

Cementos y hormigones de hoy y de mañana^(*)

Por **CARLOS CARRIL CARVAJAL**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

La industria del cemento ha experimentado cambios notables en los últimos años, en parte debido a la repercusión en la misma de la crisis energética. Han aparecido nuevas técnicas de fabricación y nuevos cementos, lo cual ocurre asimismo en el caso de los hormigones. Al estudio y descripción de la actual situación de ambos materiales se dedica el siguiente artículo.

En el 3.^{er} Congreso Internacional de la V.O.Z. recientemente celebrado en Düsseldorf (23-27 de septiembre 1985) y en el 11.º Congreso de B.I.B.M. celebrado en Bruselas el año anterior (9-14 septiembre 1984) se ha examinado, en profundidad, el presente y el futuro de los cementos y de los hormigones.

En el primero de dichos congresos se ha estudiado el presente y el futuro de los cementos y en el segundo su aplicación en la industria de los prefabricados de hormigón y, en general, en la construcción.

En el presente artículo se analizan y comentan algunas de las más importantes ponencias y comunicaciones presentadas y discutidas en ambos congresos. Completadas con otras informaciones de diferentes procedencias y algunas experiencias personales.

La crisis energética

La revolución energética iniciada el año 1973 al dispararse los precios de los crudos de petróleo, causa principal, aunque no la única, de la crisis que actualmente afecta al mundo entero y que es una de las más profundas y prolongadas de la historia, ha trastocado, sustancialmente, las ideas, los conceptos y los valores hasta entonces establecidos.

En todas las actividades humanas se busca afanosamente el ahorro de energía como consecuencia de la elevación de su costo, tratando de encontrar en lo posible, materiales sustitutos.

Dentro de esta transformación, el hormigón

sigue presentándose como el material de construcción más importante y, a pesar del alto coste energético que exige la fabricación del cemento portland, nada hace prever un cambio en esa posición predominante.

La relación costo/resistencia, su capacidad de moldeo en la más amplia variedad de formas y volúmenes, su posibilidad de combinación con otros materiales, hacen del hormigón un material insustituible para sus actuales aplicaciones y permite prever su extensión a otras nuevas que se presentan en el horizonte con perspectivas ampliamente prometedoras.

Los contenidos energéticos de los principales materiales de construcción, tomando como unidad el del hormigón, son los siguientes:

	Por unidad de volumen	Por unidad de masa.
Hormigón	1	1
Vidrio plano	29	28
P.V.C.	27	62
Polietileno	29	67
Acero	131	40
Aluminio	190	168
Madera	0,007	0,03

La tecnología del cemento, en lo que se refiere a su fabricación, ha evolucionado en los últimos años hacia el logro de una economía, cada vez mayor, en el consumo energético. Este proceso se inició ya mucho antes del año 1973.

Las altas temperaturas necesarias en el proceso de clinkerización para conseguir la cristalización de los silicatos y su transformación en alita y belita, y la posterior molienda de clinker,

(*) - Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre de 1986.

hace que la energía consumida sea muy elevada en combustible y kilovatios/hora.

Los progresos obtenidos en la homogenización de los crudos han permitido pasar de los procesos de vía húmeda a los de vía seca, manteniendo, e incluso mejorando, las calidades e incluso la homogenización del producto.

Los intercambiadores de calor, de diferentes tipos, han permitido recuperar una buena parte de las calorías que antes se perdían en los gases a la salida del horno.

El mejor conocimiento y estudio de las composiciones de los crudos, han permitido la utilización de mezclas más fácilmente sinterizables, y más fácilmente, con la consiguiente economía de kilovatios/hora.

La precalcinación ha sido un nuevo proceso que permite reducir gastos de primer establecimiento y también, aunque en menor grado, una reducción en el consumo energético.

Con todo ello, la reducción en el consumo de calorías ha sido constante a lo largo de los años, como puede verse en el gráfico de la figura 1.

Se ha conseguido también una importante reducción de energía consumida con la fabricación y empleo de cementos de adición, obtenidos por la molturación conjunta de clinker y adiciones activas tales como puzolanas, cenizas volantes y escorias de altos hornos.

En este momento, y con mayor necesidad

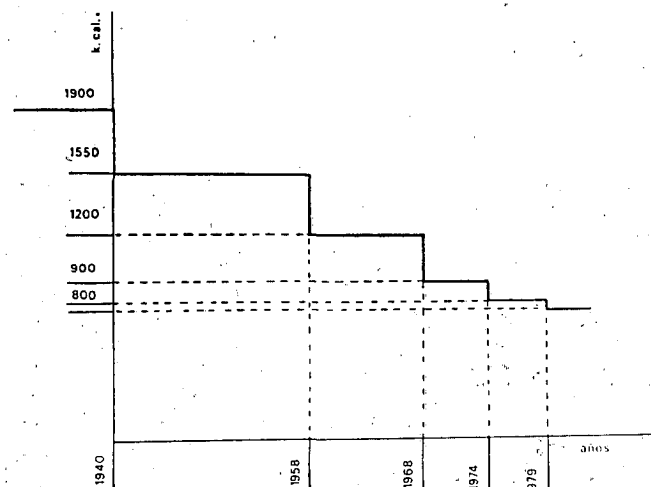


Figura 1. — Consumo de Kcal para producir 1 t de cemento en la fábrica de Gargenville.

que nunca, la investigación se orienta hacia nuevas reducciones en el consumo de energía.

