

689-45

Determinación "a posteriori" de las proporciones de mezcla del hormigón con áridos calizos

VON HEINZ PISTERS

Beckum Beton, nº 1, enero 1972, pág. 19

RESUMEN

Cuando en una obra de hormigón han de examinarse a posteriori la proporción de componentes del hormigón endurecido se precisa, frecuentemente, la determinación del contenido de cemento. Los procedimientos seguidos con este fin parten de un tratamiento del hormigón con ácido clorhídrico. En el caso de que el hormigón contenga un árido soluble en el ácido y no se disponga de él por separado, se describe detalladamente un procedimiento de identificación con una corrección sobre el contenido en dióxido de carbono del hormigón. Con arreglo a las determinaciones realizadas de este modo con el hormigón, será también posible en estos casos determinar el contenido de cemento con una precisión de, cuando menos, $\pm 10\%$.

1. GENERALIDADES

Para poder resolver casos de destrucción o deterioro en construcciones de hormigón, especialmente en casos de polémica promovidas por dictámenes opuestos, así como para el control de obra, se hace frecuentemente necesario conocer también a posteriori el contenido en cemento.

Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma DIN 52170 "Proporción de mezcla y contenido de conglomerante en morteros y hormigones endurecidos". Por este procedimiento se establece la relación ponderal en que se han mezclado conglomerante y áridos para la preparación del hormigón. Podrá, de este modo, establecerse el contenido de cemento para una relación de mezcla y una densidad aparente en el hormigón.

Para determinar la proporción de cemento y áridos, deberán separarse ambos. Con este fin, el mortero o el hormigón, se someten a tratamientos con ácido clorhídrico. Este proceso conduce a una separación del cemento (pasta de cemento) y de los áridos, cuando solamente el *cemento* entra en disolución, es decir, cuando es *soluble en ácido clorhídrico*, en tanto que los *áridos* permanecen insolubles (son insolubles al ácido clorhídrico). En todos los demás casos, en los que

- los áridos son parcialmente solubles con ácido clorhídrico,
- los áridos resultan totalmente solubles en ácido clorhídrico,
- o el cemento es sólo parcialmente soluble con el ácido clorhídrico,

la norma DIN 52 170 exige que, en los ensayos adicionales, se disponga, bien de áridos o bien de conglomerante por separado. Teniendo en cuenta que, casi siempre, el hormigón que ha de ser sometido a estudio tiene meses o incluso años de edad, no será posible, por lo general, encontrar los componentes del hormigón aisladamente.

La primera exigencia de la norma DIN 52 170 para una completa separación del cemento y de los áridos es, por consiguiente, que aquél se disuelva totalmente en el ácido clorhídrico. Este requisito lo cumplen casi todos los cementos encuadrados en la norma DIN 1 164 "Cemento portland, Cemento portland siderúrgico, Cemento de horno alto y Cemento puzolánico". Únicamente el cemento puzolánico tiene un componente en proporción notoria, insoluble en ácido clorhídrico, lo que supone un impedimento para la separación total del cemento y del árido. No obstante, el consumo del cemento puzolánico es tan reducido en la República Federal Alemana, que la necesidad de determinar la relación de mezcla en el "hormigón de cemento puzolánico" se presenta en casos contadísimos. La proporción de componentes insolubles en ácido clorhídrico de los cementos PZ, EPZ y HOZ es despreciable, quedando limitada en la norma DIN 1 164 a un máximo de 3,0 % en peso. Puede partirse del hecho de que la mayor parte del cemento utilizado en la República Federal es prácticamente soluble en ácido clorhídrico en su totalidad y, por consiguiente, cumple con los requisitos de la norma DIN 52 170.

Mucho más complicado es el segundo requisito de la norma DIN 52 170. Con arreglo a la misma, los áridos han de ser prácticamente insolubles en ácido clorhídrico. Esta segunda exigencia puede cumplirse relativamente con poca frecuencia, ya que todos los áridos contienen cantidades reducidas de componentes solubles en dicho ácido. La presencia incluso de un bajo porcentaje de componentes solubles en ácido clorhídrico en los áridos, influye notablemente sobre la determinación de las proporciones de mezcla, teniendo en cuenta que en el hormigón la cantidad de áridos es considerablemente mayor que la de conglomerante. Sin embargo, y según la citada norma DIN 52 170, tal y como se ha mencionado anteriormente, una determinación de áridos parcialmente o totalmente solubles sólo es posible en las condiciones prácticamente irrealizables ya citadas.

