

617-126

## Normalización del cemento

Notas y explicaciones respecto a la reelaboración de la norma alemana del cemento DIN 1164; redacción junio 1970

(continuación)

**G. WISCHERS**

**Beton, nº 5, mayo 1971, págs. 193-197**

**Beton, nº 6, junio 1971, págs. 241-245**

### 6.2. Tipos de resistencia de los cementos

Al igual que todas las demás normas de cementos, la DIN empleada hasta ahora 1164 sólo preveía, para los diferentes tipos de resistencia, las resistencias mínimas en determinados momentos; estas resistencias podían sobrepasarse en medida elevada a voluntad. La sobrerresistencia que excedía la designación mínima era distinta para los diversos cementos y —especialmente en el caso de la clase inferior Z 275— considerable. Por eso, el tipo resistente tampoco era un criterio suficiente para enjuiciar la contribución de un cemento a la resistencia en el hormigón, de tal forma que en los usuarios existía un interés justificado en conocer la verdadera resistencia normal de un cemento. Desde el punto de vista de la inspección de obra y del derecho, la clasificación por la resistencia mínima tenía la desventaja de que sólo se garantizaba y vigilaba la resistencia mínima, pero las variaciones por encima de la resistencia mínima no estaban sometidas a ninguna limitación y, por ello, podrían originarse ciertas inseguridades.

La clasificación de los tipos de resistencia por la nueva norma alemana del cemento trata de suprimir, fundamentalmente, este defecto. En las reflexiones a este respecto se partió de un valor en el tiempo para la resistencia a los 28 días, que debe procurarse para todos los cementos de un mismo tipo independientemente de su clase. Ahora bien, las posibilidades de regulación de la resistencia a la compresión de los 28 días del producto cemento son limitadas (ver también apartado 2).

Si por ejemplo se establece la resistencia a la compresión de 450 kp/cm<sup>2</sup>, entonces se atribuye a la influencia del fabricante una desviación del orden de unos  $\pm 20$  kp/cm<sup>2</sup>. Además el procedimiento de ensayo, con el que se vigila la observación del valor límite descrito en la sección anterior, presenta dispersiones relativamente grandes. Por lo tanto, deben permitirse tolerancias respecto a este valor límite, que tienen en cuenta las dispersiones del ensayo y calidad que se suman geoméricamente.

67

En un principio se había pensado —de manera semejante a como se había regulado en el caso de otros productos— en señalar límites relativamente estrictos, por ejemplo  $\pm 50$  kp/cm<sup>2</sup>, que podrían excederse en una determinada fracción, por ejemplo un 5 %. Pero esta regulación tendría dificultades desde el punto de vista del derecho contractual, porque la comprobación de si sólo el 5 % de los valores de un suministro quedan por debajo del límite exigiría gran número de ensayos. Por ello se han decidido hacer los límites de tolerancia lo bastante grandes como para que se desvíen del valor base con tal seguridad estadística que todo ensayo aislado se encuentre dentro de este campo. Como la dispersión del ensayo importa ya 25 kp/cm<sup>2</sup>, se estableció como base para la suma geométrica de dispersión de ensayo y calidad una desviación standard  $s$  de 30 kp/cm<sup>2</sup> (en la que domina claramente la dispersión del ensayo). Si el 100 % de todos los ensayos han de encontrarse dentro del campo de tolerancia (lo que no es posible según una interpretación estadística estricta), el campo de dispersión debe importar por lo menos  $\pm 3 s$  (correspondiente al 99,7 %), es decir, ningún valor individual puede sobrepasar o quedar en menos de unos 90 kp/cm<sup>2</sup> del valor base (en la norma se eligieron 100 kp/cm<sup>2</sup>).

En la norma misma el valor base no se ha elegido para la designación del tipo resistente, sino que por razones más formales (coincidencia con otras normas de construcción) se ha tomado el valor inferior de la tolerancia como resistencia mínima y el valor superior de dicha tolerancia como límite superior de resistencia, los cuales no serán sobrepasados en ningún ensayo individual. El espacio entre el límite superior y el inferior de resistencia es de 200 kp/cm<sup>2</sup>, lo cual parece muy amplio a primera vista. En realidad esto es una exigencia estricta; para observarla en la fabricación del cemento se debe tender a un valor que esté situado en el centro de los límites inferior y superior de resistencia, para que todos los resultados del ensayo se encuentren dentro del espacio permitido de resistencia. De este modo se puede partir de la base de que el 90 % de los valores de la resistencia se desvían de este valor central en sólo unos 50 kp/cm<sup>2</sup> (fractila 5 % y 95 %) y que dos tercios de todos los valores se desvían de la base sólo en unos  $\pm 30$  kp/cm<sup>2</sup>. Por ello, en realidad, los límites son adecuadamente estrictos.

En lugar de las calidades existentes hasta ahora Z 275, Z 375 y Z 475, se han establecido en la nueva norma alemana del cemento los tipos resistentes Z 350, Z 450 y Z 550 (los números indican, en cada caso, la resistencia mínima a 28 días). Aun cuando por el nuevo procedimiento de ensayo surjan para el mismo cemento valores de resistencia, en general algo más elevados, en la nueva norma las resistencias mínimas se han elevado en unos 50 kp/cm<sup>2</sup>. En relación con los dos tipos Z 350 y Z 450 se ha introducido los límites de resistencia superiores, que se encuentran en unos 200 kp/cm<sup>2</sup> por encima del mínimo. En relación con el tipo de resistencia Z 550 se evitó el establecer un límite superior, porque en esa zona la tecnología de fabricación de cemento establece límites y porque no se debe impedir nuevos desarrollos dirigidos hacia una resistencia todavía superior.

Se ha creado además un nuevo tipo resistente: Z 250. Los cementos de este tipo de resistencia, que presenta igualmente un límite superior que está unos 200 kp/cm<sup>2</sup> por encima del mínimo, deben poseer permanentemente propiedades especiales, tales como bajo calor de hidratación, y/o elevada resistencia a los sulfatos. En este nuevo tipo, que puede ser muy útil para construcciones de hormigón en grandes masas, se fabrican casi exclusivamente cementos de propiedades especiales. En los demás tipos resistentes se pueden proporcionar cementos normales u otros de propiedades especiales, a voluntad (ciertos deseos extremos, como por ejemplo, una resistencia muy elevada de un Z 550 y bajo calor de hidratación, se excluyen mutuamente por razones técnicas del cemento).

Los cuatro nuevos tipos de resistencia se distinguen en la resistencia mínima a los 28 días en 100 kp/cm<sup>2</sup>. Como el campo entre la resistencia mínima y máxima es de 200 kp/cm<sup>2</sup>, se interfieren los campos de resistencia pertenecientes a cada uno de los tipos. Teniendo en cuenta las consideraciones del apartado 6.1. no es posible prácticamente fabricar un cemento en la zona de interferencia de dos tipos contiguos, pues para cada cemento y en un gran número de ensayos resulta una distribución de frecuencias tal como se representa en la figura 3. En relación con un Z 350 se registran, por ejemplo, el valor medio (450 kp/cm<sup>2</sup>) así como todo el campo permitido para los ensayos aislados (200 kp/cm<sup>2</sup> de 350 hasta 550 kp/cm<sup>2</sup>) y los 5 % ó 95 % respectivamente de la fractila (400 y 500 kp/cm<sup>2</sup>) bajo la abscisa. Por consiguiente, el 90 % de todos los valores (ver apartado 6.1.) de los ensayos individuales se encuentran en el campo de 400 a 500 kp/cm<sup>2</sup>. Por consiguiente, estos campos-base de cada una de las resistencias no se interfieren. Sólo, en cada caso, el 5 % de los valores individuales se encuentran en el campo-base del tipo resistente limítrofe, inferior o superior, respectivamente. Como se expuso en el apartado 6.1., las dispersiones totales deben reducirse, en primer lugar, a las dispersiones del ensayo, es decir, la verdadera resistencia y, por tanto, la contribución del cemento a la resistencia del hormigón, se dispersará esencialmente menos y se encontrará dentro del campo-base del tipo en cuestión.