Los programas de investigación actualmente en marcha, y de los cuales tenemos conocimiento (eso no quiere decir que no existan otros), se orientan en cinco sentidos diferentes:

- Composición del crudo para conseguir la clinkerización a más bajas temperaturas.
- Recuperación del calor que todavía se pierde.
- Combustibles alternativos.
- Nuevas adiciones.
- Nuevos sistemas de molienda.

Crudo

La prehomogenización de las primeras materias constitutivas del crudo antes de la molienda, las modernas básculas electrónicas de dosificación y la homogenización de la harina antes de su entrada en el horno permiten una regularidad y uniformidad en su composición química y mineralógica que han tenido una muy importante repercusión en la uniformidad de la calidad del cemento con una apreciable reducción en la dispersión de los resultados obtenidos. Todo ello ha permitido transformar instalaciones de vía húmeda a vía seca con una apreciable reducción en el consumo de energía al ahorrarse la consumida en la eliminación del agua de la pasta.

El aprovechamiento de los gases de salida del horno para el secado del crudo, representa, también, una economía apreciable de energía.

Las nuevas investigaciones se dirigen ahora hacia la obtención de crudos clinkerizables a más baja temperatura, actuando sobre su composición química y mineralógica.

Uno de los caminos para conseguir ese objetivo es la obtención de un clinker a base de silicato bicálcico. Con ello se han obtenido economías del orden del 17 por 100 en el consumo de calorías respecto al clinker normal.

La mineralización por cloro ha sido objeto de importantes investigaciones principalmente por los laboratorios que han conseguido fabricar, a escala industrial, un producto con cualidades hidráulicas similares al C_2S a muy baja tempera-

tura de clinkerización existiendo ya referencias de importantes obras realizadas con este tipo de cemento.

Molienda de crudo

Los molinos verticales están dando muy buen resultado en la molienda de crudo con un importante ahorro de energía eléctrica en relación con el molino clásico de bolas.

Cocción

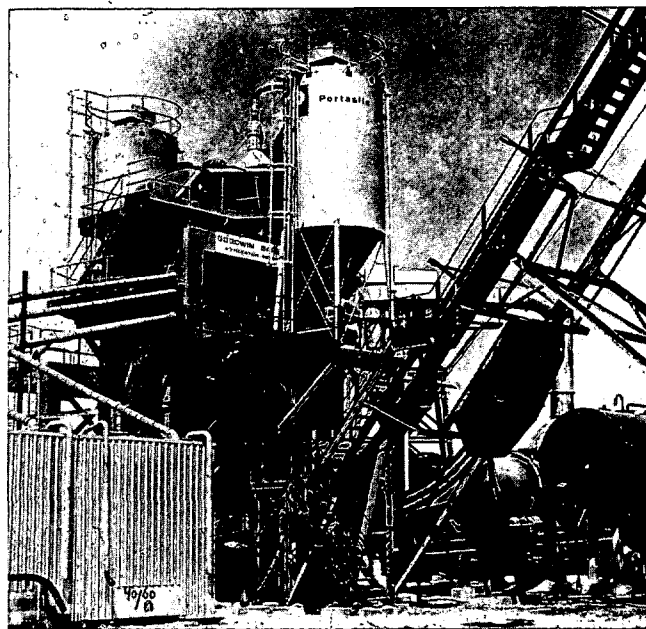
Los intercambios de calor primero y la precalcinación más recientemente, han presentado, también, una apreciable economía de calorías.

La calidad del clinker obtenido depende no solamente de la composición química y mineralógica del crudo sino también del proceso de cocción y muy especialmente de la proporción de la fase líquida y de su viscosidad así como de su contenido en sulfatos y en álcalis. De la proporción de fase líquida y su composición depende la formación y dimensión de los cristales de silicato tricálcico y la velocidad de difusión y concentración de iones en cuyo proceso intervienen componentes secundarios tales como la magnesia, los álcalis y, sobre todo, los sulfatos. Los sulfatos provienen, en buena parte, del combustible empleado, lo que ha tenido que tenerse presente al pasar muchas fábricas a emplear carbón en vez de fuel-oil.

A pesar de todas las mejoras introducidas, todavía se pierden, en el horno, muchas calorías no utilizadas, en parte, por radiación. En las instalaciones que siguen funcionando con fuel-oil puede aprovecharse dicho calor, en parte, para precalentar dicho combustible.