Considerando que la norma DIN 52 170 es inoperante en el caso de áridos solubles, se desarrolló un procedimiento según el cual puede determinarse también la proporción de mezcla en el hormigón con una precisión de ± 10 %, cuando los áridos son total o parcialmente solubles en ácido clorhídrico, y no se dispone de áridos aisladamente para un examen a posteriori.

En la zona de Beckum se presentan áridos parcialmente solubles, al sur y este de Westfalia. Desde el punto de vista químico se trata en la fracción soluble en ácido clorhídrico de rocas carbonatadas, ricas en carbonato cálcico (caliza).

Por lo general, es cierto que se consideran rocas solubles en ácido clorhídrico, en primer término, la caliza (CaCO_3) o la magnesita (MgCO_3) o la mezcla de ambos carbonatos, p. e. dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. La solubilidad de otras rocas que se utilizan como áridos para el hormigón es relativamente reducida, especialmente si la acción o efecto del ácido clorhídrico no es muy intenso o perdurable. El procedimiento propuesto parte, por lo tanto, del requisito de que se trate, en el caso de árido soluble que con mayor frecuencia se presenta, de caliza (CaCO_3).

A continuación se describe, en primer lugar, el procedimiento de análisis, informándose, seguidamente de algunos de los resultados obtenidos.

2. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

2.1. Fundamento químico del método

El carbonato de calcio (CaCO_3) consiste en, aproximadamente, un 44 % de dióxido de carbono (CO_2) y un 56 % de óxido cálcico (CaO). Si un hormigón contiene, en parte o en su totalidad, CaCO_3 como árido, éste se disolverá en ácido clorhídrico. Por consiguiente, el componente soluble en ácido clorhídrico de los áridos aparecería como conglomerante de acuerdo con el método convencional de cálculo de las dosificaciones.

En los áridos calizos únicamente será posible una corrección o rectificación de los áridos determinados por medios químicos (residuo insoluble en ácido clorhídrico) si se utiliza el contenido de dióxido de carbono (CO_2) de un hormigón como "molécula-guía", por decirlo así, para determinar el contenido en caliza. Se puede convertir el contenido de CO_2 del hormigón en carbonato de calcio (CaCO_3) del siguiente modo:

$$\frac{\% \text{CO}_2 \times 100}{44} = \% \text{CO}_2 \times 2,27 = \% \text{CaCO}_3.$$

Ha de tenerse en cuenta que el cemento, según la norma DIN 1 164, puede contener hasta un 2,5 % de CO_2 , y que el hormigón admite durante las operaciones de preparación para su análisis químico (desmenuzamiento, secado) algo más de CO_2 . Estas fracciones deben tenerse presentes.

Por estas razones, del contenido de CO_2 del hormigón, determinado analíticamente, se descuenta un 0,3 % estimado por la experiencia. Por otra parte, el hormigón puede haber absorbido anteriormente alguna cantidad de CO_2 de la atmósfera. Este proceso, conocido como carbonatación, tiene lugar en la superficie del hormigón. Para los análisis o ensayos descritos a continuación debe recurrirse exclusivamente a hormigón sin carbonatar. Por consiguiente, deberán eliminarse las zonas marginales de las muestras ya carbonatadas (véase también el apartado 2.4).

Cuando la caliza contiene, además de CaCO_3 , carbonato magnésico (MgCO_3), en pequeña proporción puede seguir considerándose un factor de conversión de $2,27 \times \text{CO}_2$. Este factor se reduce cuando la porción de MgCO_3 aumenta, como es el caso de la dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] con una relación molar de 1:1, con lo que tendremos:

$$\frac{\% \text{CO}_2 \times 184,4}{88} = \% \text{CO}_2 \times 2,10 = \% \text{dolomita}.$$

La reducción o disminución del factor de 2,27 a 2,10 supone un 7,5 % y da lugar, al no ser tenido en cuenta en el cálculo de las relaciones de mezcla, a un error apreciable. Normalmente, puede analizarse la composición mineralógica de los áridos del hormigón. De lo contrario, será preciso analizar un grano grueso del árido, con el fin de determinar su composición química para tener en cuenta el contenido de MgCO_3 .

