DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS REALIZADOS CON ESCLEROMETRO Y ULTRASONIDOS

Adolfo Delibes Liniers

Ingeniero de Caminos

Director del Laboratorio de INTEMAC

462-7

1. Introducción

La realización de ensayos esclerométricos, para la determinación de la resistencia del hormigón, puede conducir a errores muy importantes si no se relacionan estos ensayos de dureza con la resistencia de probetas-testigo obtenidas de los mismos lugares de la estructura. De acuerdo con la publicación recogida en la referencia 1, en que se describe la experiencia obtenida en 41 obras diferentes, son precisos generalmente 9 puntos de correlación y como mínimo 6 puntos de correlación para poder corregir con suficiente fiabilidad la curva de calibración general del fabricante del esclerómetro. Ello implica la realización de un número relativamente elevado de ensayos de probetas-testigo que, en muchas ocasiones, son difíciles y costosos (Fig. 1).

Numerosos autores han tratado de establecer criterios de tipo general que, si bien no permiten una aplicación directa a cada obra concreta, admiten ser corregidos de una forma sencilla para su aplicación a cada caso particular. Este criterio ha sido aplicado a los resultados esclerométricos admitiendo que se conserva la pendiente de la curva de calibración del fabricante (2). La experiencia de INTEMAC, antes citada (1), permite comprobar que la hipótesis anterior se cumple pero con una gran dispersión (Fig. 2). La pendiente media de las curvas de correlación resistencia-índice de rebote es muy próxima en la realidad a la de calibración general dada por el

Figura 1.—Error medio cometido al deducir la resistencia del hormigón a partir de la calibración general del esclerómetro Schmidt - Modelo N. Se representa también el campo de variación de dicho error medio para N.C. = 95 % (± 76 kp/cm²). A este error medio debe añadirse el correspondiente a cada determinación individual.

Figura 2.—Relación entre la pendiente de la recta de regresión calculada y la correspondiente a la calibración del esclerómetro Schmidt - Modelo N ($f_c = 0,0909 N^2 + 7,2 N - 102$). La pendiente depende de la resistencia del hormigón, con los intervalos de error señalados en la figura, para N.C. = 95 %.

fabricante del aparato, si bien la dispersión (para un nivel de confianza del 95 %) hace que dicha pendiente pueda duplicarse o reducirse a menos de la mitad. En definitiva no parece posible establecer un criterio sencillo para la corrección de una curva de calibración general (Gráfico 1).

Del conjunto de variables que intervienen en el resultado de una determinación esclerométrica (tipo de cemento, dosificación, edad del hormigón, acabado superficial, carbonatación, etc.) se deduce una

influencia notable en el resultado. Dicha influencia puede reducirse o atenuarse utilizando métodos que combinan estas determinaciones de la dureza superficial con otros ensayos que afectan a la totalidad de la masa del elemento. Se viene utilizando con este objeto la determinación de la velocidad de paso de los ultrasonidos mediante los aparatos PUNDIT. Como en el caso anterior se intentan establecer correlaciones de tipo general entre los resultados de los ensayos combinados no destructivos y la resistencia del hormigón (3, 4, 5 y 6).

Algunos autores incluso han intentado aplicar métodos combinados de tres o más ensayos no destructivos diferentes para determinar la resistencia del hormigón. Es nuestro criterio que este método supone ya una complejidad comparable a la obtenida en ensayos de probetas-testigo, por lo que en la generalidad de los casos no tendrá sentido su utilización.

En el presente trabajo se describe una calibración general para la aplicación del método combinado esclerómetro Pundit y se propone un criterio para la interpretación de los resultados corrigiendo la calibración general. La propuesta se basa en la experiencia recogida por INTEMAC en algunos casos concretos.

GRAFICO N.º 1

Ejemplos de calibraciones esclerométricas

2. Experiencia anterior

En algunos países de Europa Oriental existe normativa para la determinación de la resistencia del hormigón en base a los ensayos combinados antes descritos. Recientemente se han publicado experiencias para su introducción en Italia (3). Conocemos también correlaciones holandesas de resistencia —velocidad de ultrasonidos— índice esclerométrico (2).