Molienda de clinker

Es cierto que la mayor parte de la energía necesaria para la fabricación del cemento se consume en el horno cuyo rendimiento energético es del orden del 60 por 100 o, incluso, algo mayor, si se tiene en cuenta el calor recuperado para el secado del crudo. Por esa razón la mayor parte de la investigación encaminada hacia una economía de energía se ha orientado a reducir las calorías consumidas en la cocción. Pe-



ro no es menos cierto que también se consume una apreciable cantidad en la molienda de clinker en donde el rendimiento, en un molino clásico de bolas, es sólo del 1 por 100.

Actualmente se está investigando mucho para tratar de mejorar el rendimiento de la molienda de clinker. En el congreso de Düsseldorf se han prestado 12 comunicaciones sobre este tema. El estado actual de la investigación es el siguiente:

Los molinos verticales, que tan buen resultado están dando para la molienda de crudo, no han dado, hasta ahora, un resultado satisfactorio, o, por lo menos, definitivo, en la molienda de clinker.

Parace ser que la dificultad está en que la granulometría obtenida con dichos molinos es muy uniforme y es preciso moler más fino que con los molinos de bolas para obtener las mismas resistencias.

Esta explicación, que dan todos los investigadores, no nos convence mucho, pues es generalmente admitido que, en un cemento normal, solamente los tamaños intermedios resultan activos en los procesos de fraguado y endurecimiento, pues ni los tamaños grandes ni los muy finos intervienen en el proceso.

Es de esperar que los fabricantes de molinos verticales lleguen a conseguir máquinas adecuadas al fin perseguido.

Otra posibilidad de economizar energía es la premolienda. Existen ya en el mercado molinos de rodillos que reducen el clinker a dimensiones tales que luego es preciso sólo una molienda de refinado en molino de bolas.

Se hacen también ensayos en molinos de proyección.

Se han hecho también, progresos en la calidad y ahorro de energía con nuevos separadores.

En la figura 2 se representa el esquema de un moderno separador en el que la corriente de aire ascendente, que arrastra la parte de finos, se

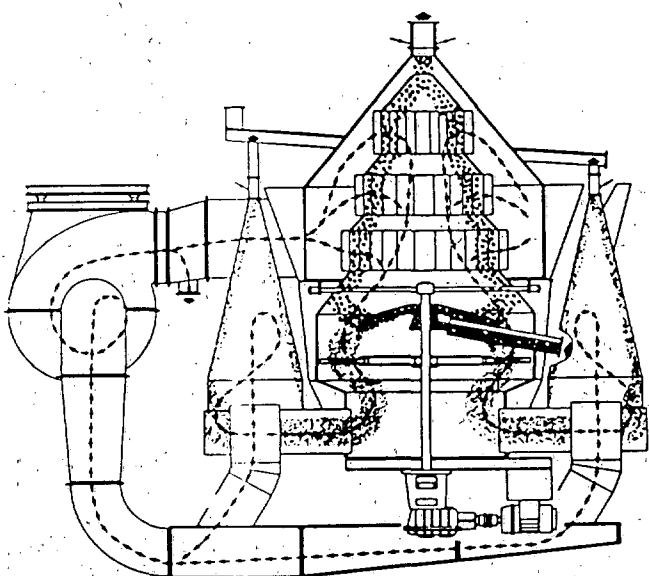


Figura 2. — Separador con multiciclones.

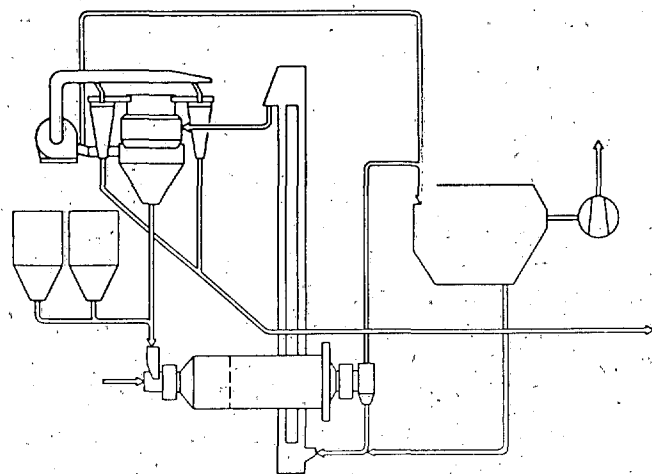


Figura 3. — Esquema de molienda.

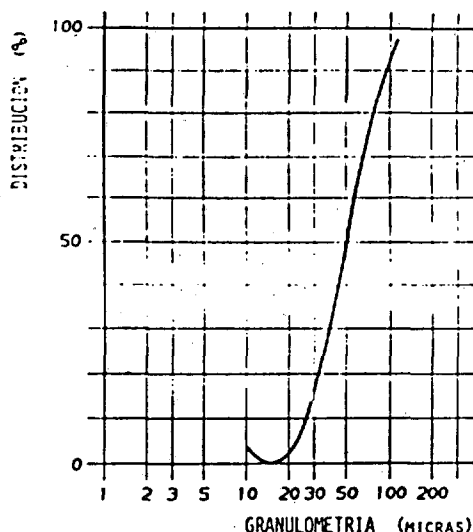


Figura 4. — Granulometría.

hace pasar por 4 ciclones antes de su salida definitiva.