Una vez desmenuzado y secado a 105°C , se determina el contenido de CO_2 (en %) del grano de árido. El factor de reducción del CO_2 del árido soluble que ha de establecerse será:

$$\text{Factor} = \frac{100}{\% \text{CO}_2}$$

2.2. Determinaciones químicas y físicas

En el hormigón se determinan:

- Pérdida por calcinación y contenido de dióxido de carbono.
- Residuo insoluble en ácido clorhídrico.
- Densidad aparente del hormigón.

La “pérdida por calcinación” sirve para determinar el contenido de agua, que continúa existiendo en el hormigón tras un secado a una temperatura de 105°C.

El agua se designará como “agua combinada”, sin tener en cuenta si se trata de agua química o físicamente ligada.

Al mismo tiempo, en la pérdida por calcinación se incluye el CO₂. La pérdida por calcinación (que se determina mediante tratamiento hasta 1.000°C ± 25°C) supone, por consiguiente, la suma del “agua combinada” (H₂O) y del dióxido de carbono (CO₂).

El dióxido de carbono se determina con el fin de calcular la roca carbonatada contenida en los áridos. Además, se requiere el porcentaje o contenido de CO₂ para calcular el agua combinada:

$$\% \text{ de pérdida por calcinación} - \% \text{ CO}_2 = \text{agua combinada.}$$

El *residuo insoluble en ácido* habrá de determinarse para conocer el árido. Cuando la totalidad del árido es francamente insoluble (por ejemplo arena gruesa de cuarcita del Rhin), el residuo insoluble en ácido puede equipararse al contenido de árido en el hormigón. Normalmente, el contenido en CO₂ de este tipo de hormigones es muy reducido.

Si los áridos son parcialmente solubles en ácido clorhídrico, se determina en primer lugar la fracción de los áridos insolubles en ácido. A este porcentaje de los áridos se le suma la parte que contiene CO₂ (soluble) ($\% \text{ CO}_2 \times 2,27 = \% \text{ CaCO}_3$). Si los áridos se disuelven prácticamente en su totalidad en el ácido (sin residuo insoluble), estaremos en presencia de áridos carbonatados.

La “densidad aparente” (R) del hormigón ha de determinarse con el fin de poder calcular, por la proporción de mezcla, el contenido o porcentaje de cemento por cada m³ de hormigón. Las instrucciones para este cálculo figuran en el apartado 2.7.

2.3. Toma y dimensiones de la muestra de hormigón

La cantidad de material que ha de tomarse para la determinación de la proporción de mezcla, depende del tamaño máximo de los áridos. Habrá de tomarse para un:

- tamaño máximo hasta de 30 mm aproximadamente 5 kg;
- tamaño máximo hasta de 7 mm aproximadamente 3 kg, y
- tamaño máximo hasta de 3 mm aproximadamente 2 kg.

Para cada punto de una obra, en el que ha de determinarse el porcentaje de cemento, habrá de tomarse una muestra independiente. La muestra deberá guardarse herméticamente cerrada inmediatamente después de efectuada la toma.

2.4. Preparación de la muestra

Se comprueba con fenolftaleína si alguna parte de la muestra está carbonatada y tiene que ser eliminada (véase el apartado 2.1.).

La muestra se desmenuza primeramente a grosso modo, si esto fuese necesario. Se toman dos o tres trozos para la determinación de la densidad aparente. El resto se desmenuza en una trituradora de laboratorio hasta un tamaño máximo de unos 2 mm. En un separador de muestras de laboratorio se preparan a continuación, en una o dos operaciones, de 50 a 100 g como muestra representativa, secándose a una temperatura de 105°C hasta alcanzar la constancia de peso. Esta fracción se muele a continuación hasta lograr una finura para análisis (< 0,2 mm), conservándose en un recipiente *hermético*. Esta preparación deberá realizarse en el tiempo más breve posible, teniendo en cuenta la absorción relativamente rápida de CO₂ de la atmósfera. Lo más indicado es conservar estos finos para análisis envasados en un recipiente hermético dentro de un desecador con amianto sodado.