La propuesta concreta basada en la experiencia italiana^(*), emplea una correlación general y una serie de coeficientes correctores de la resistencia estimada, que describimos a continuación:

- Corrección en función del tipo y categoría del cemento que varía de 0,94 a 1,00.
- Corrección en función de la dosificación, que aumenta con la cantidad de cemento, desde 0,76 a 1,24.
- Corrección dependiente del tipo de árido, desde 1,00 a 1,41, siendo máximo para árido rodado de naturaleza silícea.
- Corrección dependiente de la granulometría del árido, que aumenta con la cantidad de arena fina, desde 0,91 a 1,07.
- Corrección en función del tamaño máximo del árido, disminuyendo cuando éste crece. El coeficiente varía entre 0,96 y 1,09.
- Corrección dependiente del tipo de aditivos, pues algunos hacen aplicable un incremento de la resistencia hasta de 1,08 veces.

Podemos deducir, por tanto, que si no conocemos (lo que es común en estudios de Patología) el tipo, categoría y dosificación de cemento, el origen mineralógico y granulometría de los áridos, ni el posible empleo de aditivos, el valor deducido de la «calibración-tipo» puede variar entre márgenes tremendamente amplios, desde $0,624 f_c$ hasta $2,02 f_c$, si f_c representa la resistencia obtenida para el «hormigón-tipo». Por tanto la resistencia estimada podría ser más de 3 veces superior (o inferior) a la real si no se poseen datos para determinar el coeficiente corrector.

3. Experiencias realizadas

Se recogen seguidamente algunas de las experiencias realizadas por INTEMAC en áreas de elementos estructurales (generalmente soportes), en que se obtienen los dos datos no destructivos (N.D.T.) y simultáneamente un testigo de hormigón que se ensaya a compresión en Laboratorio.

Los métodos de ensayo adoptados son los de la norma British Standard (7) para los N.D.T. y las normas UNE o ACI correspondientes para la resistencia de los testigos (8 y 9).

En el cuadro n.º 1 se recogen los datos de los 49 elementos estructurales estudiados, en 8 obras diferentes. Se expresan los siguientes datos de cada uno de ellos.

NOTA (*) Está avalada por la firma (en colaboración) del presidente de la Comisión 8, — Non-Destructive Testing de RILEM, I. Facaaru.

CUADRO N.º 1

NUMERO	OBRA	f _c (NDT) (1)	f _c (TESTIGO) (2)	ERRORES	
				Absoluto (2) - (1)	Relativo (2) : (1)
1	(1)	389	369	— 20	0,949
2		444	368	— 76	0,829
3		394	260	— 134	0,660
4		284	332	+ 48	1,169
5		278	323	+ 45	1,162
6		273	296	+ 23	1,084
7		273	294	+ 21	1,077
8		258	281	+ 23	1,089
9		308	340	+ 32	1,104
10	(2)	226	261	+ 35	1,155
11		239	273	+ 34	1,142
12		241	269	+ 28	1,116
13		226	258	+ 32	1,142
14		201	245	+ 44	1,219
15		248	246	— 2	0,992
16		170	214	+ 44	1,259
17		170	232	+ 62	1,365
18		186	244	+ 58	1,312
19		183	248	+ 65	1,355
20	(3)	245	208	— 37	0,849
21		269	190	— 79	0,706
22		251	200	— 51	0,797
23		252	201	— 51	0,798
24		237	182	— 55	0,768
25		204	171	— 35	0,838
26		241	194	— 47	0,805
27		190	152	— 38	0,800
28	(4)	160	229	+ 69	1,431
29		130	220	+ 90	1,692
30		148	237	+ 89	1,601
31	(5)	133	139	+ 6	1,045
32		126	151	+ 25	1,198
33		126	119	— 7	0,944
34	(6)	134	184	+ 50	1,373
35		158	228	+ 70	1,443
36		108	135	+ 27	1,250
37		94	142	+ 48	1,510
38	(7)	224	218	— 6	0,973
39		266	297	+ 31	1,117
40		240	220	— 20	0,917
41		216	201	— 15	0,931
42		315	263	— 52	0,835
43		247	244	— 3	0,988
44	(8)	214	211	— 3	0,986
45		230	202	— 28	0,878
46		208	217	+ 9	1,043
47		241	226	— 15	0,938
48		222	238	+ 16	1,072
49		203	179	— 24	0,882

NOTA: La edad del hormigón varía, aproximadamente, entre 1 y 9 meses.

f_c (NDT) = Resistencia en kp/cm² deducida de los N.D.T. y de la correlación general de la Referencia (2) para el «hormigón-tipo» (**).

f_c (TESTIGO) = Resistencia asignada al elemento estructural, de acuerdo con el ensayo a compresión de los testigos.