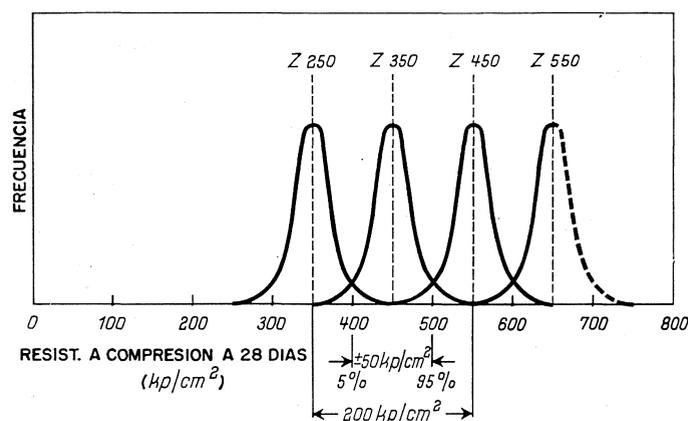


Fig. 3.—Distribución de frecuencia de muchísimos exámenes aislados de cementos, que han sido fabricados según DIN 1164 nuevo (1970).

Por ello, la nueva norma del cemento DIN 1164 (1970) tiene en cuenta dos deseos esenciales de la inspección de la construcción y de los consumidores. Exige una homogeneidad hasta ahora no requerida para un producto pétreo o terroso y además determina la resistencia de todos los cementos de un tipo de resistencia en un nivel unitario.

Sólo la presuposición de una resistencia media igual para los cementos de un tipo resistente y de dispersiones reducidas de la verdadera resistencia ha hecho posible la aceptación de condiciones para un “hormigón de receta” en la nueva norma alemana de hormigón DIN 1045 (1971). La tabla 3 reproduce el contenido mínimo de cemento Z 350 en hormigones con un tamaño máximo de árido de 32 mm para los tipos resistentes Bn 50 a Bn 250, en función de la granulometría de los áridos y de la consistencia. El contenido de cemento debe aumentarse en el cemento del tipo Z 250 en un 15 % y puede reducirse en un 10 % a lo sumo en el caso del Z 450. Asimismo, en el caso de tamaño de árido menor de 32 mm el contenido de cemento debe elevarse; por otra parte, puede reducirse en el caso de tamaños mayores que 32 mm.

TABLA 3

Contenido mínimo de cemento para Z 350 según DIN 1045 (1971) para hormigón I con un tamaño máximo de árido de 32 mm

Tipo de resistencia del hormigón	Curva granulométrica de los áridos	Contenido mínimo de cemento en kg por m <sup>3</sup> de hormigón compactado para los tipos de consistencia		
		K <sub>1</sub> *)	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Bn 50 *)	Ventajosamente utilizable	140	160	—
		160	180	—
Bn 100 *)	Ventajosamente utilizable	190	210	230
		210	230	260
Bn 150	Ventajosamente utilizable	240	270	300
		270	300	330
Bn 250	Ventajosamente utilizable	280	310	340
		310	340	380

\*) Sólo en relación con hormigón en masa.

Las disposiciones de la nueva norma de cemento DIN 1164 (1970) tienen igualmente ventajas para el hormigón B II, que en virtud de un examen de idoneidad se puede establecer su composición. Para realizar un proyecto de mezcla era necesario, hasta ahora, el conocimiento de la resistencia media a la compresión según la norma y de las posibles desviaciones. Según la nueva norma del cemento se puede presuponer una resistencia media normal del cemento en el centro entre los límites de resistencia inferior y superior, así como una desviación standard (incluyendo la dispersión del ensayo) de 30 kp/cm<sup>2</sup>. Así, es posible emplear inmediatamente, para cada tipo de resistencia, las curvas publicadas por K. Walz [5] y sacar de ellas la relación agua/cemento máxima permitida para una determinada resistencia a la compresión del hormigón. De este modo también desaparece, en relación con los tecnólogos del hormigón, la importancia tradicional de los valores medios anuales y los resultados individuales de los ensayos del cemento. Con vistas a las inevitables dispersiones del ensayo es desacertado basar un proyecto de mezcla en resistencias del cemento de ensayos individuales.

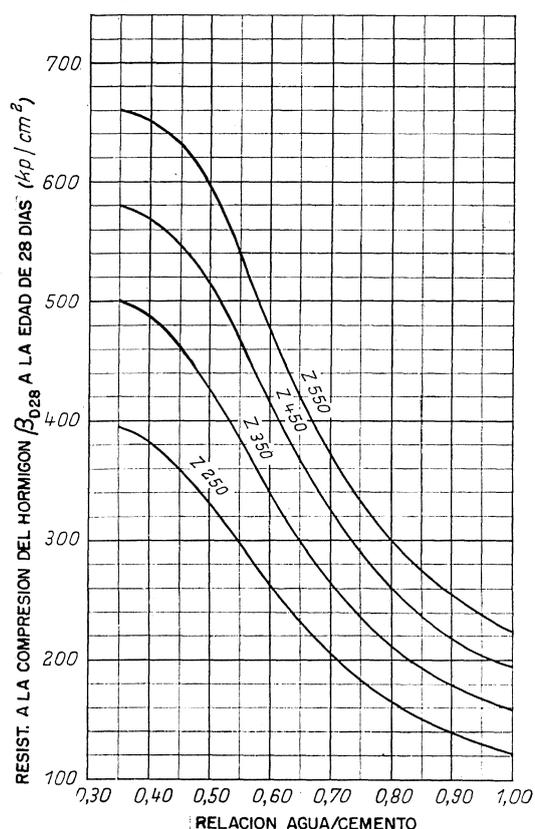


Fig. 4.—Dependencia de la resistencia a la compresión del hormigón de la relación agua/cemento y del tipo de resistencia del cemento según DIN 1164 (1970) según K. Walz [5].

Junto a la resistencia a la compresión a los 28 días del cemento, puede ser importante en algún caso concreto, conocer el desarrollo de resistencia en los primeros días del endurecimiento; esto tiene importancia práctica en la construcción, por ejemplo, para el desencofrado, el pretensado o el hormigonado a bajas temperaturas. El desarrollo de resistencia depende, esencialmente, de las materias primas y de la finura de molturación del cemento. En una materia prima dada no es posible, técnicamente, modificar a voluntad y a la vez la resistencia inicial y la resistencia a la compresión a los 28 días de un cemento. Si ha de lograrse una determinada resistencia a la compresión después de 28 días, la resistencia inicial sólo puede modificarse entre límites relativamente estrictos, es decir, se establece una resistencia inicial en función de las materias primas, de la composición y de la finura de molturación que ya no se puede modificar posteriormente. La figura 5 muestra esquemáticamente el diferente desarrollo de resistencia de dos cementos de igual resistencia a la compresión a los 28 días.

