.

En este momento no es posible conocer el motivo de esas dispersiones, si se deben al método de ensayo o la propia características medida.

Por ello, y dado el carácter casi excepcional que la instrucción otorga a este ensayo, parece recomendable adoptar ya desde la definición de penetración en cada amasada el nivel de confianza del 95%. Así, la penetración será el valor obtenido por la estimación del cuantil del 5% en la distribución teórica de penetraciones obtenidas a partir del 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 la aplicación de la igualdad:

$$V. CARAC. = V. MEDIO + (s \times t_c) / (N-1)^{0.5}$$

siendo:

s= Desviación típica de la muestra

tc= Según tabla 1 para 95% y $\sqrt{2}$ (N-1) resulta tc=2,92

N= número de probetas, en este caso 3.

Con estos valores se obtiene:

$$V. CARACTERISTICO. = VALOR MEDIO + 2,065 s$$

o también:

$$V_{est} = V_{medio} (1 + 2,065 \partial) \quad (1)$$

siendo:

∂ = Coeficiente de dispersión de la muestra.

En los ensayos efectuados (Figura 2) se ha obtenido que, en general, también se puede aplicar la igualdad:

$$V_{est} = 1,15 \times V_{max}$$

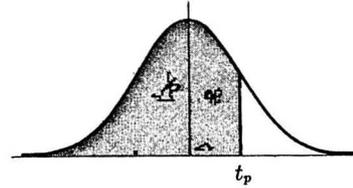
siendo:

V_{max} = valor máximo de la serie de tres probetas.

No obstante, esta igualdad es empírica y su empleo debe ser puramente orientativo.

4º. Una vez establecido el proceso para obtener el valor de penetración de una amasada a partir de tres valores individuales pasamos a describir el ne-

Valores percentiles (t_p) para la distribución t de Student con ν grados de libertad (área en sombra = p)



ν	$t_{.995}$	$t_{.99}$	$t_{.975}$	$t_{.95}$	$t_{.90}$	$t_{.80}$	$t_{.75}$	$t_{.70}$	$t_{.60}$	$t_{.55}$
1	63.66	31.82	12.71	6.31	3.08	1.376	1.000	.727	.325	.158
2	9.92	6.96	4.30	2.92	1.89	1.061	.816	.617	.289	.142
3	5.84	4.54	3.18	2.35	1.64	.978	.765	.584	.277	.137
4	4.60	3.75	2.78	2.13	1.53	.941	.741	.569	.271	.134
5	4.03	3.36	2.57	2.02	1.48	.920	.727	.559	.267	.132
6	3.71	3.14	2.45	1.94	1.44	.906	.718	.553	.265	.131
7	3.50	3.00	2.36	1.90	1.42	.896	.711	.549	.263	.130
8	3.36	2.90	2.31	1.86	1.40	.889	.706	.546	.262	.130
9	3.25	2.82	2.26	1.83	1.38	.883	.703	.543	.261	.129
10	3.17	2.76	2.23	1.81	1.37	.879	.700	.542	.260	.129
11	3.11	2.72	2.20	1.80	1.36	.876	.697	.540	.260	.129
12	3.06	2.68	2.18	1.78	1.36	.873	.695	.539	.259	.128
13	3.01	2.65	2.16	1.77	1.35	.870	.694	.538	.259	.128
14	2.98	2.62	2.14	1.76	1.34	.868	.692	.537	.258	.128
15	2.95	2.60	2.13	1.75	1.34	.866	.691	.536	.258	.128
16	2.92	2.58	2.12	1.75	1.34	.865	.690	.535	.258	.128
17	2.90	2.57	2.11	1.74	1.33	.863	.689	.534	.257	.128
18	2.88	2.55	2.10	1.73	1.33	.862	.688	.534	.257	.127
19	2.86	2.54	2.09	1.73	1.33	.861	.688	.533	.257	.127
20	2.84	2.53	2.09	1.72	1.32	.860	.687	.533	.257	.127
21	2.83	2.52	2.08	1.72	1.32	.859	.686	.532	.257	.127
22	2.82	2.51	2.07	1.72	1.32	.858	.686	.532	.256	.127
23	2.81	2.50	2.07	1.71	1.32	.858	.685	.532	.256	.127
24	2.80	2.49	2.06	1.71	1.32	.857	.685	.531	.256	.127
25	2.79	2.48	2.06	1.71	1.32	.856	.684	.531	.256	.127
26	2.78	2.48	2.06	.171	1.32	.856	.684	.531	.256	.127
27	2.77	2.47	2.05	1.70	1.31	.855	.684	.531	.256	.127
28	2.76	2.47	2.05	1.70	1.31	.855	.683	.530	.256	.127
29	2.76	2.46	2.04	1.70	1.31	.854	.683	.530	.256	.127
30	2.75	2.46	2.04	1.70	1.31	.854	.683	.530	.256	.127
40	2.70	2.42	2.02	1.68	1.30	.851	.681	.529	.255	.126
60	2.66	2.39	2.00	1.67	1.30	.848	.679	.527	.254	.126
120	2.62	2.36	1.98	1.66	1.29	.845	.677	.526	.254	.126
∞	2.58	2.33	1.96	1.645	1.28	.842	.674	.524	.253	.126