2.5. Realización de los análisis

Todas las determinaciones citadas a continuación (pérdida por calcinación, dióxido de carbono, residuo insoluble en ácido clorhídrico, densidad aparente del hormigón) deberán de realizarse por *duplicado*. Si los valores del análisis doble difieren en más de un 2 % (relativo), se realiza un tercer ensayo de control. Los cálculos posteriores se efectúan con los valores medios de los individuales, que no difieren entre sí en más de un 2 % (relativo).

2.5.1. Pérdida por calcinación

Un gramo de la muestra preparada de acuerdo con lo indicado en el apartado 2.4. y pesado con precisión de 0,1 mg, se introduce en un crisol y se calienta durante 10 minutos en un horno eléctrico a una temperatura de 1.000°C ± 25°C. Teniendo en cuenta que existe el riesgo de que el material salpique, es conveniente cubrir el crisol con una tapa. Después se enfría la muestra en un desecador a temperatura ambiente, pesándose con la misma precisión (0,1 mg).

Cálculo:

$$\% \text{ pérdida por calcinación} = \frac{(E - A) \times 100}{E}$$

donde:

E = peso inicial (en gramos);

A = peso final (en gramos).

2.5.2. Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono (CO₂) se determina de acuerdo con el procedimiento 2.2.8. del “Método de análisis de cementos” (Serie de publicaciones de la industria del cemento, cuaderno 37/1970), o con arreglo a algún otro procedimiento adecuado. A continuación se describe el procedimiento 2.2.8 del “Método de análisis de cementos”, así como el correspondiente aparato (fig. 1). Para producir vacío en el dispositivo se emplea una pequeña bomba de vacío o un tubo de nivel.

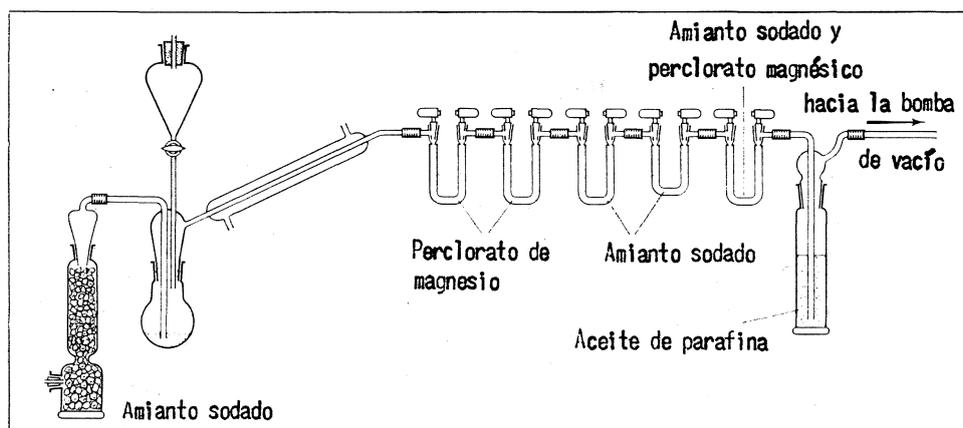


Fig. 1.—Aparato para la determinación gravimétrica del dióxido de carbono.

Reactivos:

- Cloruro (II) de mercurio HgCl_2 , p. a.
- Amianto sodado para análisis elemental
- Acido sulfúrico concentrado H_2SO_4 , p. a. ($d = 1,84$)
- Acido sulfúrico diluido 1:4
- Perclorato magnésico $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$, p. a.

En el matraz de destilación de 100 ml (NS 29) del aparato se pesa 1 g de la muestra, a 0,1 mg, preparada con arreglo al apartado 2.4., mezclándose con una punta de espátula del cloruro (II) de mercurio, ayudado con un poco de agua.