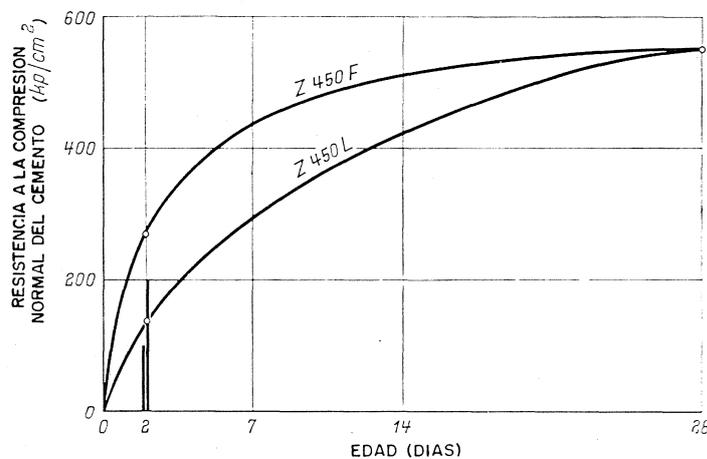


Fig. 5.—Representación esquemática del diferente desarrollo de resistencia de dos cementos con igual resistencia a la compresión de 28 días.

Hasta ahora en Alemania —como en muchos otros países— no se examinó de manera sistemática la resistencia inicial de los cementos a una determinada edad; simplemente, en el caso de cementos de resistencia inicial más elevada se hizo la prueba antes que en los demás cementos. Esto tenía en parte cierta justificación en la práctica, pero dificultaba la comparación de la resistencia inicial de diferentes cementos. Asimismo, el gasto del ensayo en cementos especialmente resistentes a las primeras edades era muy elevado por las cuatro fechas en estudio, en comparación con los nuevos conocimientos adquiridos. Para la caracterización del desarrollo inicial de resistencia basta si junto a la resistencia a la compresión a 28 días se determina la resistencia inicial sólo en un momento característico. Sin embargo, este momento es diferente de acuerdo con el desarrollo resistente del cemento. Para corresponder al deseo de comparación de los cementos, en la nueva norma alemana del cemento DIN 1164 (1970) se ha previsto, en relación con la resistencia inicial, sólo una edad uniforme de ensayo a los 2 días. Se ha encontrado, sin embargo, que la resistencia a 2 días en los cementos de los tipos Z 250 y Z 350, que endurecen más lentamente, tiene poca importancia; por eso ha tenido que abandonarse el principio fundamental de comparar todos los cementos y se ha establecido un examen sólo después de 7 días para estos dos cementos. Pero siempre es posible aplicar una comparación con la resistencia a 2 días; conociendo las resistencias en dos edades del examen, se puede averiguar gráficamente, con sencillez y seguridad, la resistencia en otro momento anterior con el nomograma desarrollado por G. Sadran y R. Dellyes [6] (fig. 6).

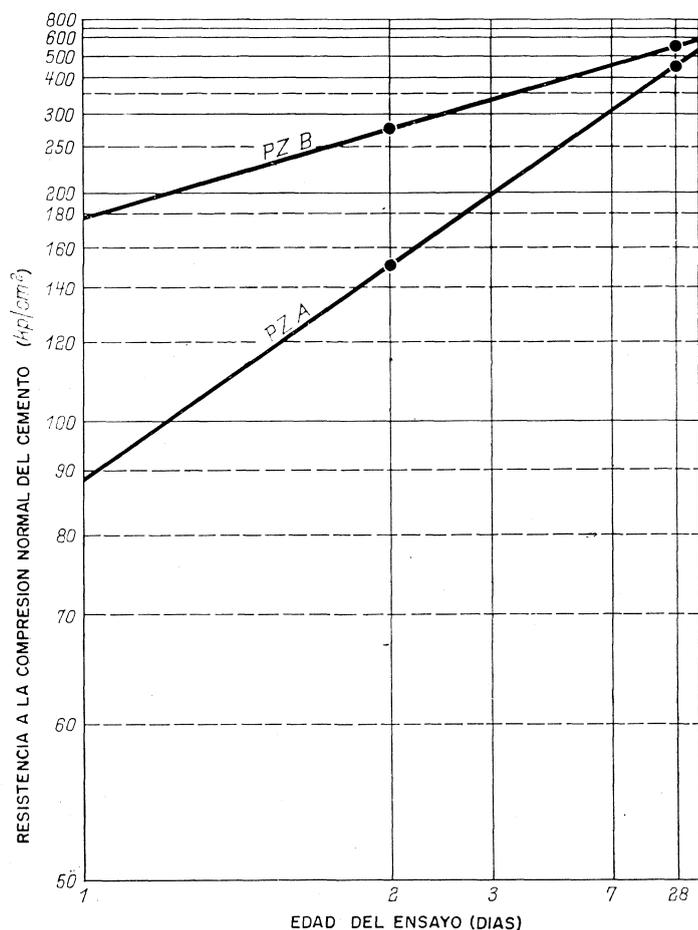


Fig. 6.—Nomograma para determinar la resistencia a la compresión del mortero de cemento en función de la edad de ensayo, según G. Sadran y R. Dellyes [6]. Partiendo de la resistencia a 2 ó 28 días, por ejemplo, se puede determinar la resistencia en otro momento, por ejemplo después de 1 ó 7 días.

Los cementos Z 350 y Z 450, que constituyen más del 95 % de la producción presentan, con la misma resistencia de 28 días, diferentes resistencias iniciales de acuerdo con la distinta composición de los mismos (comparar la figura 5). Estos dos tipos de resistencia se han subdividido en cementos de endurecimiento inicial más lento (característica adicional L) y cementos de resistencia inicial más elevada (característica adicional F). En relación con el tipo Z 250, en la que prácticamente se fabrican sólo cementos de endurecimiento inicial más lento, y en relación con el tipo Z 550 de resistencia inicial especialmente más elevada no pareció necesaria una subdivisión L y F.

TABLA 4

Tipos de resistencia del cemento según DIN 1164 (edición junio 1970)

Tipo de resistencia	Resistencia a la compresión en $\text{kp/cm}^2$ después de			
	2 días mínimo	7 días mínimo	28 días	
			mínimo	máximo
250 *)	—	100	250	450
350	L	—	350	550
	F	100	—	—
450	L	100	450	650
	F	200	—	—
550	300	—	550	—

\*) Sólo para cemento con reducido calor de hidratación y/o elevada resistencia a los sulfatos.

La tabla 4 contiene los tipos de resistencia establecidos en la nueva norma alemana de cemento DIN 1164 (1970) con las exigencias esenciales para ellas.

El nivel de resistencia de estos tipos se encuentra, aproximadamente, de un 5 a un 20 % por encima de las exigencias de la mayor parte de las demás normas del cemento; esto se aplica a la resistencia de 28 días y de modo especial, no obstante, a la resistencia inicial del Z 450 F y del Z 550. Para poder cumplir con seguridad las resistencias mínimas requeridas de 200 kp/cm<sup>2</sup> ó 300 kp/cm<sup>2</sup> después de 2 días, es necesaria, por encima de estos valores, una predicción de unos 40 hasta 50 kp/cm<sup>2</sup>.

Las experiencias tenidas hasta ahora muestran, sin embargo, que estas exigencias en el estado actual de la fabricación del cemento se pueden cumplir, aun cuando crean elevados gastos de fabricación.

## **7. ESTABILIDAD DE VOLUMEN**

La pasta de cemento no solamente deberá endurecer tras el proceso de amasado, sino que también habrá de mantenerse duro y de volumen constante. El ensayo de la estabilidad de volumen comporta ya de por sí problemas, ya que la estabilidad tendrá que estar garantizada de modo continuo y efectivo, en tanto que el examen o comprobación de la misma se extiende, en rigor, a unos cuantos días, de suerte que se trata siempre de un método o procedimiento rápido de ensayo o verificación. Incluso en aquellos procedimientos rápidos de ensayo, que facilitan una graduación escalonada, ocurre con frecuencia que la relación de los resultados obtenidos y el comportamiento a largo plazo en condiciones prácticas no queda directamente expresada y que, igualmente por razones de tiempo, raramente ha sido objeto de una investigación sistemática. Por consiguiente, en numerosos casos, se establecen requisitos o normas, basadas en procesos rápidos de ensayo, que han de ofrecer determinadas garantías, es decir, que deben ser extraordinariamente severas.

