

Sobre un método para el estudio de la corrosión de los hormigones por los líquidos agresivos ¹

3. Resultado de las investigaciones químicas

La parte más importante de toda investigación sobre la corrosión de los hormigones por los líquidos agresivos es, a nuestro juicio, y como ya hemos dicho al principio de este trabajo, aquella que se refiere al logro de un balance químico, lo más preciso posible, de los procesos que tienen lugar en el interior del hormigón estudiado, al ponerse en contacto con el líquido objeto de ensayo. En nuestro caso, la manera más sencilla de medir estos fenómenos es el análisis químico cuantitativo de los líquidos filtrados a través de los cuerpos de ensayo.

Siguiendo esta idea, y con objeto de que la ulterior interpretación del fenómeno químico fuese lo más perfecta posible, procederemos al análisis cuantitativo de los líquidos filtrados procedentes de las investigaciones anteriormente reseñadas, o sea con una presión de 70 cm de altura, y haciendo los análisis con los líquidos correspondientes a espacios de tiempo determinados.

Estos análisis comprendieron los siguientes constituyentes de cemento:

SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, SO₃. Alcalinos.

La marcha seguida fué esencialmente la empleada en el análisis del cemento, por lo cual no daremos más que las líneas generales.

El líquido objeto del análisis se acidula con ácido clorhídrico, se evapora a sequedad y se deseca durante una noche en la estufa a 125 grados; se disuelve en clorhídrico y filtra la pequeña cantidad de sílice que permanece insoluble, que se determina como es corriente.

Los líquidos filtrados se dividen en dos partes: en la una se determinan los cationes, y en otra, el SO₃. En ninguno de nuestros análisis se han encontrado cantidades apreciables de Al₂O₃, Fe₂O₃ ni MgO, encontrándose casi siempre SiO₂, CaO y SO₃. La determinación de los álcalis se hizo por el siguiente método indirecto: se pesaba en cápsula de platino el residuo de la evaporación del líquido objeto de ensayo. Dicho residuo está formado por los cloruros de calcio y alcalinos por el SO₃ en forma de sulfatos y la sílice libre. Se conocen, pues, todos los constituyentes menos los alcalinos, que se determinan por diferencia y en forma de cloruros. La determinación por este método es rápida, pero no de gran exactitud; sin embargo, es suficiente para nuestro objeto. Esta determinación se ha efectuado casi siempre, y, por lo menos, en dos cuerpos de cada serie de siete.

En las tablas 17 a 26 se consignan todos los resultados analíticos de la investigación química. En

ellas se expresan los resultados en miligramos, por cien centímetros cúbicos del líquido filtrado. Además se da también la cantidad del líquido filtrado, expresada en centímetros cúbicos, correspondiente a cada período de análisis. La duración de estos períodos es siempre la misma para una determinada serie de cuerpos, pero varía para las distintas series, según la permeabilidad que presentan.

Los resultados obtenidos presentan multitud de variaciones si se observan a primera vista, pues dependen, en primer lugar, de la cantidad de líquido filtrado, de los factores de arena y agua de los hormigones, de la clase y duración de la conservación, etc.

Solamente se han analizado aguas de los cuerpos de las clases 15 y 18, pues los de la clase 13 eran, como se sabe, demasiado compactos para que las cantidades filtradas pudiesen ser sometidas a análisis fraccionados.

T A B L A 17

CLASE 15.—Cuerpos de 3 días de conservación en aire

Análisis químicos:

	1	2	3	4	5	6	7
Días 0 a 11. . .	63,5	63,0	130,0	106,0	307,0	173,0	134,0 cm ³
SiO ₂	6,6	3,0	2,2	2,2	0,5	1,5	2,2 mg
CaO	22,0	37,0	74,8	47,9	124,2	101,1	78,0 mg
SO ₃	7,3	6,9	4,2	4,1	1,0	1,5	1,7 mg
Alk-Cl	787,0	—	—	504,7	—	—	— mg
Días 12 a 23. .	33,0	33,0	75,0	52,5	140,0	92,0	66,0 cm ³
SiO ₂	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7	0,4	0,6 mg
CaO	66,0	81,2	120,2	51,4	143,9	142,4	148,4 mg
SO ₃	2,4	2,1	Sp.	1,3	Sp.	Sp.	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	89,3	146,6	—	76,0	— mg
Días 24 a 35. .	22,0	—	56,0	34,5	91,0	64,0	44,0 cm ³
SiO ₂	0,9	—	0,5	0,0	0,5	0,2	0,0 mg
CaO	109,1	—	112,5	33,3	152,7	141,4	128,4 mg
SO ₃	0,0	—	Sp.	0,0	Sp.	0,0	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	—	104,3	—	48,9	— mg
Días 36 a 47. .	15,0	—	38,0	21,0	62,0	46,0	29,0 cm ³
SiO ₂	0,0	—	0,8	0,5	0,9	0,0	0,0 mg
CaO	105,3	—	82,3	19,0	151,6	142,6	130,3 mg
SO ₃	0,0	—	Sp.	0,0	Sp.	0,0	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	—	85,7	—	37,6	— mg
Días 48 a 59. .	12,5	—	30,0	13,5	46,0	35,0	21,0 cm ³
SiO ₂	0,0	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0 mg
CaO	55,0	—	118,6	10,4	156,5	142,7	146,2 mg
SO ₃	0,0	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	—	103,9	—	77,9	— mg

En la tabla 17 se contienen los análisis efectuados en las aguas de filtración recogidas cada once días, correspondientes a los cuerpos de tres días de conservación en aire de la clase 15. El estudio químico es bastante completo, pues se han analizado, para todos los cuerpos de ensayo, los líquidos correspondientes a las cinco primeras fracciones, o sea, en total, el correspondiente a 59 días.

¹ Véase la REVISTA de OBRAS PÚBLICAS del 15 de diciembre de 1933, página 501.

Por consideración de la tabla se deduce la siguiente marcha del proceso: Al principio las aguas filtradas son muy ricas en alcalinos, no presentando gran concentración de CaO; luego, y a medida que la concentración de los alcalinos disminuye, aumenta la de la cal, llegando pronto a su saturación, o, mejor, sobresaturación, pues oscila alrededor de 144 miligramos de CaO por cien centímetros cúbicos de líquido. Esta saturación de los líquidos en cal persiste luego, mientras que el contenido en alcalinos continúa decreciendo. Respecto a la marcha de la eliminación de la SiO₂ y del SO₃, se observa que es, para estos cuerpos, paralela, siendo bastante considerable al principio, disminuyendo luego lentamente, hasta desaparecer por completo a los 48 días de empezada la experiencia.

Una atenta observación de esta misma tabla 17 nos lleva a la interesante conclusión de que la composición de los líquidos filtrados varía, no solamente con la duración de la experiencia, sino también con la permeabilidad de los cuerpos de ensayo.

Si comparamos, por ejemplo, la fracción correspondiente a los once primeros días, observamos que la concentración de la SiO₂, del SO₃ y de los alcalinos es mayor en los líquidos procedentes de los cuerpos menos permeables, observándose para la concentración de la CaO el proceso inverso, o sea que la concentración de la CaO en los líquidos aumenta al aumentar la velocidad de filtración.

En general, puede decirse que el proceso de la corrosión que hemos descrito es válido para la mayoría de los cuerpos de la serie, ya que únicamente el número 4 parece hacer excepción, por tender a disminuir continuamente la concentración de la cal en los líquidos filtrados, sin que sea fácil encontrar una clara explicación a este anómalo comportamiento.

T A B L A 18

CLASE 15.—Cuerpos de 3 días de conservación en agua

Análisis químicos:

	22	23	24	25	26	27	28
Días 0 a 11 . .	160,0	378,0	500,0	273,0	101,0	146,0	140,0 cm ³
SiO ₂	0,4	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4 mg
CaO	112,0	130,0	141,4	125,8	86,0	105,8	104,2 mg
SO ₃	0,5	Sp.	0,2	0,3	0,4	0,9	0,4 mg
Alk-Cl	—	112,7	—	—	428,0	—	— mg
Días 12 a 23 . .	179,0	443,5	534,0	315,0	91,0	155,0	136,0 cm ³
SiO ₂	0,4	0,2	0,2	Sp.	0,2	0,5	0,3 mg
CaO	147,2	138,2	144,1	145,3	145,0	147,4	143,7 mg
SO ₃	Sp.	Sp.	0,2	Sp.	Sp.	Sp.	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	2,9	—	55,0	—	— mg
Días 24 a 35 . .	196,0	1250,0	697,0	393,0	87,0	165,0	119,0 cm ³
SiO ₂	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,6 mg
CaO	136,6	105,8	126,0	131,5	150,2	138,2	139,0 mg
SO ₃	Sp.	0,1	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp. mg
Alk-Cl	—	—	9,4	—	17,9	—	— mg
Días 36 a 47 . .	235,0	3140,0	1665,0	447,0	73,5	150,0	100,0 cm ³
SiO ₂	0,2	0,2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,5 mg
CaO	126,2	67,4	106,2	71,0	144,8	135,0	148,5 mg
SO ₃	0,0	0,1	Sp.	Sp.	0,0	0,0	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	Sp.	—	24,8	—	— mg
Días 48 a 59 . .	393,0	1398,0	2033,0	677,0	75,0	204,0	118,0 cm ³
SiO ₂	0,2	0,4	0,1	0,3	0,2	0,3	0,5 mg
CaO	119,2	71,8	78,7	114,5	143,6	129,1	142,8 mg
SO ₃	Sp.	0,2	0,1	Sp.	0,0	0,0	0,0 mg
Alk-Cl	—	—	15,5	—	16,1	—	— mg

T A B L A 19

CLASE 15.—Cuerpos de 7 días de conservación en aire

Análisis químicos:

	8	9	10	11	12	13	14
Días 0 a 31 . .	173,5	183,0	185,5	199,0	228,0	198,0	166,0 cm ³
SiO ₂	3,4	3,4	4,2	3,6	2,3	3,9	5,3 mg
CaO	47,3	70,4	58,0	63,9	84,8	54,6	37,9 mg
SO ₃	4,4	3,7	3,0	3,3	2,7	2,6	5,0 mg
Alk-Cl	—	—	—	—	263,1	302,4	348,8 mg
Días 32 a 62 . .	81,0	84,0	88,0	80,0	88,5	106,5	122,0 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,2	—	0,6 mg
CaO	—	—	—	—	121,2	—	55,7 mg
SO ₃	—	—	—	—	Sp.	—	0,6 mg
Alk-Cl	—	—	—	—	74,8	—	77,0 mg
Días 63 a 93 . .	53,0	54,0	56,5	48,0	47,5	303,0	111,0 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,0	—	0,5 mg
CaO	—	—	—	—	116,8	—	47,3 mg
SO ₃	—	—	—	—	0,0	—	Sp. mg
Alk-Cl	—	—	—	—	73,6	—	32,8 mg

T A B L A 20

CLASE 15.—Cuerpos de 7 días de conservación en agua

Análisis químicos:

	29	30	31	32	33	34	35
Días 1 a 31 . .	—	Sp.	104,0	35,0	46,0	19,0	45,0 cm ³
SiO ₂	—	—	0,4	0,0	0,8	2,1	1,1 mg
CaO	—	—	77,9	18,5	17,3	10,5	18,8 mg
SO ₃	—	—	0,6	Sp.	Sp.	6,8	Sp. mg
Alk-Cl	—	—	289,1	—	603,4	978,9	— mg
Días 32 a 62 . .	—	0,0	61,0	7,5	25,0	6,0	15,5 cm ³
SiO ₂	—	—	0,0	—	—	—	— mg
CaO	—	—	136,4	—	—	—	— mg
SO ₃	—	—	Sp.	—	—	—	— mg
Alk-Cl	—	—	73,1	—	—	—	— mg
Días 62 a 93 . .	—	0,0	44,0	1,7	5,0	0,8	5,5 cm ³
SiO ₂	—	—	0,4	—	—	—	— mg
CaO	—	—	156,8	—	—	—	— mg
SO ₃	—	—	0,0	—	—	—	— mg
Alk-Cl	—	—	50,4	—	—	—	— mg

El proceso de la corrosión para los cuerpos conservados en agua durante tres días es bastante diferente del de sus análogos conservados en aire. En la tabla 18 se resumen los resultados de manera análoga a lo hecho en la 17, con objeto de poder comparar mejor ambos resultados.