Fuente: R. A. Fisher y F. Yates, *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research* (5.ª edición), Tabla III, Oliver y Boyd Ltd., Edinburgh, con autorización de los autores y editores.

Figura 2

cesario para definir la permeabilidad del conjunto de la obra a partir de los valores de las amasadas.

Centrando inicialmente el estudio en lo que sería un ensayo de control de permeabilidad del hormigón, parece lógico que su nivel debiera ser intenso por el propio carácter especial que la instrucción otorga a este ensayo que hace suponer un hormigón de muy alta calidad.

Si se aplicase la división en lotes y las amasadas por lote exigidas en la instrucción para el control intenso de resistencias sería preciso ensayar 18 (en elementos comprimidos o en flexión) ó 36 (en elementos macizos) probetas por semana, como mínimo, al menos durante los cuatro primeros lotes, pudiendo reducirse a la mitad a partir de ese momento, en determinadas condiciones.

En el caso de ensayos de acuerdo con la UNE 83309 debe partirse de una limitación derivada del propio método de ensayo: La exigencia de aplicar la presión en tres escalones durante 48, 24 y 24 horas hace que el ensayo dure como mínimo 4 días lo que, a efectos prácticos, supone una semana de trabajo de laboratorio. Con los aparatos de mercado, de tres o seis celdillas, no es posible ensayar, con un sólo aparato, más de tres o seis probetas por semana. Ya que, debido a las características del aparato, no es previsible el empleo de más de uno por obra, podemos admitir que no va a ser posible ensayar más de seis probetas por semana.

Por ello, no debiera exigirse una división en lotes y amasadas por lote que suponga la realización de más de seis probetas por semana lo que imposibilita un control intenso similar al de resistencias. No obstante, y con objeto de obtener la mayor información posible sobre el hormigón realizado en obra, también debe establecerse ese límite de tiempo como máximo para el tamaño del lote.

Por un criterio lógico, el límite de tiempo establecido se relaciona proporcionalmente con los límites por otros conceptos que se recogen en el Cuadro 69.3.2.a de la instrucción, con lo que resultaría el cuadro 1 para la definición de lotes de control de

los ensayos de la permeabilidad de los hormigones utilizados en obra. Con este ensayo, el número de amasadas sería como mínimo de 2, con tres probetas por amasada, llegándose a un caso análogo al de control normal de resistencias pero con tamaños de lote más reducidos.

Para la obtención del valor de las penetraciones estimadas a partir de los de las amasadas se podría aplicar una expresión similar a la de aquel control, es decir:

$$V_{est}(\text{lote}) = X_1 / K_n$$

siendo:

$V_{est}(\text{lote})$ = el valor estimado de penetración máxima o media del lote y X_1 el valor máximo de penetración de las dos amasadas obtenido de acuerdo a la ecuación 1 del punto 3.3º.

En este caso, por falta de experiencia en ensayos de este tipo, surge la dificultad de obtener el valor de K_n , al no conocer las dispersiones entre amasadas de obra en función del sistema de ejecución del hormigón. No obstante, y dado que estos ensayos se realizarán junto a otros de control de resistencia, que son preceptivos, parece lógico aplicar los mismos valores de K_n que en este caso, por cuanto la calidad de ejecución será siempre la misma.

5º Una vez conocida la penetración estimada de cada lote se plantea la cuestión sobre si ese valor es el que directamente se considera como característico del mismo o si se debe aplicar algún coeficiente reductor que podríamos llamar, por similitud con el considerado en resistencias (V_c) como "coeficiente de mayoración de la permeabilidad" por razones de seguridad ante posibles errores de ejecución del hormigón.