El esquema de la molienda, con estos separadores, es el que se indica en la figura 3.

Con estos separadores se consigue una granulometría interna del cemento del tipo de la indicada en la figura 4.

Lo que permite moler menos fino para igual resistencia y la economía de energía obtenida varía entre 11 y el 28 por 100.

Calidad final del cemento

Los perfeccionamientos introducidos en su proceso de fabricación, a que nos hemos referido, y un mejor conocimiento de dicho proceso en todas sus fases, permiten hoy, disponer de cementos normales de gran calidad y muy uniformes en sus cualidades. Permiten, además, disponer de cementos especiales dedicados a fines concretos.

En la figura 5 se representan las velocidades de hidratación de los componentes principales del clinker.

Actuando sobre la proporción de cada uno de dichos componentes, puede actuarse sobre las propiedades del cemento resultante de la molienda de dicho clinker con la proporción adecuada de yeso. Como es bien sabido, las resistencias iniciales dependen fundamentalmente del silicato tricálcico (alita), con un contenido

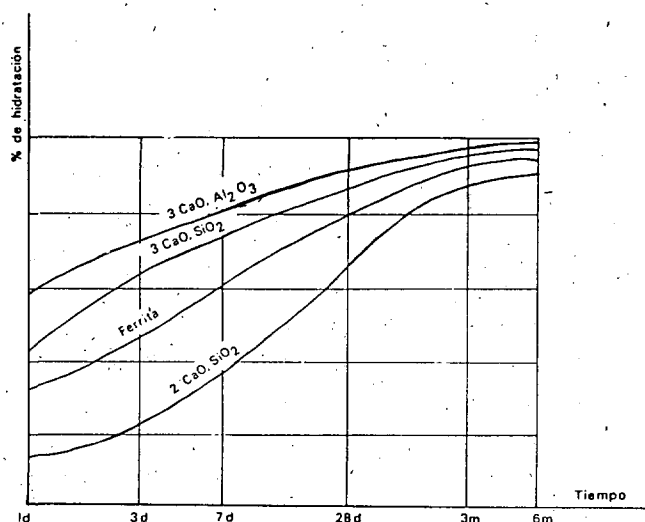


Figura 5. — Velocidades de hidratación de los 4 componentes principales de clinker.

del 45 al 72 por 100 y del aluminato tricálcico, con un contenido del 0 al 15 por 100.

A este respecto es interesante señalar en que forma ha influido los pliegos de condiciones para la recepción de cementos en la calidad de los mismos.

En todos los pliegos de condiciones se ha admitido, de una forma general, como una medida (aunque no la única) de la calidad, la resistencia a los 28 días.

Ello llevó a los fabricantes a producir cementos con las mayores resistencias iniciales aún a costa de las resistencias finales. En la figura 6 se han representado las resistencias a compresión,

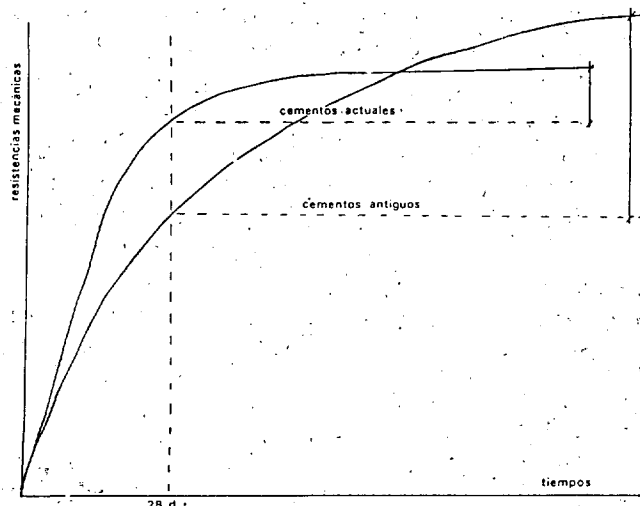


Figura 6. — Evolución de las resistencias en los cementos actuales y en los antiguos.

en el tiempo, de un cemento o de un hormigón «de ayer», con un cemento «de hoy». Se ve en dicha curva que la «reserva de resistencia» era mucho mayor antes que ahora.

Con ello los pliegos de condiciones han tenido el efecto de reducir el coeficiente de seguridad efectivo de las obras. Afortunadamente, como diremos más adelante, hoy pueden fabricarse cementos de altas resistencias iniciales sin merma de su resistencia final.

Verdad es que, en prefabricación, la velocidad de fraguado y endurecimiento, y las resistencias iniciales son muy importantes pues ello permite una rotación más acelerada de los moldes.

Actualmente, y gracias a un mejor conocimiento del papel que juegan los aluminatos en el fraguado del cemento, se pueden conseguir cementos de altas resistencias iniciales sin merma de sus resistencias finales.