La eliminación de la SiO₂ y del SO₃ es, desde el primer momento, apenas apreciable, no pasando nunca de una concentración de medio miligramo en cien centímetros cúbicos de líquido filtrado, conservándose sensiblemente siempre igual, contrariamente a lo que sucedía en los cuerpos conservados en aire.

Las concentraciones de los alcalinos son aquí también mucho menores que las anteriores, eliminando, sin embargo, y análogamente a lo ya visto, una gran cantidad en los líquidos de la primera fracción, o sea durante los primeros días.

También, contrariamente a lo ya visto anteriormente, las concentraciones de la cal son elevadas desde la primera fracción, alcanzando en seguida valores de sobresaturación que se mantienen luego para todas las fracciones analizadas, haciendo únicamente excepción en aquellos cuerpos en que la permeabilidad aumenta grandemente, como en los números 23 y 24, en cuyos casos, debido sin duda a la gran velocidad

del paso del agua, no hay tiempo para que tenga lugar la saturación.

En general, las diferencias encontradas en la eliminación de la cal entre estas dos series de cuerpos pueden admitirse suponiendo que durante la conservación en agua de los cuerpos de esta serie eliminaron grandes cantidades de alcalinos, y que luego no pudieron impedir, por efecto de la ley de acción de masa, la eliminación de la cal en los primeros momentos, como sucede en los cuerpos conservados en aire.

Los líquidos filtrados a través de los cuerpos de 28 días de conservación se separaban cada 18 días, analizándose, en total, cuatro fracciones, que corresponden a 72 días de filtración, como puede verse en las tablas 21, 22 y 23.

T A B L A 21

CLASE 15.—Cuerpos de 28 días de conservación en aire

Análisis químicos:

	15	16	17	18	19	20	21
Días 1 a 18 ..	120,0	141,0	98,0	72,0	124,0	154,0	172,0 cm ³
SiO ₂	19,1	19,0	21,7	37,5	—	17,2	9,6 mg
CaO	2,5	3,5	3,6	0,7	2,0	3,7	14,5 mg
SO ₃	34,2	—	23,8	33,8	15,3	21,0	17,4 mg
Alk-Cl	284,6	—	—	395,5	—	—	207,9 mg
Días 19 a 36 ..	76,0	87,0	60,5	62,0	67,5	97,0	103,0 cm ³
SiO ₂	9,2	6,5	7,9	14,8	4,1	—	3,0 mg
CaO	1,6	9,2	6,1	3,2	8,5	—	28,6 mg
SO ₃	12,4	10,1	13,1	14,0	9,4	—	8,4 mg
Alk-Cl	121,0	—	—	163,0	—	—	92,7 mg
Días 37 a 54 ..	74,0	81,0	68,0	77,0	62,5	92,0	100,0 cm ³
SiO ₂	8,9	—	—	8,8	—	—	3,2 mg
CaO	Sp.	—	—	1,3	—	—	18,7 mg
SO ₃	7,4	—	—	7,6	—	—	5,0 mg
Alk-Cl	87,4	—	—	106,5	—	—	72,0 mg
Días 55 a 72 ..	83,0	—	—	—	—	—	— cm ³
SiO ₂	5,5	—	—	—	—	—	— mg
CaO	Sp.	—	—	—	—	—	— mg
SO ₃	5,1	—	—	—	—	—	— mg
Alk-Cl	57,7	—	—	—	—	—	— mg

En la tabla 21 se encuentran resumidos los resultados de la serie de 28 días de conservación en aire. En este caso, y debido precisamente a la gran carbonatación, que ya hemos hecho notar al estudiar las propiedades físicas, nos encontramos ante un proceso de corrosión sumamente diferente que el que hemos visto para la serie análoga de tres días de conservación.

Las concentraciones para la cal se mantienen desde el primer momento muy pequeñas, llegando, en algunos casos, a no aparecer más que indicios de cal en los líquidos filtrados. Por el contrario, la eliminación de SiO₂ y de SO₃ es mucho mayor, en general, que la de la cal, presentando sus máximas concentraciones en los primeros días de la experiencia, tendiendo luego, aunque lentamente, a disminuir. La eliminación de los alcalinos es normal, o sea, grande al principio y disminuyendo luego de modo paulatino.