Figuran además el error absoluto y la relación entre los valores anteriores. Observamos que los

ensayos NDT han sobrevalorado la resistencia hasta en 134 kp/cm² o la han infravalorado hasta en 90 kp/cm², si aplicamos la correlación general para el «hormigón-tipo». El «error relativo» representa

NOTA (**) El «hormigón-tipo» italiano no es trasladable a nuestro país, sin embargo, adoptando los coeficientes correctores medios correspondientes a los hormigones usados en España, en obras de edificación, se ha deducido su equivalencia.

el verdadero coeficiente corrector que se debería utilizar para obtener la resistencia del hormigón-real a partir del hormigón-tipo. Este coeficiente ha variado entre 0,660 y 1,692 con los siguientes parámetros estadísticos.

Coeficiente corrector («Error Relativo»)

Valor medio = 1,073

Desviación típica = 0,234

Coeficiente de Variación = 21,8 %

Observamos que se obtiene un valor medio relativamente próximo a la unidad (lo que indica que la hipótesis establecida en la nota (**), inferior, se aproxima a la realidad), pero una dispersión muy grande de los resultados, como era de esperar.

Los datos que se poseían de estas obras no permitían deducir coeficientes de corrección para aproximar más las calibraciones, por lo que las estimaciones de resistencia hubieran sido erróneas en muchos casos.

CUADRO N.º 2
ANÁLISIS DE ERRORES (1)

HORMIGÓN-TIPO	ERROR RELATIVO (2) : (1)	
OBRA	MEDIA	DESV. T.
(1) N = 3	0,812	0,118
(1') N = 6	1,114	0,037
(2) N = 6	1,128	0,068
(2') N = 4	1,323	0,042
(3) N = 8	0,795	0,041
(4) N = 3	1,574	0,108
(5) N = 3	1,063	0,104
(6) N = 4	1,493	0,096
(7) N = 6	0,960	0,085
(8) N = 6	0,967	0,074
— Media general.....	1,123	—
— Desviación típica de las medidas.....	0,253	—
— Coef. de variación	22,5 %	—

4. Análisis de los resultados

Si agrupamos los resultados por obras, podemos deducir el verdadero coeficiente corrector de la calibración-tipo y esperar que, en cada obra, las características del hormigón y sus materiales componentes sean suficientemente homogéneos como para que se obtengan ahora «Resistencias-Corregidas», para cada elemento, que arrojen errores aceptables.

Aun en este caso, debemos matizar la última hipótesis. En algunas de las obras estudiadas, el hormigón procedía de edificios distintos, y bien diferenciados, o bien se conocían edades del hormigón (o fechas de hormigonado) notablemente diferentes, que hacían previsible que la clasificación «por obras» requiera en ocasiones una «sub-clasificación» (Obras n.º 1 y n.º 2).

Se llega así al resumen de resultados del Cuadro número 3, ahora con 10 hormigones de diferentes tipos. Los datos del Cuadro n.º 2. «errores - relativos», conducen a un valor medio, para cada uno de estos 10 hormigones-tipo. Estos «errores - relativos» constituyen, según se ha explicado, posibles Coeficientes correctores, y varían entre 0,795 y 1,574, por lo que su cuantía continúa siendo muy importante.