Los aluminatos se hidratan antes que los otros componentes formando una trama de fibras de estringita.

La cinética de esta hidratación depende de su forma mineralógica, cúbica u ortorrómbica así como de la solubilidad de los sulfatos y de la reactividad de los carbonatos presentes. Controlando adecuadamente la cantidad y solubilidad de los sulfatos pueden obtenerse cementos que cumplan la doble cualidad de fraguado rápido y resistencias finales altas, cualidades que durante algún tiempo parecían antagónicas.

Cementos de adición

Las adiciones activas (escorias de alto horno, puzolanas, cenizas volantes) han jugado un papel muy importante, y seguirán jugándolo en el futuro, en la economía de energía y en la obtención de cementos especiales adecuados a determinadas aplicaciones.

Hormigón

Conseguidos cementos de alta calidad gracias a los avances logrados en su fabricación, es preciso utilizarlos correctamente en los hormigones para poder sacar partido de dichas calidades. En ese sentido la investigación se orienta en la

mejora de las siguientes calidades.

- Trabajabilidad.
- Fraguado y endurecimiento.
- Resistencias iniciales y finales.
- Durabilidad.

Trabajabilidad

La trabajabilidad del hormigón es una cualidad importante para su utilización. Una mayor o menor trabajabilidad permite la puesta en obra, el llenado de los moldes y encofrados, con menor o mayor esfuerzo. Y esa trabajabilidad debe conseguirse con el mínimo de agua para conseguir el máximo de resistencia.

No disponemos hoy de un ensayo satisfactorio que mida la trabajabilidad del hormigón. La fluidez bajo vibración es difícil de medir.

Es necesario buscar y encontrar un ensayo adecuado que nos de una medida.

La trabajabilidad del hormigón depende mucho de cualidades reológicas de la pasta de cemento, pero tampoco sabemos mucho, en que medida.

Acciones internas de origen eléctrico pueden ponerse en juego de forma que provoquen una repulsión de las partículas que así pueden conservar su movilidad. Algunos fluidificantes basan su acción en este principio confiriendo a los granos una fuerte carga negativa.

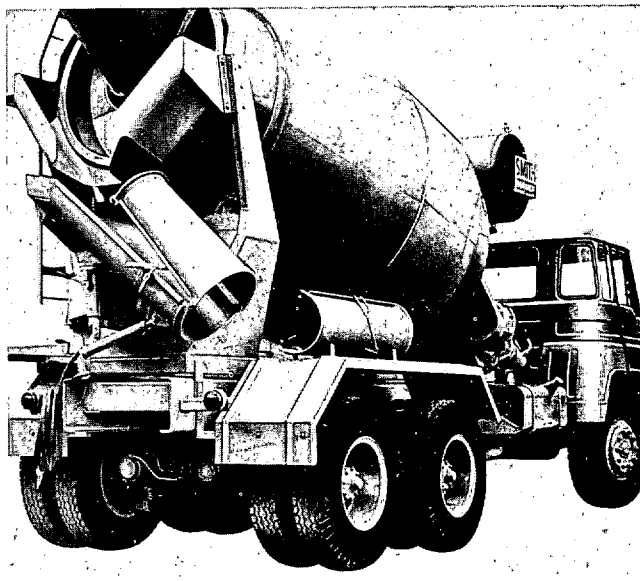
La naturaleza y forma de los áridos tiene, también gran influencia en la trabajabilidad.

Áridos

Nada nuevo podemos decir en lo que se refiere a la calidad y dimensiones de los áridos a emplear en la confección del hormigón aunque si queremos llamar la atención en la importancia que tienen tanto en su composición mineralógica como en su forma y estructura.

Aparte de los áridos artificiales, que no entran dentro de este estudio, los áridos naturales son, en general los que existen en las proximidades de las obras o de los talleres de prefabricación y lo único que, en general podemos hacer, es estudiarlos en cada caso y emplearlos de la forma más adecuada posible.

Hubo un tiempo en que estuvieron muy de



moda las granulometrías discontinuas. Hoy parece generalmente admitida la posibilidad de obtener buenos hormigones tanto con granulometrías continuas como discontinuas y dependerá fundamentalmente de las disponibilidades locales el adoptar una u otra.

Se trata en definitiva de obtener una masa de áridos con el menor volumen de huecos posible y la menor superficie específica posible, pues ese volumen de huecos es el que tenemos que rellenar con la pasta de cemento y esa superficie es la que tenemos que revestir también con la pasta de cemento. Cuanto menor sean ambos menor será la cantidad de cemento necesaria para obtener una determinada resistencia.

En este sentido es preciso tener en cuenta lo que ya dejamos dicho de que del cemento empleado solamente una parte toma parte activa como ligante. Los granos muy finos y los muy gruesos actúan como un árido. Eso quiere decir que el día que consigamos cementos con una granulometría tal que todo él sea activo, posiblemente, para conseguir la compacidad óptima será preciso añadir al hormigón un árido fino que reemplace al cemento en la misión de relleno que hoy cumple.