El balance químico de la corrosión de los cuerpos de 28 días conservados en agua, que puede verse resumido en la tabla 22, es, en general, análogo al que ya hemos visto en los cuerpos de tres días de conservación.

Una consideración de los resultados de la corro-

T A B L A 22

CLASE 15.—Cuerpos de 28 días de conservación en agua

Análisis químicos:

	36	37	38	39	40	41	42
Días 1 a 18 ..	41,0	16,5	25,0	1,0	58,0	0,5	14,0 cm ³
SiO ₂	0,0	1,2	1,6	—	0,0	—	0,7 mg
CaO	9,8	48,5	28,0	—	28,4	—	10,7 mg
SO ₃	Sp.	4,8	3,6	—	2,0	—	5,0 mg
Alk-Cl	—	—	—	—	415,1	—	806,0 mg
Días 19 a 36 ..	36,5	13,0	22,0	0,0	35,1	0,0	9,5 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,0	—	— mg
CaO	—	—	—	—	152,0	—	— mg
SO ₃	—	—	—	—	Sp.	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	—	77,1	—	— mg
Días 37 a 54 ..	38,0	10,0	13,5	0,0	26,0	0,0	5,0 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,0	—	— mg
CaO	—	—	—	—	144,2	—	— mg
SO ₃	—	—	—	—	0,0	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	—	90,0	—	— mg
Días 55 a 72 ..	40,0	11,0	8,5	0,0	23,5	0,0	1,0 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,0	—	— mg
CaO	—	—	—	—	140,4	—	— mg
SO ₃	—	—	—	—	0,0	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	—	89,3	—	— mg

sión para los cuerpos de 7 días de conservación en aire y agua, nos lleva a conclusiones comprendidas entre las de las correspondientes series de 3 días y de 28 días de conservación. Un resumen de la investigación química puede verse en las tablas 19 y 20. Los líquidos filtrados se han analizado en espacios de 31 días.

T A B L A 23

CLASE 15.—Cuerpos de 28 días de conservación combinada

Análisis químicos:

	43	44	45	46	47	48	49
Días 1 a 18 ..	13,0	3,5	13,0	6,0	70,0	4,5	3,0 cm ³
SiO ₂	44,6	—	—	—	3,5	—	— mg
CaO	0,0	—	—	—	36,4	—	— mg
SO ₃	11,5	—	—	—	2,4	—	— mg
Alk-Cl	1084,6	—	—	—	383,5	—	— mg
Días 19 a 36 ..	6,0	1,0	5,0	1,5	41,0	1,5	0,3 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,0	—	— mg
CaO	—	—	—	—	93,9	—	— mg
SO ₃	—	—	—	—	4,1	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	—	112,7	—	— mg
Días 37 a 54 ..	3,0	0,0	2,6	1,3	32,0	0,5	0,2 cm ³
SiO ₂	—	—	—	—	0,9	—	— mg
CaO	—	—	—	—	134,3	—	— mg
SO ₃	—	—	—	—	Sp.	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	—	85,0	—	— mg

En la tabla 23 se dan algunos análisis de los cuerpos de 28 días de conservación combinada. Debido a la gran compacidad de estos cuerpos no se han podido hacer más análisis que los consignados, por no disponer de cantidades de líquido suficiente. Parece ser que estos cuerpos presentan un proceso de corrosión intermedio entre los de 28 días conservados en aire y en agua.

La totalidad de los análisis efectuados en los líquidos procedentes de los cuerpos de la clase 18 se encuentran resumidos en las tablas 24, 25 y 26. Como puede verse, los procesos de corrosión son, en esta clase, completamente análogos a los de las series correspondientes de la clase 15, no observándose más diferencia general que una menor concen-

tración en los líquidos procedentes de la corrosión, y que se explica fácilmente teniendo en cuenta, en primer lugar, el menor contenido del hormigón en sustancias solubles, o sea menor factor cemento/arena, y, por último, la mayor permeabilidad, que hace que, al aumentar la velocidad de filtración, los líquidos corrosivos estén menor tiempo en contacto con las partículas de cemento.