La estabilidad de la pasta de cemento puede depender de la composición del mismo así como de la acción de elementos o influencias exteriores. Entre las causas dependientes del mismo cemento se cuentan, en primer término, el exceso de un determinado contenido de cal libre o de óxido magnésico libre en el clínker de cemento portland, o un exceso de sulfato en el cemento. Las causas exteriores son los agentes físicos o químicos externos. En todos los procedimientos rápidos de ensayo de la estabilidad de volumen por lo que a cal libre y en parte a la magnesia se refiere, está previsto un envejecimiento mediante tratamiento térmico, por ejemplo exposición al vapor, o endurecimiento en autoclave. A tal fin se utilizan actualmente en las normas tres procesos de ensayo: el ensayo de cocción, el ensayo de Le-Chatelier y el ensayo en autoclave.

### **7.1. Ensayo de cocción**

En este procedimiento de ensayo se coloca una torta de pasta de cemento (relación agua/cemento, como en el ensayo de fraguado entre 0,23 y 0,30) encima de una placa de vidrio, y tras 24 horas de endurecimiento se introduce en ambiente de atmósfera saturada de humedad en una vasija o recipiente lleno de agua, que se pone en ebullición al cabo de 1/4 de hora. La torta deberá tener en el centro un espesor de 1,0 a 1,5 centímetros y su diámetro será aproximadamente de 10 centímetros. Una vez terminada la cocción, la torta habrá de mostrar aristas vivas y estar exentas de grietas o fisuras, y no podrá haberse alabeado excesivamente. En la nueva norma alemana para el cemento DIN 1164, edición de junio de 1970, se estableció por vez primera lo que se entiende por "considerablemente" alabeado, es decir una pérdida de la planitud de la torta superior a los 2 milímetros.

De las normas para cemento de 44 países, citadas bajo (4), 18 consideran el ensayo de cocción como el único ensayo o como uno más entre los numerosos para establecer la estabilidad de volumen de los cementos. No obstante, el tiempo de cocción prescrito es muy variable; se encuentra entre la 1/2 hora y las 6 horas, aunque, por lo general, es de 2 a 3 horas. Una cocción más larga confiere, ciertamente, una mayor efectividad; sin embargo, una cocción que sobrepase las 2 a 3 horas, con una apreciación simplemente ocular, apenas puede ofrecer una verdadera garantía acerca del resultado del ensayo. En Alemania está prevista y prescrita una duración de cocción de 2 horas, tanto en las anteriores normas como en la actual.

El ensayo de cocción constituye un ensayo de sí o de no; limita, en primer término, el contenido de cal libre viva a una cantidad inocua para casi la totalidad de los casos de aplicación. Si el cemento se encuentra aún muy fresco recién molido, el procedimiento de ensayo puede ser exageradamente apto, es decir que, aún en el caso de que el ensayo no haya dado un resultado plenamente satisfactorio, el cemento es, sin embargo, adecuado para hormigón de endurecimiento normal. Por esta razón, la mayor parte de las normas para el cemento, tienen previsto que, en caso de obtenerse un diagnóstico negativo del ensayo, el cemento puede extenderse al aire durante 3 a 7 días, y repetir el ensayo; el segundo ensayo es el decisivo.

Los hormigones tratados térmicamente o endurecidos al vapor, con mezclas ricas en cementos, muy secas y fuertemente amasadas, resultan mucho más sensibles durante el tratamiento, por cuanto se refiere a cualquier clase de influencia sobre estabilidad de volumen, que los hormigones de fraguado normal. En tales casos puede ocurrir que la eficacia del ensayo de cocción resulte insuficiente al coincidir raramente varias influencias desfavorables. Por esta razón, en algunos países las normas para el cemento contienen ensayos adicionales más severos, las cuales, no obstante, han de ser convenidas suplementariamente, o se establece la norma del requisito de "Cemento especial para tratamiento térmico".

Teniendo en cuenta la eficacia de este ensayo de "sí o de no", su sencillez y bajo costo, la posibilidad de reproducir el ensayo de cocción resulta suficiente.

## **7.2. Ensayo de Le-Chatelier**

Este ensayo que lleva el nombre del célebre químico francés consiste, en principio, en el ensayo de cocción, con la diferencia que la adición de agua en la pasta de cemento es algo inferior, y que el sencillo dispositivo de ensayo (manguito provisto de dos agujas de 16,5 centímetros) permite medir la dilatación de un cilindro de 30 milímetros de diámetro, en milímetros. Por consiguiente, en este ensayo se obtienen valores numéricos, evitándose la inseguridad que pueda arrojar una estimación "a ojo". Las mediciones resultan, de este modo, ciertamente inequívocas; sin embargo, la eficacia y precisión del procedimiento de ensayo no mejora con ello, porque se ignora la relación entre los valores numéricos obtenidos y la resistencia del hormigón en las más diversas circunstancias, y posiblemente ni tan siquiera guarda la suficiente correlación. Esto se desprende igualmente de las comprobaciones basadas en la experiencia práctica por cuanto a la dilatación admisible se refiere, en las normas para cementos de aquellos países, en los que el ensayo de Le-Chatelier es preceptivo para la determinación de la estabilidad de volumen (más de la mitad de los países utiliza este tipo de ensayo).

De modo similar a como ocurre con el ensayo de cocción, la duración prescrita para el ensayo oscila entre 1 y 7 horas; en la mayoría de los casos 3 horas. En algunos países debe aumentarse la duración del tratamiento cuando el contenido de MgO sobrepasa un 3 %. La estimación de los valores numéricos en los diferentes países viene expresado por la dilatación máxima admitida, comprendida entre 3 y 10 mm; en la mayoría de los casos, 10 mm, tras una duración de cocción de 1 a 6 horas. Dos países prescriben, para diferentes clases o tipo de cemento con una duración de cocción idéntica, distintos valores máximos. Al igual que ocurre con el ensayo de cocción, en la mayor parte de los países puede repetirse el ensayo de Le-Chatelier con el cemento expuesto durante 7 días a la atmósfera, cuando el ensayo no ha dado los frutos apetecidos en el primer ensayo. Si en el primer ensayo se ha obtenido una dilatación relativamente elevada (10 mm), pueden alcanzarse en su repetición, al cabo de los 7 días de haber estado el cemento expuesto al aire, frecuentemente, sólo 5 mm.

En cuanto se refiere a precisión y posibilidad de reproducción, los ensayos de cocción y de Le-Chatelier son aproximadamente idénticos. La medición objetiva de las dilataciones que se efectúan en el curso del ensayo de Le-Chatelier permite, no obstante, requisitos muy variables, como, por ejemplo, en la repetición o con cementos destinados a aplicaciones especiales. Por otra parte, es discutible, si en un procedimiento de ensayo rápido tan sencillo y simplificado como lo es la cocción de una pasta de cemento que lleva ya 1 día obtenida, la estimación mediante valores numéricos no simula una eficacia o precisión, que en realidad no existe, por lo que para una valoración por el sistema de "sí o no", o sea aproximada, parece más indicada en estos procesos rápidos.