Compactación

Lleno el molde o encofrado con el hormigón es preciso conseguir, antes de su fraguado, un sólido lo más compacto posible.

La mayor o menor facilidad para conseguirlo

depende, como ya hemos dicho, de la trabajabilidad del hormigón.

Aparte de la centrifugación, empleada con éxito en determinados prefabricados, el sistema más comúnmente empleado para compactar el hormigón sigue siendo una acción combinada de vibración y compresión.

El mecanismo de la vibración actúa aplicando a cada partícula de la masa diferentes aceleraciones, disminuyendo con ello el rozamiento entre ellas y destruyendo los obstáculos geométricos que impiden su asentamiento, favoreciendo su acoplamiento en un volumen más reducido, si se aplica a la masa una fuerza exterior. Normalmente esa fuerza es la gravedad.

La vibración en realidad, y por ella misma, no produce una compactación, es decir, una reducción de volumen, sino por el contrario, una expansión.

Piénsese en un cubo de cristal en cuyo interior existan unas bolas de ping-pong. Al someterlo a vibración esas bolas se pondrán en movimiento, ocupando un volumen superior al que ocupaban inicialmente.

Deben, pues, existir dos acciones simultáneas para producir, por este procedimiento, la compactación del hormigón: la vibración y una fuerza externa que, normalmente es la gravedad. Pero la gravedad tiene un límite bien claro y definido y ese límite pone también un límite a la vibración.

Con una vibración sinusoidal, como normalmente se obtiene con los vibradores más generalmente utilizados de los existentes en el mercado, las aceleraciones diferenciales entre partículas adyacentes son función de la frecuencia. Para movilizar pequeñas partículas se requieren altas frecuencias. En la práctica, con los vibradores hoy utilizados, no es posible movilizar partículas inferiores a la arena gruesa de los áridos.

Empiezan a existir ya en el mercado vibradores electromagnéticos e hidráulicos con los cuales se puede crear una curva de vibración mejor adaptada y en la cual las aceleraciones diferenciales son independientes de la frecuencia. Es admisible que, con tales vibradores, pue-

dan compactarse partículas del tamaño de los granos de cemento.

Si en lugar de la gravedad, aplicamos a la masa, simultáneamente con la vibración, una presión externa, la vibración que puede aplicarse es mucho más intensa y con ello la compactación obtenida mucho más eficaz.

La presión necesaria es más bien pequeña, del orden de pocos Kg/cm² y el resultado obtenido muy satisfactorio.

Este método es perfectamente aplicable en prefabricación y lo es menos a pie de obra.

Experimentalmente se han conseguido elevadas resistencias, compactando en seco el hormigón en su molde, aplicándole el vacío y luego inyectando el agua necesaria para la hidratación y fraguado. Pero este sistema presenta dificultades mucho mayores para su aplicación práctica.

En el Symposium celebrado en Utrecht en septiembre de 1973, Komlos y Kruml aportaron sus experiencias de laboratorio en las cuales habían logrado resistencias de 3.200 kg/cm² a los 28 días en probetas de pasta pura de cemento, comprimidas a 7.000 kg/cm² durante 1 ho-

ra con una relación $\frac{A}{C}$: 0,21, y en probetas de hormigón 0/8 mm dosificados a 540 kg/m³ y relación $\frac{A}{C}$: 0,35 comprimido a 30 kg/cm², y tratados a 70° C. resistencias de 1.150 kg/cm².

Joisel ha dado la curva (figura 7) en la que se recogen los resultados obtenidos en el CE-RILH, en el año 1970.

El otro sistema para obtener hormigones de muy altas resistencias consiste, en emplear áridos capaces de crear una mejor unión con la pasta de cemento.

Es un hecho conocido que existen algunos áridos, ciertas calizas y ciertos granitos, que son capaces de reaccionar superficialmente con la pasta de cemento, desarrollando una unión más fuerte y una cohesión más íntima en el interior de la masa. Este efecto puede desarrollarse notablemente utilizando como áridos clínker de cemento, previamente vitrificado y machacado. Por este sistema pueden obtenerse hormigones con resistencias superiores a 1.000 kg/cm².

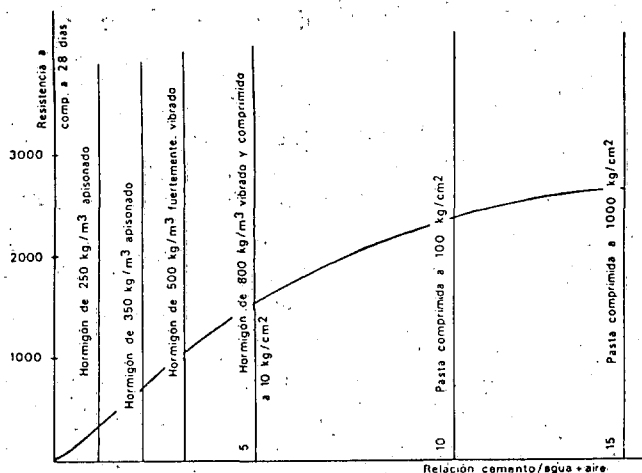


Figura 7. — Influencia de la dosificación y de la compactación en la resistencia.