Esta menor concentración de los líquidos filtrados no significa, naturalmente, que las pérdidas por corrosión sean menores, pues hay que tener siempre en cuenta la cantidad total de líquido que pasa a tra-

T A B L A 24

CLASE 18.—Cuerpos de 28 días de conservación en aire

Análisis químicos:

	15	16	17	18	19	20	21
Días 1 a 18.	512,0	361,0	707,0	373,0	297,0	289,0	366,0 cm ³
SiO ₂	3,4	4,7	2,4	3,5	4,2	5,2	4,6 mg
CaO	11,3	27,6	—	34,0	18,8	24,2	26,9 mg
SO ₃	19,7	25,8	14,5	19,9	23,5	25,7	23,7 mg
Alk-Cl	72,6	—	—	72,6	95,3	—	71,0 mg
Días 19 a 36.	415,0	343,0	696,0	332,0	263,0	265,0	341,0 cm ³
SiO ₂	2,2	3,3	2,9	2,4	1,6	3,5	4,4 mg
CaO	12,5	36,1	32,9	37,5	27,7	28,8	27,4 mg
SO ₃	1,0	2,1	0,9	1,3	1,4	1,4	1,1 mg
Alk-Cl	24,8	—	—	—	25,8	—	— mg
Días 37 a 54.	1886,0	326,0	9730,0	321,0	260,0	300,0	344,0 cm ³
SiO ₂	3,4	4,0	2,1	2,3	1,9	3,9	4,3 mg
CaO	8,5	28,7	5,8	32,7	28,3	26,6	26,3 mg
SO ₃	0,3	0,7	0,3	0,6	0,8	0,7	0,7 mg
Alk-Cl	2,3	—	—	—	15,3	—	— mg
Días 54 a 72.	6945,0	325,0	11450,0	300,0	252,0	1140,0	440,0 cm ³
SiO ₂	2,3	4,0	1,4	2,6	1,8	5,1	4,9 mg
CaO	5,4	22,1	4,8	30,9	27,2	—	20,1 mg
SO ₃	0,4	0,8	0,2	0,6	0,5	0,4	0,9 mg
Alk-Cl	0,8	—	—	—	8,5	—	— mg

T A B L A 25

CLASE 18.—Cuerpos de 28 días de conservación en agua

Análisis químicos:

	36	37	38	39	40	41	42
Días 1 a 18.	1510,0	0,5	27,0	336,0	10,5	3,0	25,0 cm ³
SiO ₂	0,2	—	0,0	0,1	7,6	—	0,0 mg
CaO	121,2	—	43,7	139,3	9,5	Sp.	27,2 mg
SO ₃	Sp.	—	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp. mg
Alk-Cl	—	—	—	0,0	327,6	546,6	— mg
Días 19 a 36.	—	0,0	27,0	325,0	10,0	4,5	21,0 cm ³
SiO ₂	—	—	—	0,2	2,0	—	— mg
CaO	—	—	—	137,0	30,0	—	— mg
SO ₃	—	—	—	0,1	Sp.	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	0,0	228,0	—	— mg
Días 37 a 54.	—	0,0	21,0	282,0	8,0	4,0	17,5 cm ³
SiO ₂	—	—	—	0,1	0,0	—	— mg
CaO	—	—	—	141,6	15,0	—	— mg
SO ₃	—	—	—	0,2	0,0	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	0,0	145,0	—	— mg
Días 55 a 72.	—	0,0	17,0	256,0	5,5	2,0	13,5 cm ³
SiO ₂	—	—	—	0,1	0,0	—	— mg
CaO	—	—	—	128,3	30,9	—	— mg
SO ₃	—	—	—	0,6	0,0	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	0,0	65,6	—	— mg
Días 73 a 90.	—	0,0	13,0	252,0	5,0	2,5	12,0 cm ³
SiO ₂	—	—	—	0,1	—	—	— mg
CaO	—	—	—	125,8	—	—	— mg
SO ₃	—	—	—	Sp.	—	—	— mg
Alk-Cl	—	—	—	0,0	—	—	— mg

T A B L A 26

CLASE 18.—Cuerpos de 28 días de conservación combinada

Análisis químicos:

	43	44	45	46	47	48	49
Días 1 a 18.	41,0	113,0	22,0	22,0	17,5	25,0	9,0 cm ³
SiO ₂	2,4	1,4	16,3	18,1	12,5	8,0	26,6 mg
CaO	23,1	70,0	2,2	0,0	4,5	18,0	0,0 mg
SO ₃	2,9	1,5	12,2	10,0	4,0	Sp.	8,9 mg
Alk-Cl	—	93,6	373,1	360,9	470,8	—	553,3 mg
Días 19 a 36.	37,0	97,0	16,0	17,0	13,0	20,5	6,0 cm ³
SiO ₂	—	0,2	—	—	—	—	— mg
CaO	—	122,2	—	—	—	—	— mg
SO ₃	—	0,0	—	—	—	—	— mg
Alk-Cl	—	48,6	—	—	—	—	— mg
Días 37 a 54.	34,0	91,0	14,0	13,0	11,5	19,0	5,0 cm ³
SiO ₂	—	0,2	—	—	—	—	— mg
CaO	—	140,1	—	—	—	—	— mg
SO ₃	—	Sp.	—	—	—	—	— mg
Alk-Cl	—	19,7	—	—	—	—	— mg
Días 55 a 72.	29,0	77,0	12,5	12,0	10,0	16,5	4,0 cm ³
SiO ₂	—	0,2	—	—	—	—	— mg
CaO	—	139,0	—	—	—	—	— mg
SO ₃	—	0,0	—	—	—	—	— mg
Alk-Cl	—	19,2	—	—	—	—	— mg

vés del cuerpo. Como ejemplo límite de lo que acabamos de exponer, podemos poner el comportamiento del cuerpo número 17 de la tabla 24. Este cuerpo filtró, entre los días 55 a 72 de la experiencia 11 450,0 cm³ de líquido, con una concentración por 100 cm³ de 1,4 mg de SiO₂, 4,8 mg de CaO y 0,2 mg de SO₃, siendo esta concentración la menor registrada en nuestras experiencias, y, sin embargo, este cuerpo es de los que mayores cantidades de sustancias han eliminado por corrosión, presentando, al desmontarlo, la parte superior totalmente deshecha.

Los resultados que acabamos de ver, sobre el proceso químico de la corrosión de los hormigones por el agua destilada, pueden resumirse de la siguiente manera:

El mecanismo químico de la corrosión es, para los cuerpos de las distintas clases, fundamentalmente el mismo, y solamente experimenta variaciones al variar el modo de conservación a que se han sometido los distintos cuerpos de ensayo.

El proceso fundamental de la corrosión es el siguiente: En los primeros momentos tiene lugar la eliminación en gran cantidad de los alcalinos que, por efecto de la ley de acción en masa, impiden, mientras persiste una determinada concentración, la eliminación de la cal, la cual va aumentando continuamente hasta llegar a una concentración de cerca de 144 mg por 100 cm³. Las concentraciones de SiO₂ y SO₃, si bien en los primeros momentos adquieren valores algo considerables, disminuyen en seguida, llegando a ser apenas perceptibles.

En caso de una larga conservación en aire varía algo el cuadro anteriormente descrito: debido a la considerable carbonatación que experimenta el hormigón, la eliminación de la cal disminuye notablemente, llegando incluso a desaparecer, aumentando, en cambio, la pérdida de la sílice y la de los sulfatos.

Cuando la conservación ha sido en agua y de bastante duración, también se produce una variación en el proceso descrito: quizá por producirse ya, duran-

te la conservación, una eliminación de los alcalinos, al someter los cuerpos a la acción del agua corrosiva, se produce desde el primer momento solamente una considerable eliminación de la cal, en condiciones que sobrepasan a su saturación normal.

4. Resultados de los ensayos de resistencias

En la mayor parte de las investigaciones sobre la corrosión de los cementos hasta ahora efectuadas se empleaba únicamente, y como ya hemos dicho, la comparación de las resistencias de cuerpos de ensayo antes y después de conservarlos durante cierto tiempo sumergidos en los líquidos objeto de ensayo. Los resultados a que se llegaba eran puramente empíricos, no pudiéndose, con este método, penetrar en el mecanismo del proceso mismo.

Siguiendo el método por nosotros propuesto en este trabajo se hace también esta comparación, pero precisamente sobre los cuerpos en que se midió el proceso químico de la corrosión. De esta manera creemos se podrá adelantar algo en el estudio y conocimiento de este problema.