El matraz se fija herméticamente con el embudo de decantación. A continuación, y por espacio de 15 minutos, se aspira aire a través del aparato, pasando el aire aspirado, antes de penetrar en el matraz, por una columna desecadora llena de amianto sodado, con lo que queda libre de dióxido de carbono. Tras cortar la corriente de aire mediante estrangulación del tubo de conexión entre la columna de amianto sodado y el matraz de destilación con una pinza de Mohr, se cierran las llaves de paso de los dos tubos de absorción llenos de amianto sodado, retirándose dichos tubos y determinando su peso con una sensibilidad de 0,1 mg. A continuación se montan nuevamente los tubos en el aparato, y se añaden por el tubo de decantación de 25 a 30 ml de ácido sulfúrico 1:4 en el matraz. Al proceder de este modo, deberá procurarse que un resto del ácido permanezca en el embudo de decantación como líquido de bloqueo. Después de abrir la pinza de Mohr, la corriente de aire arrastra el dióxido de carbono liberado a través del refrigerante, y los dos tubos de absorción llenos de perclorato de magnesio que sirven para el secado hacia los dos tubos de absorción llenos de amianto sodado previamente tarados. Para evitar que penetre dióxido de carbono y agua procedentes de la atmósfera, se conecta a continuación un tubo de absorción lleno de perclorato magnésico y amianto sodado. A éste se acopla un lavador de gases lleno de aceite de parafina que actúa como cuenta-burbujas. Al cabo de unos 10 minutos se calienta el contenido del matraz hasta la ebullición. Se prosigue la absorción de aire hasta que el matraz de destilación se enfríe. A continuación se cierran las llaves y se desmontan los tubos de absorción, los cuales, acto seguido, se colocan en un secador por un período de 5 minutos para estabilizar su temperatura, pesándose seguidamente con la misma sensibilidad que al principio del ensayo.

Cálculo:

$$\% \text{ CO}_2 = \frac{(A - B) \times 100}{E};$$

donde:

A = peso de los tubos de absorción, después de la absorción (en g);

B = peso de los tubos de absorción, antes de la absorción (en g);

E = peso inicial de la muestra (en g).

2.5.3. Residuo insoluble en ácido clorhídrico

Reactivos:

Acido clorhídrico concentrado	...	HCl, p. a. ($d = 1,19$)
Acido clorhídrico diluido	...	1:20
Cloruro sódico	...	NaCl, p. a.
Solución de cloruro sódico	...	29 g de cloruro de sodio se diluyen con agua hasta 1.000 ml ($\sim 0,5 \text{ N}$)
Carbonato sódico	...	Na_2CO_3 , p. a.
Solución de carbonato sódico	...	53 g de carbonato sódico se diluye con agua hasta 1.000 ml ($\sim 1 \text{ N}$)

Unos 3 g de la muestra preparada de acuerdo con el apartado 2.4. y pesada a 0,1 mg se deslíen con 70 ml de agua en un vaso de vidrio de 250 ml (forma alta) y se mezclan con 10 ml de ácido clorhídrico concentrado, hirviéndose durante 1 minuto. A continuación se filtra por un crisol filtrante de vidrio 1 G4, se limpia bien el vaso de vidrio, y se lava el residuo en el crisol tres veces con solución de cloruro de sodio ($\sim 0,5 \text{ N}$) caliente ($\sim 80^\circ\text{C}$). Para la limpieza del vaso de vidrio y para el lavado *solamente* podrá utilizarse una solución de cloruro sódico. El crisol deberá disponerse vacío siempre que se lave. Después se lava cinco veces con solución caliente ($\sim 80^\circ\text{C}$) de carbonato sódico, con el fin de disolver el ácido silícico del conglomerante que se haya producido. Acto seguido, se lava tres veces con solución caliente de cloruro sódico y, finalmente, tres veces con ácido clorhídrico diluido caliente.

A continuación se seca el crisol en una estufa a una temperatura de $105^\circ \pm 5^\circ\text{C}$, hasta peso constante (~ 30 minutos). El residuo se pesa a 0,1 mg, indicándose el porcentaje en función de la pesada inicial de la muestra.

Cálculo:

$$\% \text{ de residuo insoluble al ácido clorhídrico} = \frac{A \times 100}{E}$$

donde:

A = peso final (en g);

E = peso inicial (en g).