Si en lugar de emplear como áridos solamente clinker vitrificado, empleamos dicho producto sólo como arena y empleamos áridos normales para el resto, los resultados obtenidos son del orden al 10 por 100 inferiores.

Frugado y endurecimiento rápido

Al tratar de la composición de los crudos y de la clinkerización hemos visto la posibilidad de obtener hoy, cementos de altas resistencias iniciales sin merma de sus resistencias finales.

En prefabricación siguen siendo el curado a vapor el método más generalmente empleado para el endurecimiento acelerado del hormigón y la rápida recirculación de los moldes.

En la figura 8 damos una marcha tipo del proceso de curado empleado satisfactoriamente en la fabricación de tubería de hormigón pretensado.

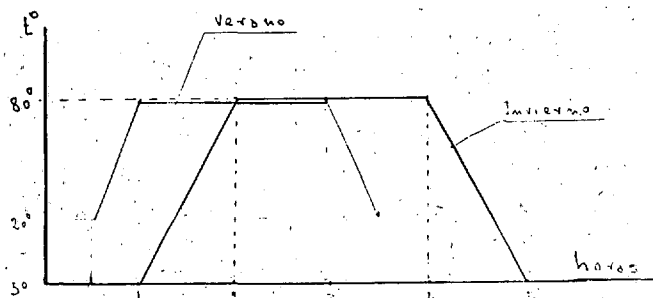


Figura 8. — Curado a vapor.

Resistencias iniciales y finales

Las resistencias iniciales y finales dependen muy fundamentalmente de la calidad del cemento, de la dosificación, de la naturaleza y adecuada granulometría de los áridos, de la cantidad de agua, de la forma de puesta en obra y compactación y del tratamiento durante el proceso de fraguado y endurecimiento.

Deberá, pues, tenerse en cuenta cuanto hemos dejado dicho sobre dichas cuestiones.

Durabilidad

Las propiedades obtenidas después del fraguado deben mantenerse en el tiempo frente a las agresiones exteriores a que va a ser sometido el hormigón. Agresiones mecánicas, choque y fatiga. Agresiones físicas, hielo, choque térmico. Agresiones químicas.

De una manera general podemos decir que, un hormigón será tanto más resistente a dichas agresiones cuanto más compacto sea, de forma que las intrusiones exteriores y la circulación interior de agua sean tanto más difíciles.

Aparte de esto hoy disponemos de cementos especiales resistentes a determinadas acciones químicas tal es, por ejemplo, el cemento resistente a los sulfatos.

Cementos expansivos

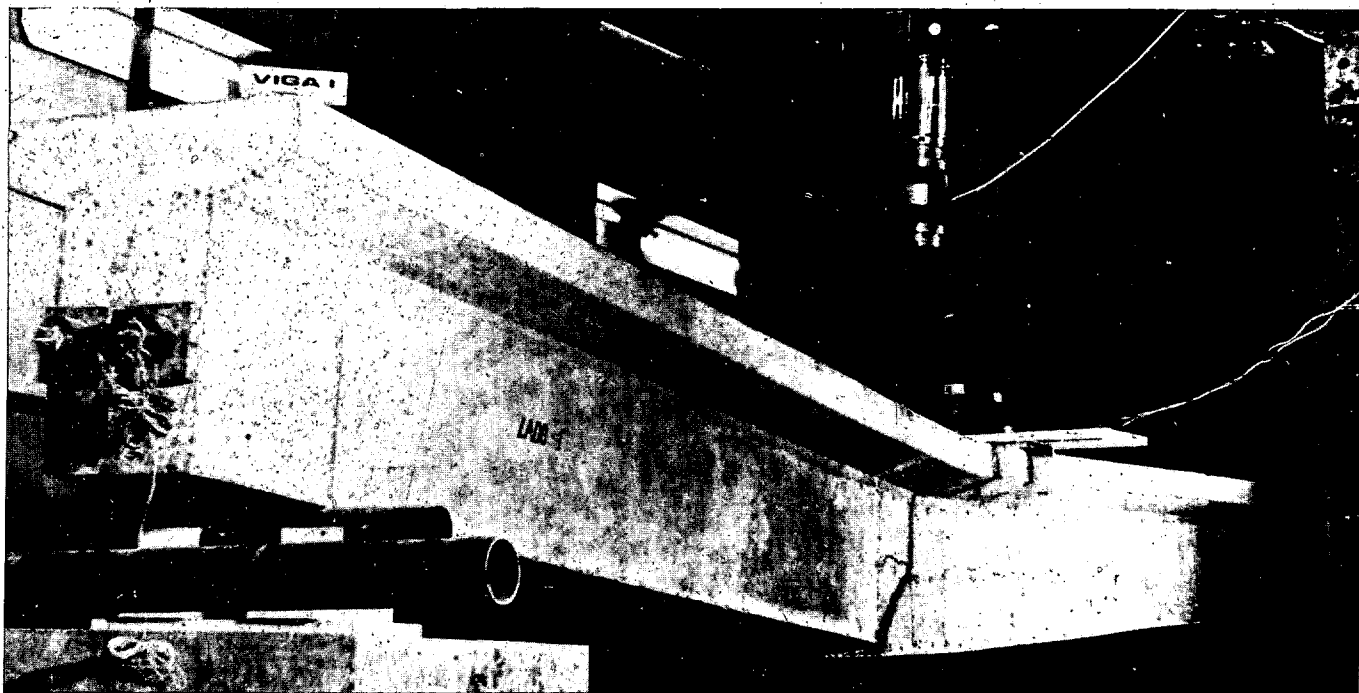
Ni en el Congreso de Düsseldorf ni el de Bruselas se dijo nada de los cementos expansivos. Sin embargo en el último congreso de química del cemento celebrado en Moscú, este tema se trató con mucha extensión.