A pesar de que nuestro ensayo de aplicación del método propuesto, para el caso concreto del agua destilada, no se prolongó, como ya hemos dicho, por el tiempo necesario para llegar a una total descomposición de los cuerpos de ensayo, se han presentado casos en que las resistencias finales de los cuerpos se encuentran bastante disminuídas.

Las resistencias individuales de los cuerpos de ensayo determinadas al final de las experiencias pueden verse en las tablas, ya citadas, en que se dan las demás propiedades físicas, o sea: en las números 1 a 3, para la clase 13; números 7 a 9, para la clase 15, y número 13, para la clase 18.

En la tabla 27 se consignan los valores medios de las resistencias a la presión de los cuerpos de ensayo determinadas al final de las experiencias de filtración, y, además, las resistencias de los cuerpos preparados, según se indicó en el plan, ya esbozado al principio de este trabajo, para efectuar las determinaciones paralelas de la resistencia al final del período de conservación, o sea al empezar las experiencias de filtración, y, por último, las resistencias de otra serie de cuerpos, preparados también análogamente a los de ensayo y conservados mientras duraban las experiencias, al final de las cuales se determinaban sus resistencias.

Las resistencias de los cuerpos paralelos han sido determinadas en series de cuatro cuerpos, calculando después el valor medio. Estos valores medios son los que figuran en la tabla 27.

T A B L A 27

Resumen de las resistencias a la presión de los cuerpos de ensayo y de cuerpos paralelamente conservados

Clase	Conservación	Cuerpo ensayo fin experiencia	Cuerpos paralelos al principio y fin de la filtración	
13	Aire. {	3 días...	344	181
		7 días...	335	225
		28 días...	343	273
	Agua {	3 días...	368	192
		7 días...	368	265
		28 días...	344	307
15	Combinada {		342	300
			342	300
			342	300
	Aire. {	3 días...	158	105
		7 días...	167	139
		28 días...	182	193
18	Agua {	3 días...	125	111
		7 días...	170	145
		28 días...	179	166
	Combinada {		197	265
			197	265
			197	265
18	Aire: 28 días...		74	118
			99	113
			105	134

La comparación de los resultados de esta tabla nos muestra claramente la diferencia de corrosión entre las tres clases de cuerpos estudiadas.

En la clase 13 los valores obtenidos superan o están muy cerca de los de los cuerpos paralelos, resultado debido, sin duda, a la gran compacidad de los cuerpos de esta clase que, como hemos visto, apenas dejaron pasar agua a su través.

En la clase 15 los valores de las resistencias de los cuerpos de ensayo son intermedios de los valores hallados para los cuerpos paralelos de principio y fin de las experiencias de filtración, lo que nos indica una corrosión superior a la que tendría lugar por mera conservación.

Por último, para la clase 18 los valores obtenidos caen por bajo de los de los cuerpos paralelos de principio de las experiencias de filtración, denotando este hecho una intensa corrosión, que, sin embargo, no sería descubierta por el método clásico. Además, la intensidad del descenso de las resistencias es paralelo con la cantidad de sustancias perdidas por el cuerpo, según puede verse mediante una comparación con los resultados químicos.

Como conclusión, y basándonos en todas las experiencias y ensayos efectuados, y que acabamos de exponer, podemos decir que el nuevo método de investigación de la corrosión de los hormigones, objeto de este trabajo, podrá aplicarse, en lo sucesivo, con gran ventaja sobre los hasta ahora conocidos, para la investigación de los procesos que tienen lugar durante la acción de los diferentes líquidos agresivos sobre los hormigones en general.

Isidro PARGA-PONDAL
y Siegfried BAENTSCH

Las obras marítimas en Portugal

Las de la tercera sección del puerto de Lisboa

Antecedentes.—En las pasadas vacaciones de verano hemos tenido ocasión de visitar de nuevo los principales puertos de la vecina República, y creyendo que han de interesar a los lectores de la REVISTA,

especialmente a los ingenieros de Puertos, las importantes obras que en ellos se están llevando a cabo, nos proponemos exponer de una manera sucinta las características más esenciales de cada obra, empezando por las de la tercera sección del puerto de Lisboa, que es el primero de los que hemos visitado.