### **7.3. Ensayo en autoclave**

En el ensayo efectuado en autoclave, que está prescrito casi unánimemente en Norte y Sudamérica, una pasta de cemento con una consistencia normalizada se vierte en moldes en forma de prisma de  $2,5 \times 2,5 \times 25$  centímetros y tras un endurecimiento de 24 horas, se coloca en un autoclave que en un plazo de aproximadamente 1 hora se eleva a unas 21 atm y  $216^{\circ}\text{C}$  endureciéndose en estas condiciones durante 3 horas. Después de un enfriamiento que se realiza en condiciones igualmente prescritas, se mide la dilatación. Mientras en los ensayos de cocción y de Le-Chatelier solamente se abarcan en su totalidad las expansiones producidas por la cal viva, en el ensayo en autoclave están comprendidas además las posibles expansiones motivadas por un contenido de MgO inadmisiblemente elevado. Tampoco en el ensayo rápido en autoclave existen las seguras relaciones obtenidas en complicados ensayos de larga duración con respecto al comportamiento del cemento en el hormigón, de modo que las exigencias impuestas por las normas no representan más que las experiencias obtenidas de modo seguro en la práctica. Las dilataciones máximas prescritas, son muy diversas en las distintas normas; se encuentran entre 0,2 y 1,0 %, en la mayoría de los casos entre 0,8 y 1,0 %.

En comparación con los ensayos de cocción y de Le-Chatelier, el ensayo en autoclave ofrece la ventaja de que abarca un contenido crítico de MgO libre en el ensayo. Si se excluye el riesgo mediante el establecimiento de un límite para el contenido de MgO (véase el apartado 7.5.), la eficacia y la posibilidad de reproducción del ensayo en autoclave no son mejores que las de los ensayos de cocción y de Le-Chatelier. La ejecución del ensayo no resulta, por otra parte, tan sencilla, y, ante todo, requiere aparatos costosos, de modo que, teniendo en cuenta todos los criterios acerca de un procedimiento de ensayo normalizado, obligatorio en todos los casos, mediante la limitación del contenido en MgO para determinadas clases de cemento, ha de darse preferencia a los ensayos de cocción

o de Le-Chatelier. Esto no excluye que el ensayo en autoclave no constituya en casos especiales un procedimiento de ensayo de interés informativo, por ejemplo, cuando, por razones de calidad de materias primas, han de producirse cementos con un elevado contenido en MgO.

#### **7.4. Ensayo de agua fría**

Tortas idénticas de cemento a las utilizadas en el ensayo de cocción se depositan en agua a una temperatura de unos 20°C durante 28 días, examinándose acto seguido de modo visual. El ensayo en agua fría es de todos los ensayos de estabilidad de volumen el más sencillo de realizar. Su eficacia es, no obstante, limitada toda vez que en estas condiciones de conservación no es posible establecer con absoluta seguridad una dilatación motivada por un elevado contenido en cal viva y sulfato. Lo mismo es aplicable a un contenido en MgO inadmisiblemente elevado. La tendencia expansiva de elevados contenidos en cal viva y en sulfato es, no obstante, perceptible, debido a su muy limitada precisión al facilitar datos, el ensayo por agua fría, que hasta ahora estaba incluido en las normas alemanas para el cemento, no ha sido aceptado en la nueva norma DIN 1164, edición de junio de 1970.

#### **7.5. Contenido en MgO (óxido de magnesio)**

La totalidad de las 44 normas mundiales reseñadas bajo (4) limitan el contenido en MgO del cemento Portland, incluidos los casos en los que las normas prescriben el ensayo en autoclave. El contenido máximo admisible de MgO está establecido de modo distinto en las normas: se encuentra entre 3 y 6 % en peso, con predominio del 5 %.

Un mayor contenido de MgO libre da lugar a expansión únicamente en el clínker de cemento portland, lo que no sucede en la arena siderúrgica. Por esta razón, en las normas de algunos países, entre ellos también Alemania, solamente está limitado el contenido de MgO en el clínker de cemento portland. En otras normas, el contenido de MgO de los cementos de horno alto puede ser superior al de los cementos portland, hasta alcanzar un 8 por ciento.

La limitación del contenido en MgO en el clínker de cemento portland en un 5 % en peso, garantiza la no expansión por este motivo. En este caso, puede omitirse, por ejemplo, el ensayo de autoclave.

#### **7.6. Contenido de sulfato**

Al moler el cemento, se le añade sulfato, generalmente en forma de piedra de yeso o anhidrita, al objeto de regular el fraguado; además, también se influye favorablemente sobre la resistencia inicial del cemento. El contenido en sulfato se expresa generalmente como  $\text{SO}_3$  en porcentaje de peso. Un contenido elevado de  $\text{SO}_3$  puede dar lugar a esponjamiento o hinchamiento (por ejemplo, cemento expansivo), y un contenido superior puede motivar una expansión destructiva por formación de ettringita. El que un contenido en  $\text{SO}_3$  pueda dar lugar a hinchamiento o expansión no sólo depende de su cuantía, sino también de la composición y de la finura de molienda del cemento, además de la composición del hormigón y de las condiciones de almacenamiento. Gran influencia tiene la temperatura de almacenamiento; por ejemplo, un almacenamiento realizado, por lo demás en idénticas circunstancias, a una temperatura de 5°C puede dar lugar a hinchamiento, cosa que puede no ocurrir a una temperatura de 20°C. Por esta razón, los ensayos realizados a una temperatura de almacenamiento de 20°C, como sucede, por ejemplo, en los ensayos con agua fría, no facilitan un criterio suficiente.

En las normas del mundo entero el contenido en  $\text{SO}_3$  queda limitado, por lo general, con un valor aplicable con seguridad a todos los cementos, del orden de 3 % en peso. Esta sencilla normalización o regulación no complace a la actual tecnología del cemento, toda vez que para algunos cementos un contenido algo más elevado de  $\text{SO}_3$  no solamente no aparece indeseable, sino, por el contrario, incluso es apetecible, teniendo en cuenta las propiedades del cemento mejoradas por esta razón. En el Instituto para la Investigación de la Industria del Cemento se ha estudiado, por lo tanto, qué propiedades especiales del cemento hacen aparecer como deseable y beneficioso un mayor contenido en  $\text{SO}_3$ . Contenidos más elevados de  $\text{SO}_3$  son adecuados cuando el cemento es molido muy fino, cuando el contenido de aluminio tricálcico es elevado y cuando el cemento presenta una elevada proporción de arena de horno alto.

De modo similar a lo que ocurre en otras normas para el cemento, la nueva norma DIN 1164, edición de junio de 1970, prevé también diferentes contenidos máximos admisibles de  $\text{SO}_3$ , situados entre 3,5 y 4,5 % en peso. El cemento portland, el cemento portland siderúrgico y el cemento puzolánico pueden tener, con una finura de molienda de hasta 4.000  $\text{cm}^2/\text{g}$  un contenido de  $\text{SO}_3$  de 3,5 %, y si la finura de molienda es mayor, 4,0 % en peso. Independientemente de la finura de molienda, el contenido de  $\text{SO}_3$  del cemento siderúrgico con un contenido de hasta 70 % de arena de horno alto, es de 4,0 % y con un contenido mayor de arena de horno alto de 4,5 %. Esta norma se refiere a las dos magnitudes de influencia más importantes, en cambio otras no; representa un compromiso fácilmente apreciable en la práctica, lo que no supone que otras normas puedan llegar a ser igualmente adecuadas. Los estudios realizados en el Instituto de Investigación para la Industria del Cemento han demostrado ciertamente que estas comprobaciones excluyen, aún en las condiciones más desfavorables, una expansión motivada por un contenido excesivamente elevado de sulfato.