De acuerdo a lo señalado en el artículo 30.3 de la instrucción, la consecuencia derivada de un defecto del hormigón en relación a su permeabilidad sería una puesta en fuera de servicio por razones de durabilidad o funcionalidad. Se trataría de un estado

Límite superior	TIPO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES		
	Elementos comprimidos (pilares, muros portantes, etc.)	Elementos en flexión simple (vigas, forjados, muros de contención, etc.)	Macizos (zapatas, estribos de puente bloques, etc.)
Volumen de hormigón	25 m ³	50 m ³	100 m ³
Número de amasadas (1)	12	25	100
Tiempo de hormigonado	1 semana	1 semana	1 semana
Superficie construida	5.000 m ²	5.000 m ²	--
Número de plantas	1	1	--

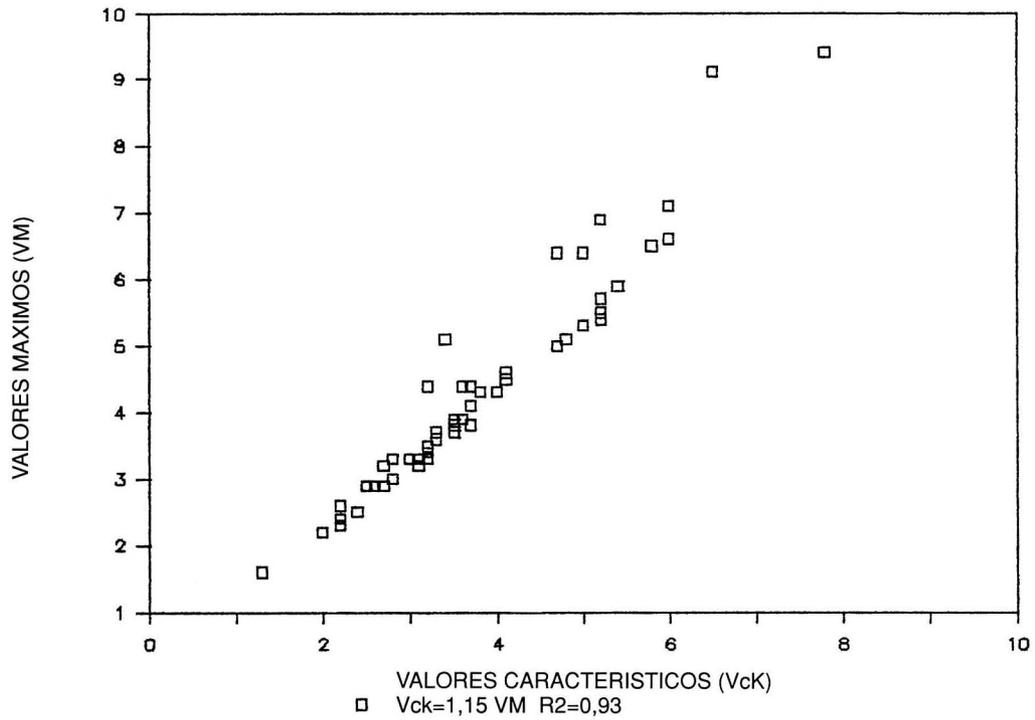
(1) Este límite no es obligatorio en obras de edificación

Cuadro 1:

Definición de los lotes de ensayo de permeabilidad

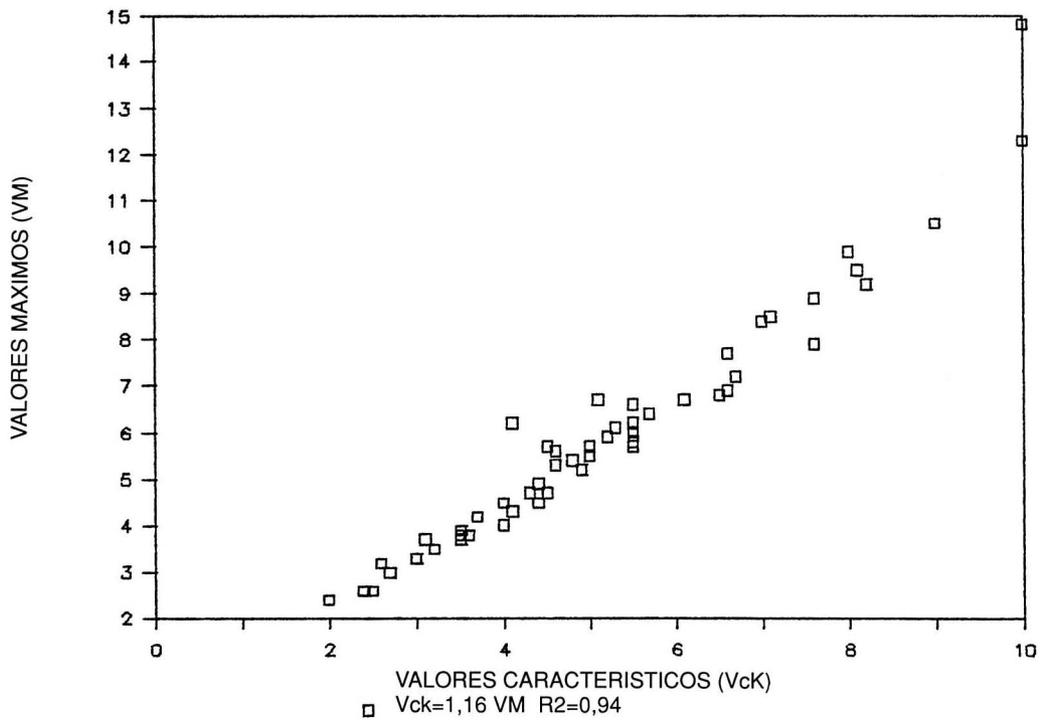
VALORES MAXIMOS-CARACTERISTICOS

TOMANDO PENETRACIONES MEDIAS REALES



VALORES MAXIMOS-CARACTERISTICOS

TOMANDO PENETRACIONES MAXIMAS REALES



límite de utilización asimilable al de fisuración controlada. En aplicación del artículo 31.2, el coeficiente a aplicar sería 1. Por ello, no sería preciso establecer incremento alguno sobre el valor de penetración característica obtenida por el proceso anterior.

6º En relación a las decisiones derivadas del control de permeabilidad, los criterios serían los mismos que establece la instrucción en su artículo 69.4 para el de resistencia ya que también han sido iguales los criterios para obtener la penetración estimada a partir de los valores de las amasadas.

4. CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto entendemos que para el control de calidad del hormigón, en relación a su permeabilidad, puede actuarse de la siguiente manera:

1º Se divide la obra en lotes inferiores al menor de los límites señalados en el cuadro 1.

2º El control se realiza determinando las profundidades máxima y media de penetración, de acuerdo con la Norma UNE 83309, de N amasadas, en número N mayor o igual a 2.

3º Los valores de penetración en cada amasada se establecen mediante la igualdad:

$$V. AMASADA = V. MED. \times (1 + 2,065 \vartheta) \quad (1)$$

siendo ϑ la dispersión de la muestra.

4º Ordenados los resultados de las determinaciones de penetración de las N amasadas controladas en la forma:

$$X_1 > X_2 > \dots > X_N$$

se define como penetración máxima o media característica estimada al valor:

$$P_{est} = X_1 / K_N$$

siendo:

K_N = el coeficiente dado en el cuadro 69.3.2.b de la instrucción en función de N y del tipo de instalación en que se fabrica el hormigón.

P_{est} = Penetración característica, máxima (PM_{est}) o media (Pm_{est})

Las decisiones derivadas del control serían las mismas que para las resistencias (consideración del coeficiente 0,9) debiendo compararse con:

$$PM_{ck} = 50 \text{ mm} \text{ y } Pm_{ck} = 30 \text{ mm}$$

También creemos interesante tener en cuenta el siguiente **comentario**:

La aplicación de la ecuación (1), resultante de la aplicación de la teoría de las Pequeñas Muestras mediante la Distribución de Student, que toma directamente el valor de la dispersión, puede tener el inconveniente de penalizar los valores de penetración muy bajos.

En ensayos efectuados al respecto, se han obtenido valores de dispersión muy diferentes según los casos y por ello no es lógico plantear en este momento formulaciones más adecuadas que limiten ese efecto contradictorio. En ocasiones es posible aplicar relaciones en función del valor máximo de penetración de la serie de tres probetas siendo inicialmente adecuada la siguiente:

$$V. AMASADA = 1,15 \times V. MAX. DE LAS TRES PROBETAS.$$

aunque el carácter orientativo de esta ecuación no hace aconsejable su empleo sistemático.