2.5.4. Densidad aparente del hormigón

La densidad aparente del hormigón se determina basándose en la norma DIN 52 102 "Ensayo de la piedra natural; determinación de la densidad". Para ello se secan dos o más trozos de hormigón a una temperatura de 105°C hasta la constancia de peso, y se pesan

(peso en estado seco G_t); a continuación se embeben de agua las piezas que sirven para el ensayo, determinándose su peso una vez que han sido enjugadas con un paño húmedo (G_s); acto seguido se determina, con ayuda de la balanza hidrostática, el peso sumergido (G_u) de las muestras, estableciéndose la densidad con arreglo a la siguiente fórmula:

$$R = \frac{G_t \times 1.000}{G_s - G_u} \text{ (kg/m}^3\text{)}.$$

Partiendo de los valores parciales de los distintos ensayos se calcula el valor medio R (en kg/m^3).

2.6. Valoración y cálculo de las proporciones de mezcla

La proporción de mezcla de un hormigón, que ha sido preparado total o parcialmente con áridos solubles en ácido clorhídrico, se calcula del siguiente modo, partiendo de los valores medios de los resultados obtenidos en los análisis.

2.6.1. Agua combinada

Pérdida por calcinación	%
— CO_2	%
<hr/>	
Agua combinada	%

2.6.2. Caliza (carbonato cálcico) en los áridos

CO_2 total	%
— CO_2 (*)	0,3 %
<hr/>	
— CO_2 en los áridos	%
<hr/>	
Carbonato de calcio (CaCO_3) = $2,27 \times \text{CO}_2$ en los áridos ...	%

2.6.3. Total de áridos

Caliza	%
+ Componentes insolubles en ácido	%
<hr/>	
Total de áridos	%

2.6.4. Cemento

Hormigón (secado a 105°C)	100,0 %
— Agua combinada	%
— Total de áridos	%
<hr/>	
Cemento	%

2.6.5. Proporción de mezcla cemento : áridos (en porcentajes en peso)

$$\text{Proporción de mezcla} = 1 : \frac{\text{total de áridos (\%)}}{\text{cemento (\%)}}$$

2.6.6. Proporción de mezcla cemento : áridos : agua combinada (en porcentajes en peso)

$$\text{Proporción de mezcla} = 1 : \frac{\text{total áridos (\%)}}{\text{cemento (\%)}} : \frac{\text{agua combinada (\%)}}{\text{cemento (\%)}}$$

(*) Corrección para el contenido de CO_2 en el conglomerante y para la absorción de CO_2 de la atmósfera durante el proceso de análisis (véase el apartado 2.1.).

2.7. Contenido de cemento

El contenido de cemento en kg/m^3 de hormigón se calcula por la densidad aparente del hormigón endurecido y por la proporción de mezcla de cemento: áridos: agua combinada, en la siguiente forma:

$$\text{Contenido en cemento (kg/m}^3\text{)} = \frac{R}{1 + \frac{\text{total áridos (\%)} + \frac{\text{agua combinada (\%)}}{\text{cemento (\%)}}}$$

siendo R la densidad aparente del hormigón.

3. ENSAYOS DE CONTROL

Con el fin de comprobar la exactitud del procedimiento propuesto, se elaboraron en el laboratorio de cementos y hormigones de Beckum unos cubos de 20 cm de lado. Los hormigones se prepararon con cemento portland y arena y grava del Rhin o del Lippe con un tamaño máximo de 30 mm.

La arena del río Lippe contiene una parte relativamente elevada de roca carbonatada. Los hormigones presentaron una proporción de mezcla de cemento : áridos : agua = 1,00 : 6,00 : 0,60 (en peso). El contenido de cemento fue, aproximadamente, de 310 kg/m^3 . La curva granulométrica de los áridos se encontraba en la zona especialmente favorable de la norma DIN 1 045.

El tamaño de grano ofrecía la siguiente composición:

hasta	3	7	15	30 mm
	30	50	75	100 %

Los cubos se almacenaron durante 1 día envueltos en paños húmedos; más tarde, hasta el tercer día sumergidos en agua y, finalmente, al aire ambiente.

La determinación de la proporción de mezcla se efectuó, en cada uno de los cubos, al cabo de 3 y 28 días, así como al cabo de 1 año, de acuerdo con la norma DIN 52 170 (a condición de que los áridos fuesen insolubles en el ácido clorhídrico), y conforme el procedimiento de corrección del CaCO_3 . Los resultados figuran en la tabla 1 (procedimiento según norma DIN 52 170) y en la tabla 2 (procedimiento de corrección del CaCO_3).