## 8. FINURA DE MOLIENDA

Mediante un avanzado desmenuzamiento, es decir una molienda más fina, aumenta la superficie específica del cemento ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), que entra en contacto con el agua al ser amasado, reaccionando de forma correspondiente. Los cementos según norma DIN 1164, ofrecen, por lo general, superficies específicas entre los 2.200 y los 6.000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Los cementos más finos se hidratan, debido a su mayor superficie, con mayor rapidez y producen, especialmente en los primeros días, una mayor resistencia. La finura de molienda tiene una influencia secundaria sobre las propiedades técnico-constructivas del hormigón endurecido. Si el cemento se muele fino o grueso, esto altera o modifica evidentemente, y hasta ciertos límites, las propiedades del hormigón no armado. Los cementos gruesos (esencialmente por debajo de 2.500  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) poseen una menor capacidad de retención del agua, por lo que tienen una tendencia a la segregación o eliminación del agua (exudación); esto constituye, en ocasiones, una ventaja, por ejemplo en la construcción o fabricación de artículos de amianto cemento (uralita) o tubos de hormigón centrifugado, ofreciendo menos ventajas en los usuales hormigones para la construcción. Los cementos muy finos (esencialmente por encima de 5.000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) requieren una mayor cantidad de agua para obtener una determinada consistencia, y facilitan con bajas relaciones agua/cemento una pasta de gran fuerza adhesiva, razón por la cual, al trabajar con mezclas ricas en cemento, se elegían relaciones agua/cemento más elevadas, con lo que se pierde una parte de las ventajas o eficacia de la molienda fina (especialmente la resistencia inicial). Por el contrario, en una zona media de la finura, que se encuentra en el orden de 2.800 a 4.200

cm<sup>2</sup>/g, la influencia sobre las propiedades del hormigón fresco resulta más bien despreciable; carece de importancia, para mantener los valores perseguidos para la resistencia de 28 días, si la finura oscila en algunos cientos de cm<sup>2</sup>/g.

Antiguamente, se comprobaba la finura de molienda exclusivamente, y en la actualidad se sigue procediendo de este modo en numerosos países, por los residuos en peso en los tamices de ensayo, para cuya abertura de malla se prescribía, un valor que oscila entre 74 y 90  $\mu$ m. Sin embargo, las propiedades del cemento se determinan principalmente por la cantidad de granos de cemento por debajo de 30  $\mu$ m (0,03 milímetros). Los tamices de ensayo o comprobación, que por sí mismos serían adecuados, ofrecen, no obstante, en la aplicación o servicio continuo, considerables desventajas. Antes, cuando la distribución de los granos de los cementos era casi uniforme o parecida, teniendo en cuenta la similitud de los utilizados, los residuos que permanecían en los tamices de 90  $\mu$ m poseían aún cierta eficiencia. En las modernas instalaciones de molienda, en las que los componentes más finos quedan eliminados por separadores, ya no es suficiente este residuo para juzgar la calidad de la finura.

Por consiguiente, se han desarrollado nuevos procedimientos de ensayo, con ayuda de los cuales se pueden determinar las fracciones de grano más fino, por ejemplo mediante arrastre por aire o por sedimentación, o con ayuda de otros con los que puede medirse indirectamente la superficie específica del cemento, por ejemplo mediante mediciones de permeabilidad al aire de una capa de polvo o por absorción lumínica de una suspensión. De todos los procedimientos o métodos de ensayo de la finura de molienda (7), es posible que resulten más exactos los datos obtenidos de la superficie específica para establecer las propiedades del cemento con fines constructivos.

Conviene, no obstante, hacer la observación restrictiva de que un reducido porcentaje de componentes extraordinariamente finos —medidos sobre la base de las propiedades de técnica constructora del cemento— da lugar a un aumento desproporcionado de la superficie específica. De todos los métodos de ensayo seguidos para la determinación de la superficie específica, el procedimiento de Blaine, basado en la medición de la permeabilidad al aire, y que también ha sido incluido en la nueva norma alemana para el cemento, es el que con mayor amplitud ha sido acogida por las distintas normas. Además, algunas de las normas para la determinación de la superficie específica admiten también el método, basado en el mismo principio, de Lea y Nurse, o el método de Wagner, basado en la absorción de la luz con un turbidímetro. En la misma clase o tipo de cemento se halla con el método de Blaine aproximadamente 1,75 veces la superficie específica que con el turbidímetro de Wagner.

El que resulte necesario establecer requisitos o exigencias a la finura de molienda del cemento por razones de técnica constructiva, y cuáles han de ser estos requisitos, no es cosa que pueda fundamentarse o justificarse sin más, toda vez que el uso a que está destinado puede resultar más indicado un cemento más grueso o más fino. Por otra parte, la influencia que pueda ejercer la finura de molienda sobre el desarrollo de la resistencia se hace ya patente en el ensayo de resistencia previsto en la norma. Un 15 % de todas las normas no contienen requisitos en cuanto a la finura de molienda. En las demás normas se prescribe una finura mínima de molienda, la cual, sin embargo, se mantiene voluntariamente baja, al objeto de que cementos solicitados por los usuarios, o cementos gruesos que pueden aún utilizarse perfectamente en numerosos casos, respondan igualmente a las normas. Estos límites, como por ejemplo el residuo máximo prescrito de 15 % ó 20 % en el tamiz de 90 micras, no tienen, sin embargo, valor decisivo.

En la nueva norma alemana para cemento DIN 1164, edición de junio de 1970, se establece como límite inferior de la finura de molienda  $2.200 \text{ cm}^2/\text{g}$  (según Blaine) y para casos especiales  $2.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Además, el residuo que permanece en el tamiz de 200 micras (0,2 mm) no podrá ser superior a un 3 % en peso; de este modo queda limitada la proporción de eventuales componentes más gruesos. Las normas de otros países tienen prevista, en parte, una finura mínima de molienda similar o algo más reducida (del orden de  $2.500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) y, en casos aislados, para las distintas clases de resistencia, también finuras mínimas de molienda de diversa magnitud; sin embargo, esto no está justificado desde el punto de vista de la técnica constructiva. De todo lo antedicho se desprende que la finura de molienda constituye un importante dato característico en la fabricación del cemento, teniendo únicamente en algunos casos importancia en la técnica de la construcción.

## 9. RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Los sulfatos que penetran en el hormigón endurecido pueden dar lugar, con las fases hidratadas de la pasta de cemento, a un hinchamiento de las mismas (formación de cristales de ettringita). Aparte de las influencias técnicas sobre el hormigón, la resistencia del mismo contra el ataque de los sulfatos depende del cemento, toda vez que los cementos presentan una resistencia muy variable a este tipo de agresivos.

Existen numerosos métodos de ensayo para establecer la resistencia del cemento ante la acción de los sulfatos. En estos ensayos se colocan, en la mayoría de los casos, muestras de pasta de cemento, mortero u hormigón tras una conservación previa determinada, en soluciones sulfatadas de diferente composición y concentración. Después de distintos tiempos de almacenamiento —por lo menos semanas y, en la mayoría de los casos, durante meses— se examinan las muestras, según el método de ensayo adoptado, que puede ser muy diverso; por ejemplo apreciación visual, mediante pesada, por mediciones de dilatación, por medio de determinación de la resistencia o por mediciones con ultrasonidos.

Teniendo en cuenta que el hinchamiento provocado por los sulfatos, se produce en la práctica, al cabo de meses o de años, los ensayos antes mencionados son todos ensayos rápidos, cuyos resultados no son directamente aplicables al comportamiento a largo plazo, como ocurre con todos los ensayos de estabilidad de volumen. Sin embargo, se ha comprobado que arrojan datos cualitativos, algunos de los métodos aplicados, mediante comparación en el curso de ensayos de muchos años efectuados con el hormigón.