Si aplicamos, a los resultados N.D.T., los coeficientes-correctores deducidos como error-relativo en el cuadro n.º 2, y comparamos nuevamente con la resistencia de los testigos, obtenemos los «errores relativos remanentes» del Cuadro n.º 3. Como era de esperar los nuevos errores son notablemente más reducidos, pues varían, en porcentaje de la resistencia estimada, entre +15,7 % y -15,2 %. El valor medio de estos errores relativos remanentes es -0,15, prácticamente nulo, lo que indica que las correcciones están perfectamente centradas. La desviación típica de los errores porcentuales es 7,4. Ello significa que el límite de este error, para un nivel de significación del 90 % es $t = \pm 1,645 \sigma = \pm 12 \%$.

En la figura 3 se representa la distribución estadística de estos «Errores remanentes» y su ajuste a una distribución normal.

Figura n.º 3. Distribución estadística de los errores.

CUADRO N.º 3

ANÁLISIS DE ERRORES (2)

Se aplica como coeficiente de corrección el Error Medio Relativo en cada obra.

TESTIGO NÚM.	OBRA	ERROR RELATIVO REMANENTE (%)
1	1	+ 13,7
2		+ 1,7
3		- 15,2
4	1'	+ 5,5
5		+ 4,8
6		- 3,0
7		- 3,7
8		- 2,5
9		- 1,0
10	2	+ 2,7
11		+ 1,4
12		- 1,2
13		+ 1,4
14		+ 9,1
15		- 4,5
16	2'	- 6,4
17		+ 4,2
18		- 1,1
19		- 3,2
20	3	+ 5,4
21		- 8,9
22		+ 0,2
23		+ 0,3
24		- 2,7
25		+ 4,3
26		+ 1,0
27		+ 0,5
28	4	- 14,3
29		+ 11,8
30		+ 2,7
31	5	- 1,8
32		+ 13,5
33		- 11,9
34	6	- 2,1
35		- 4,9
36		- 14,4
37		+ 11,6
38	7	+ 1,3
39		+ 15,7
40		+ 4,3
41		- 2,9
42		- 12,5
43		+ 2,8
44	8	+ 1,9
45		- 8,9
46		+ 7,6
47		- 2,9
48		+ 10,5
49		- 8,5
Media		- 0,1
Desviación típica...		7,4

En consecuencia, resulta cierto que, si conseguimos un coeficiente corrector apropiado, la estimación de la resistencia es notablemente precisa, lo cual no hace sino confirmar lo correcto de la calibración-tipo de la que hemos partido y su adecuación a nuestros hormigones, en estudios de patología.

5. Aplicación a estudios de patología

La exposición anterior nos permite analizar la posibilidad de aplicación de un sencillo método de calibración de los ensayos N.D.T. para determinar la resistencia del hormigón en estudios de Patología o en el caso de que no se posean datos fiables sobre la dosificación y características del material.

El método consiste simplemente en la aplicación de la Correlación-Tipo (Gráfico n.º 2, tomado de (2)) y un coeficiente corrector (C) basado en el ensayo de tres probetas-testigo (f_1 , f_2 , f_3)

$$N = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} ; V = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

f_c (NDT) = f_c (N,V) en el Cuadro n.º 4 y Gráfico 2

$$f_c \text{ (TESTIGOS)} = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$$

$$C = f_c \text{ (TESTIGOS)} / f_c \text{ (NDT)}$$

Este coeficiente C permitirá deducir la resistencia (f_{ci}) en cada área estudiada con NDT, siendo:

$$f_{ci} = C \times f_{ci} \text{ (NDT)}$$

GRAFICO N.º 2

Correlación resistencia-índice de rebote-ultrasonidos

CUADRO N.º 4

VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS km/s	3,0	67	69	72	75	—														
		71	74	77	80	84	88	92	—											
	3,2	75	78	82	86	90	94	98	102	106	—									
		79	83	87	91	96	100	104	108	113	117	122	—	—						
	3,4	85	89	93	97	102	106	111	116	121	126	132	138	144	—	—				
		91	95	100	104	109	114	120	125	131	136	142	148	155	162	170	—	—		
	3,6	97	102	107	112	117	123	129	135	141	147	153	159	166	173	181	188	196	—	—
		104	109	115	121	127	133	139	146	153	159	166	173	180	187	195	203	212	220	—
	3,8	112	118	124	130	136	143	150	157	164	171	179	186	194	202	210	219	228	237	247
		120	126	133	139	146	153	161	169	177	185	193	200	208	217	227	236	246	256	267
	4,0	128	135	142	149	157	164	172	181	190	199	208	215	223	233	244	254	265	276	288
		137	144	152	160	168	176	185	194	204	213	222	231	240	251	263	274	286	297	308
	4,2	147	155	163	172	181	190	199	208	217	227	237	247	258	270	282	294	307	318	329
		157	166	175	183	194	203	213	222	232	243	254	268	278	291	301	314	327	339	352
	4,4	167	177	187	197	207	217	227	237	248	259	271	284	298	309	320	334	348	360	373
		177	187	198	208	219	230	241	252	264	276	289	302	316	328	340	354	368	379	390
		20		22		24		26		28		30		32		34		36		38
		INDICE ESCLEROMETRICO (Uds. REBOTE)																		
																				40

El mismo valor de C será aplicable a toda la obra, siempre que no varíen de forma notable los parámetros relacionados en el apartado 2 (cemento, áridos, aditivos, dosificación) (***)

Podemos calcular el error máximo previsible al aplicar este método, de la forma siguiente (10).

Error de la corrección:

$$\varepsilon_c = \pm t \frac{\sigma'}{\sqrt{n}}$$

$$n = 3$$

$$\sigma' = \frac{\sum N_i \sigma_i}{\sum N_i}$$

NOTA (***) Adicionalmente debe comprobarse que no existen grandes diferencias en las condiciones que determinan el ensayo esclerométrico: carbonatación, estado superficial, humedad, etc...

Ello no siempre será fácil y puede llevar a la necesidad de mayor número de testigos. Sin embargo, se podrá confirmar la necesidad de una subdivisión de la obra, de la forma siguiente:

$$\text{sea } C_1 = f_1/f_c (N_1, V_1); C_2 = f_2/f_c (N_2, V_2); C_3 = f_3/f_c (N_3, V_3) \dots; C_1 \geq C_2 \geq C_3 \dots C_i \dots$$

Si la desviación típica (σ) de los valores (C) supera 0,12, será conveniente subdividir la obra, para lo que debe duplicarse el número de testigos. Así en la inicialmente denominada Obra (1) se obtenía $\sigma = 0,17$; al dividirla en dos obras se obtiene $\sigma(1) = 0,118$ y $\sigma(1') = 0,037$. En la Obra (2) se obtenía $\sigma = 0,12$, al subdividirla se obtiene $\sigma(2) = 0,068$ y $\sigma(2') = 0,042$.

La regla anterior, aplicada al caso de tres testigos, puede simplificarse aplicando (10). $C_1 - C_3 < \frac{0,12}{0,5907} = 0,20$ lo que indica que si el recorrido de los tres valores, C_1, C_2, C_3 supera 0,20, es conveniente establecer dos calibraciones diferentes.

siendo N_i, σ_i el Número de determinaciones y la Desviación Típica obtenidos en cada «OBRA» (Cuadro n.º 2), $\sigma' = 0,070$

$$t = 1,645 \text{ para N.C.} = 90 \%$$

$$\varepsilon_c = \pm 0,066 = \pm 6,6 \%$$

El error de una determinación aislada, para el Nivel de Confianza (N.C.) elegido, resulta $\varepsilon_i = 12 + 6,6 \approx 19 \%$, lo que es un resultado aceptable. Si la corrección se realizara basándose en más de 3 testigos podríamos reducir el error hasta $\varepsilon_i = \pm 12 \%$.

6. Conclusión

Se ha expuesto un criterio para la determinación de la resistencia del hormigón en estructuras acabadas,

que se basa en la correlación recogida en (2), deducida de las recomendaciones rumanas para el estudio del hormigón mediante el esclerómetro SCHMIDT y la velocidad de ultrasonidos obtenida con PUNDIT.

La experiencia de INTEMAC permite deducir que el error obtenido será inferior al 12-20 % con el método de aplicación del apartado 4. El mayor de ellos corresponde a una calibración mediante 3 testigos extraídos con sonda en toda la obra.