El procedimiento según la norma DIN 52 170 arroja, en el caso del hormigón preparado con áridos del Rhin, una proporción de mezcla de 1:6,4, lo que se aproxima en su magnitud a la composición real de 1,00:6,00. En el hormigón con áridos del río Lippe, el resultado fue, según era de esperar, de 1:1,4, es decir, una proporción de mezcla totalmente inadecuada.

T A B L A 1

Proporción de mezcla de hormigones determinada según la norma DIN 52 170

Análisis	Aridos del Rhin			Aridos del Lippe		
	3 días	28 días	1 año	3 días	28 días	1 año
Pérdida por calcinación	3,3	3,9	3,6	17,3	19,8	19,7
Residuo insoluble	83,7	83,1	83,3	48,0	47,3	45,8
Cemento	13,0	13,0	13,1	34,7	32,9	34,5
Proporción de mezcla Cemento : áridos	1 : 6,4	1 : 6,4	1 : 6,4	1 : 1,4	1 : 1,4	1 : 1,3

T A B L A 2

Proporción de mezcla de hormigones, determinada por el procedimiento con corrección del CaCO_3

Análisis	Aridos del Rhin			Aridos del Lippe		
	3 días	28 días	1 año	3 días	28 días	1 año
Pérdida por calcinación	3,3	3,9	3,6	18,3	19,8	19,7
Anhidrido carbónico	0,5	0,7	0,8	15,5	16,6	16,6
Agua combinada	2,8	3,2	2,8	2,8	3,2	3,1
Caliza (CaCO_3)	0,5	0,9	1,1	34,5	37,0	37,0
Residuo insoluble en ácido	82,5	81,8	83,3	49,2	46,1	45,8
Aridos	83,0	82,7	84,4	83,7	83,1	82,8
Cemento	14,2	14,1	12,8	13,5	13,7	14,1
Proporción de mezcla Cemento : áridos	1 : 5,8	1 : 5,9	1 : 6,6	1 : 6,2	1 : 6,1	1 : 5,9
Proporción de mezcla Cemento : áridos : agua com- binada	1 : 5,8 : 0,2	1 : 5,9 : 0,2	1 : 6,6 : 0,2	1 : 6,2 : 0,2	1 : 6,1 : 0,2	1 : 5,9 : 0,2
Densidad aparente del hor- migón endurecido (kg/m^3)	2.250	2.290	2.320	2.270	2.290	2.260
Contenido de cemento (kg/m^3)	320	322	298	306	312	318

En el procedimiento con corrección del CaCO_3 se efectuó también un cálculo del contenido de cemento, lo que resultó innecesario con el procedimiento según norma DIN 52 170, debido a las notables variaciones en el hormigón con áridos del río Lippe.

El procedimiento con la corrección de CaCO_3 muestra, tanto con los áridos del Rhin (valor medio 1:6,1) como con los áridos del Lippe (valor medio 1:6,1), una coincidencia satisfactoria. También los contenidos de cemento se aproximan suficientemente al contenido real del mismo (310 kg/m^3).

4. RESUMEN Y PERSPECTIVAS

Para la determinación "a posteriori" del contenido de cemento en el hormigón, que contenga áridos solubles en ácidos, y para cuando no se dispone de áridos aisladamente para análisis adicionales, se propone un procedimiento de ensayo con una corrección del contenido de dióxido de carbono. Los análisis practicados en ciertos hormigones de laboratorio han demostrado que este procedimiento permite una determinación de la proporción de mezcla y un cálculo del contenido de cemento con una exactitud de, por lo menos, $\pm 10 \%$. De este modo puede determinarse también la proporción de mezcla del hormigón, en los casos en que falla el procedimiento usado hasta el presente, conforme la norma DIN 52 170.

El método propuesto emplea también hormigones y morteros carbonatados. De todos modos deben hacerse investigaciones sobre la fijación del dióxido de carbono sobre hormigones y morteros.

Los procedimientos con "moléculas-guía" o "elementos-guía" pueden aplicarse también, en ciertas circunstancias, a otros áridos (por ejemplo, pómez, áridos ligeros, amianto y similares) o a conglomerantes con elevada proporción de componentes insolubles en ácido clorhídrico (cementos puzolánicos, cementos con adiciones). En la actualidad se están llevando a cabo esta clase de análisis.