Amplios ensayos realizados durante un decenio por el departamento "Resistencia a los sulfatos" en la Asociación de Fábricas de Cemento de Alemania han demostrado, que estos métodos de ensayo rápidos —incluso con almacenamiento de 3 ó 4 años— muestran elevadas dispersiones. Si se recurriese a incluirlos en una norma para la valoración del cemento y para establecer requisitos, sería necesario tomar en un ensayo individual una medida de predicción, o habría de establecerse un valor medio para una valoración segura, mediante la realización de numerosos ensayos paralelos. Estas dos condiciones implican un coste inadmisibles; por otra parte, un método de ensayo que requiera 1 mes para su aplicación, que sirviese para la vigilancia continua de la calidad y que, además, estuviese basada en las condiciones de entrega establecidas por el fabricante y el consumidor, resultaría poco apropiado. Porque ha de tenerse en cuenta que una justificación o demostración de unas propiedades que concuerden con las normas tardaría un tiempo inaceptable. El primitivo propósito de incluir en la nueva norma alemana un ensayo tecnológico de la resistencia del cemento a los sulfatos, fue abandonado por estas razones.

Por otra parte, de las investigaciones y pruebas antes mencionadas, así como de la bibliografía existente, se desprende que un hormigón adecuadamente fabricado es prácticamente resistente a los sulfatos, si se utiliza cemento portland con un contenido muy reducido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), o bien un cemento de horno alto con un contenido muy elevado de arena siderúrgica. Una diferenciación o distinción de los cementos, basada en lo anteriormente citado, de acuerdo con su resistencia al ataque por sulfatos fue admitida en la nueva norma alemana para el cemento en lugar de un método tecnológico de ensayo (véase el final de este apartado).

El contenido en  $C_3A$  del cemento portland puede reducirse añadiendo a la materia prima elevadas cantidades de óxido de hierro, ya que en el curso de la fusión se forma en primer término ferroaluminato tetracálcico, disponiéndose únicamente de la parte excedente de óxido de aluminio para la formación del  $C_3A$ . Investigaciones más exhaustivas demostraron además que la resistencia a los sulfatos del cemento portland disminuye cuando el crudo contiene una gran proporción de óxido de aluminio, aún cuando, para la fabricación de un cemento pobre en  $C_3A$ , se añada una cantidad correspondiente elevada de óxido férrico. Por esta razón en la nueva norma alemana para el cemento se limitó, no solamente el contenido en  $C_3A$ , sino además el contenido de óxido de aluminio.

La resistencia a los sulfatos del cemento de horno alto no depende en forma decisiva de la composición de la arena siderúrgica. Un contenido reducido o mediano de arena siderúrgica no es capaz de mejorar notablemente la resistencia a los sulfatos de un clinker de cemento portland no resistente a la acción agresiva. Para esto es necesario un elevado contenido de arena siderúrgica, cuya magnitud depende, dentro de ciertos límites, de la naturaleza y de la composición de la arena siderúrgica y del clinker. La determinación exacta del contenido de arena siderúrgica en un cemento es difícil; ha de contarse con un error del orden de 3 a 5 %. El contenido de arena siderúrgica establecido en la nueva norma alemana para el cemento, de un mínimo de 70 % en peso, ofrece siempre la garantía, contando este error de ensayo, e independientemente de la naturaleza y composición de la arena siderúrgica y del clinker, de un cemento de horno alto de gran resistencia a los sulfatos.

De lo anteriormente expuesto se desprende que, por lo que se refiere a resistencia, no puede existir un cemento con “moderada” resistencia a los sulfatos, aunque con un moderado ataque se puede obtener también con otros cementos un hormigón relativamente resistente. Por esta razón, la nueva norma alemana establece como principal característica o propiedad únicamente un cemento de “elevada” resistencia a los sulfatos, es decir, en cuanto a requisitos o exigencias se refiere, se establece un criterio de “sí o no”. Una división tan sencilla en cementos con o sin elevado grado de resistencia a los sulfatos resulta totalmente suficiente en la práctica, si se consideran las demás determinaciones en la valoración de la agresividad de aguas y tierras previstas en DIN 4030, así como las medidas en determinados grados de agresividad según DIN 1045.

La norma DIN 4030 prevé para aguas sulfatadas tres grados de ataque en función del contenido de  $SO_4$ , a saber:

Contenido de sulfato en mg/l	200 a 600	600 a 3.000	Superior a 3.000
Grado de ataque	débil	fuerte	muy fuerte

Las medidas técnicas del hormigón correspondiente se encuentran en la norma DIN 1045, apartado 6.5.7.4. Hasta un contenido de sulfatos de 200 mg/l todo hormigón “denso” es considerado como suficientemente resistente, independientemente del cemento utilizado. Cuan-

do el contenido en sulfatos sea superior, será necesario demostrar su densidad; además, cuando se trate de aguas sulfatadas con más de 400 mg/l de  $\text{SO}_4$ , o de tierras sulfatadas con más de 3.000 mg/l de  $\text{SO}_4$ , deberá utilizarse un cemento con gran resistencia a los sulfatos. De acuerdo con la nueva norma alemana para el cemento DIN 1164, edición de junio de 1970, se consideran cementos con gran resistencia a los sulfatos:

El cemento portland con un contenido calculado de aluminato tricálcico  $\text{C}_3\text{A}$  de un máximo de 3 % en peso y con un contenido de óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 5 % en peso como máximo.

El cemento de horno alto con, por lo menos, un 70 % en peso de arena siderúrgica, y con un máximo del 30 % en peso de clínker de cemento portland.

El contenido de aluminato tricálcico se calcula o establece mediante análisis químico por la fórmula  $\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{Fe}_2\text{O}_3$  (datos en % en peso); el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se establece como diferencia descontando el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de la suma de los sesquióxidos.

## 10. CALOR DE HIDRATACION

La hidratación del cemento es un proceso exotérmico, en el que el calor es liberado tanto más rápidamente, cuanto mayor sea la resistencia inicial, y en el cual, en total, es liberado más calor, cuanto mayor sea la resistencia final. Desde luego, la relación entre el calor liberado y la suma de la resistencia varía de acuerdo con la variedad de los componentes del cemento. Referidos a composiciones medias, el aluminato tricálcico y el silicato tricálcico suministran más calor por unidad de aporte de resistencia y, por el contrario, el silicato de calcio bibásico así como la arena siderúrgica aportan menos calor.

Los cementos que con relación a su resistencia presentan un calor de hidratación bajo, y que ceden este calor de un modo comparativamente lento (o sea que se hidratan lentamente), resultan ventajosos cuando se trata de elementos o componentes de construcción voluminosos, toda vez que en ellos se producen tensiones más reducidas motivadas por calentamiento o diferencias térmicas. Por otra parte, también los cementos de rápida hidratación y elevada resistencia inicial, que eliminan una cantidad de calor comparativamente elevada durante los primeros días pueden ofrecer ventajas, por ejemplo, durante las construcciones invernales a bajas temperaturas. La demanda, frecuentemente formulada en la práctica, de cemento de gran resistencia inicial y simultáneamente reducido calor de hidratación, es irrealizable, debido al inseparable mecanismo de reacción.

Para la determinación del calor de hidratación se dispone del calorímetro de disolución con almacenamiento isoterma de las muestras, o del calorímetro adiabático, en el que la temperatura de la muestra aumenta proporcionalmente a la cantidad de calor desarrollado. También puede llevarse a cabo la determinación en un recipiente aislado, por ejemplo en recipiente de Dewar, en el que se evita el escape de calor, pero que puede conocerse por el contraste; el almacenamiento es, por consiguiente, ni puramente isotérmico ni puramente adiabático.