Como se ha indicado, lo anterior es válido en el caso en que la estructura considerada como una sola obra sea suficientemente homogénea, desde el punto de vista de los factores que intervienen en los ensayos no destructivos. En el caso en que no pueda asegurarse esta homogeneidad, por existir zonas de obra diferentes, debe subdividirse ésta y aplicar el criterio anterior a cada una de las zonas.

De no corregirse la Calibración General, mediante la extracción de testigos, se hubieran obtenido errores superiores a 100 kp/cm².

En cualquier caso la precisión de la calibración es superior a la deducida para un solo END (esclerómetro).

BIBLIOGRAFIA

1. DELIBES, A. «Experiencias en el estudio de la Resistencia del hormigón mediante testigos y esclerómetro». Conferencia pronunciada en la asamblea del Grupo
2. Institute TND for Building: «Example of Drawing up a testing specification for Concrete». Report No. BI-70/39/01.5.004 Materials and Building Structures. Holanda.
3. CIANFRONE, F. y FACAOARU, I. «Study on the introduction into Italy of the combined non-destructive method, for the determination of in situ concrete strength. Materiaux et Constructions - RILEM, Vol. 2 No. 71. 1979.
4. KLEVTSOV. — Development and use of non-destructive methods for evaluation of strength, hardness and crack resistance of form-manufactured products for large-panel residential buildings. RILEM, 2nd International Symposium, Vol. III, pp. 151-158, Constanta, Romania, 1974.
5. CRISAN, BOCAN. — Vérification expérimentale de l'efficacité de la méthode roumaine combinée (vitesse d'impulsion-coefficient de rebondissement) appliquée à un hôtel touristique. RILEM, 2nd International Symposium, Vol. III, pp. 168-175, Constanta, Romania, 1974.
6. Varios. «Quality Control of Concrete Structures». Proceedings of the meeting RILEM-Estocolmo, Junio 1979.
7. Norma British Standard BS-4408.
8. Norma UNE 7241.
9. Norma ACI 318-77. Capítulo 4.
10. ASTM. Manual on Quality Control of Materials. Special Tech. Publ. 15 - C. Enero 1951.

* * *

publicación del i.e.t.c.c.

alojamiento y tecnología: ¿industrialización abierta?

Julián Salas Serrano

Ingeniero Industrial

La experiencia nacional en construcción industrializada en la última década, aunque no abundante, puede resultar paralizante. Como reacción, este trabajo trata de elaborar y ordenar la información que, pegado al terreno, se ha acumulado durante los sesenta.

Auscultando tendencias avanzadas en otros países y apoyándose en nuestra realidad cotidiana, el autor de este trabajo apuesta por la industrialización, presintiendo un futuro con pocos puntos en común con lo que en general, hasta bien reciente, se ha conocido como construcción industrializada.

Se abre el trabajo con un prólogo del Profesor Ciribini en el cual, con rigor conceptual y desde su rica experiencia, analiza algunos de los conceptos más polémicos del fenómeno de industrialización del sector construcción. El autor recopila un conjunto de aportaciones de maestros de la arquitectura al lento proceso de evolución tecnológica y conceptual, continuando con un intento de respuesta realista a la interrogante que flota en el sector nacional: ¿requiem por la industrialización?

Se dedican otros capítulos a revisar lo realizado y a encarar el futuro inmediato: el concepto de componente, su repercusión económica, la dificultad del proyecto a base de productos industriales, la nueva vigencia embrionaria de la construcción por medio de catálogos, los conceptos de flexibilidad e intercambiabilidad desde una óptica práctica... Especial atención dedica este trabajo a la exposición de lo que podíamos llamar nuevos derroteros de la coordinación dimensional, aportando una visión actualizada y pragmática de los enfoques más implantados en Europa.

Las siempre problemáticas interrelaciones entre normativa, calidad e industria se detallan de forma documentada y realista. Finaliza el trabajo con unas reflexiones dirigidas al ámbito empresarial y un esbozo de «reglas de juego» que faciliten al subsector la salida del «impasse» actual.

Un volumen encuadernado en rústica, de 24 x 16,5 cm, compuesto de 160 páginas, con 109 figuras, 19 tablas y 86 referencias bibliográficas. Madrid, junio, 1981.

Precios: España 1.200 PTAS. Extranjero 19 \$ USA.