La conservación adiabática corresponde aproximadamente a las condiciones imperantes en el interior de componentes masivos de construcción, es decir, que un análisis realizado con el calorímetro adiabático permite fundamentalmente esperar un resultado más preciso en cuanto a esta característica constructiva. En favor de un almacenamiento isotérmico, por ejemplo a 20°C, habla el hecho de que también pueden calcularse las demás propiedades del cemento, por ejemplo el desarrollo de la resistencia. Si bien, al sopesar y considerar todos los puntos de vista, el análisis adiabático del calor de hidratación del cemento puede ofrecer ciertas ventajas por lo que se refiere a su transferencia a las propieda-

des técnicas constructivas. Estas ventajas no guardan relación alguna con los costos considerablemente superiores de un análisis realizado con el calorímetro adiabático.

Estos gastos de investigación extraordinariamente elevados son producidos por el hecho de que, en cada caso, un calorímetro de elevado coste necesario para un análisis de una muestra está ocupado durante todo el tiempo de su endurecimiento, es decir, una semana entera por lo general. En el análisis isotérmico la muestra se endurece separadamente y el análisis dura todo lo más algunas horas, de suerte que con un aparato de ensayo pueden analizarse sucesivamente numerosas muestras. Aunque el departamento dedicado al "Calor de hidratación" de la Asociación de Fábricas de Cemento Alemanas, estudió también las condiciones para el montaje y funcionamiento de un calorímetro adiabático, dando a la publicidad sus resultados (8), debido ante todo a los costes extraordinariamente elevados del calorímetro adiabático, solamente se incluyó en la nueva norma alemana para el cemento DIN 1164, hoja 8, la determinación con ayuda del calorímetro de solución como único método de ensayo.

La muestra de pasta de cemento, con una relación agua/cemento de 0,40 lacrada inmediatamente después del amasado, se almacena a una temperatura de 20°C hasta el momento del ensayo. El calor de hidratación, expresado en cal/g, se calcula por el calor de la solución del cemento anhidro, y el de una pasta de cemento endurecida durante un tiempo determinado, en una mezcla de ácido nítrico y de ácido fluorhídrico. En la tabla 5 se encuentra un cuadro sinóptico del calor de hidratación determinado en los cementos alemanes después de 1, 3, 7 y 28 días.

T A B L A 5

*Calor de hidratación de cementos alemanes, determinado como calor de disolución según DIN 1164, hoja 8, edición de junio de 1970*

Clase o tipo de resistencia del cemento	Calor de hidratación en cal/g después de días			
	1	3	7	28
Z 250, Z 350 L	15 ... 40	30 ... 60	35 ... 70	50 ... 90
Z 350 F, Z 450	30 ... 50	50 ... 80	65 ... 90	70 ... 100
Z 550	50 ... 65	70 ... 85	80 ... 90	90 ... 100

No es posible contestar sin más a la pregunta de cuál ha de ser el plazo de ensayo apropiado para una normalización de los requisitos en el cemento NW con reducido calor de hidratación; teniendo en cuenta que cuanto más voluminosos sean los componentes o elementos de construcción de hormigón, tanto más largo será el tiempo en que, en el interior, se encuentren condiciones prácticamente adiabáticas, y tanto mayor será el plazo necesario para que la temperatura en el interior del hormigón alcance su máximo. En elementos de construcción de hormigón de dimensiones medias, aproximadamente hasta 2 metros, puede ser característico el calor de hidratación determinado al cabo de 3 días con el calorímetro de solución; en cambio para elementos de construcción más voluminosos, el obtenido a los 7 días. Apoyándose en la norma USA ASTM C 150 y en la norma británica B. S. 1370, se fijó finalmente el calor de hidratación como medida determinante.

De acuerdo con la nueva norma alemana para cemento DIN 1164, edición de junio de 1970, el cemento NW con reducido calor de hidratación puede desarrollar en los 7 primeros días una cantidad de calor de 65 cal por cada gramo de cemento, como máximo. Este requisito o exigencia no es muy severo. Como puede apreciarse por la tabla 5, en parte el calor de hidratación es notablemente inferior, principalmente cuando se trata de Z 250. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que para una determinada resistencia del hormigón, y cuando se emplea cemento de una clase de resistencia inferior, se requiere

mayor cantidad de cemento que cuando se trata de un cemento correspondiente a una clase de resistencia más elevada, de modo que no solamente ha de valorarse el calor de hidratación, sino el calor de hidratación referido a la resistencia.

El deseo de garantizar de forma convincente y mediante ensayos la calidad especial del cemento ante cada consumidor, motivó hace unos 100 años el que se estableciera en Alemania la primera norma mundial para el cemento. Dado su carácter, se trataba de una norma de calidad y suministro, en la que se fijaba y establecía tanto el procedimiento de ensayo como los requisitos en ella basados. En el centro se encontraban las tres exigencias principales, que aún hoy se encuentran en vigor, es decir, que el cemento implica un tiempo de elaboración bastante largo, que endurece y que incluso bajo el agua se mantiene resistente en función del tiempo.

En el curso del desarrollo técnico y el consiguiente perfeccionamiento de las normas para el cemento, se ha ampliado su campo de aplicación. Sirve actualmente de norma para los materiales para la fabricación del cemento, y, por otra parte, tiene notablemente en cuenta los intereses constructivos en cuanto a seguridad.

Desde la primera normalización se establecieron solamente requisitos mínimos en cuanto a resistencia se refiere, que podían rebasarse a voluntad, de modo que cementos de idéntica designación, pero de distinta procedencia, podían ofrecer resistencias muy variables. Estas características propias de la marca de cemento, dificultaron la industrialización de los métodos o sistemas de construcción de hormigón. La nueva norma alemana para cemento DIN 1164, edición de junio de 1970, contribuye al desarrollo técnico en su calidad de primera norma para el cemento, por el hecho de que para las distintas clases o tipos no se establecen, como hasta ahora, simples requisitos mínimos, sino que todos los cementos que tengan la misma designación han de aspirar a lograr el mismo objetivo en cuanto a resistencia. Esto se ha conseguido por el hecho de que, adicionalmente, se han establecido en cada caso límites superiores de resistencia.

Además de un material de construcción masivo, ajustado al aspecto preponderante de la construcción, el desarrollo técnico requiere en casos aislados propiedades especiales adicionales. La nueva norma alemana para el cemento está pensada y realizada de tal modo, que permite estas propiedades especiales junto a las propiedades normalizadas. Para las dos principales propiedades especiales —elevada resistencia a los sulfatos y reducido calor de hidratación— la norma contiene comprobaciones efectivas; otras propiedades especiales, como por ejemplo el cemento blanco y/o cemento hidrófobo exigen, dentro del marco de las propiedades o características normalizadas, acuerdos adicionales correspondientes entre el fabricante y el consumidor.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] British Standard 12: 1958 (Amendments 1960 and 1962) Portland Cement (Ordinary and Rapid-Hardening). British Standards Institution, London.
- [2] ASTM C 403-70: Time of setting of concrete mixtures by penetration resistance. 1970 Annual Book of ASTM Standards, Par 10. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [3] Haegermann, G.: Prüfung der technischen Eigenschaften der Zemente. Handbuch der Werkstoffprüfung, Bd. 3, 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 356/396.
- [4] Cement Standards of the world. Herausgegeben von Cembureau, Paris. Beton-Verlag, Düsseldorf 1968.
- [5] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. Beton-Verlag, Düsseldorf 1971.
- [6] Sadran, G., und R. Dellyes: Représentation linéaire de la résistance mécanique des ciments en fonction du temps. Revue des Matériaux de Construction (1966) Nr. 606, S. 93/106.
- [7] Mahlfeinheit von zement, Richtlinien für die Bestimmung. Herausgegeben vom Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 33, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967.
- [8] Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter, Fassung Dezember 1970. Herausgegeben vom Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf. beton 20 (1970), H. 12, S. 545/549; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 179/192.