Los primeros estudios conocidos sobre cementos expansivos fueron hechos en Francia en los años 30 por Henry Lossier y las primeras aplicaciones industriales, de que tenemos conocimiento, lo fueron en Rusia el año 1948.

Los cementos expansivos pueden tener interesantes aplicaciones una de las cuales puede ser el hormigón pretensado.

En los Estados Unidos, Japón y Rusia se fabrican, y pueden encontrarse en el mercado, estos cementos que son utilizados en forma creciente.

De acuerdo con el uso a que van destinados



existen dos clases de cementos expansivos: cementos sin retracción de fraguado y cementos autotensionales.

Los cementos sin retracción de fraguado son capaces de producir una expansión comprendida entre 0,03 y 0,10 por 100 y la compresión producida es del orden de los 2 a 7 kgs/cm².

Los cementos autotensionales son capaces de producir una expansión del orden de 0,25 por 100 y una compresión interna del orden de los 7 Kg/cm².

Aunque existen otras reacciones que producen la expansión del hormigón, las que actualmente se utilizan, según nuestros conocimientos, son dos:

- Hidratación del Ca O con formación de Ca (HO)₂.
- Formación de sulfoaluminato cálcico hidratado.

Esto puede conseguirse por tres procedimientos distintos:

- En la fase inicial del proceso de fabricación del cemento actuando sobre la composición del crudo.
- En la fase intermedia moliendo simultáneamente 2 clases de clinker.
- En la fase final mediante aditivos al preparar el hormigón.

En los EE.UU. y en Rusia se usa principalmente el 2.º procedimiento y en Japón el 3.º.

Hormigones polimerizados

Los hormigones polimerizados están siendo empleados, en estos últimos años, en aplicaciones muy concretas tales como tuberías, pilotes prefabricados, tableros de puentes y presas y su futuro es muy prometedor para otras muchas aplicaciones.

Existen dos tipos distintos de hormigones polimerizados: el hormigón impregnado y el hormigón con polímeros.

En el hormigón impregnado se fabrican las piezas de hormigón corriente y después de fraguado y endurecido se secan, se impregnan a presión con un manómetro, y luego se polimeriza.

En el hormigón con polímeros se añade el monómero al preparar el hormigón añadiéndolo al agua, áridos y cemento en la hormigonera.

La impregnación puede hacerse en toda la masa o únicamente superficialmente en profundidades de 5 a 50 mm. Así se hace, por ejemplo, en los tableros de puente para mejorar su resistencia al desgaste en los parámetros de la presa y para mejorar su impermeabilidad.

Hormigones armados con fibras

Aparte del amianto, usado desde hace muchos años para la fabricación de amianto-cemento, en los últimos 15 años se han desarrollado, y hoy existen en el mercado, otras fibras utilizables para armar el hormigón tales como carbón, nylon, polipropileno y acero en forma de fibras.

La adición de estas fibras mejora determinadas cualidades del hormigón tales como su resistencia al choque, su fisurabilidad, y sus resistencias a compresión y sobre todo a tracción. En algunos casos, en cambio, empeora su trabajabilidad.

En la figura 9 se indica esquemáticamente la forma de trabajo a flexión de una pieza de hormigón con y sin fibras.

Las fibras empleadas deben ser inalterables al ambiente alcalino de la pasta de cemento, y reunir determinadas condiciones en cuanto a su adherencia al hormigón, alargamiento unitario bajo carga y módulo de elasticidad. Hoy existen fibras en el mercado que cumplen dichas condiciones.

Su uso depende de la forma y dimensiones de la pieza a fabricar y del tipo de fibra.

En piezas laminares la distribución de las fibras es según dos dimensiones mientras que en

el hormigón en masa se tiende a su distribución en tres dimensiones.

En revestimiento de túneles se está empleando mucho el shot crete cuyo esquema de utilización se indica en la figura 10.

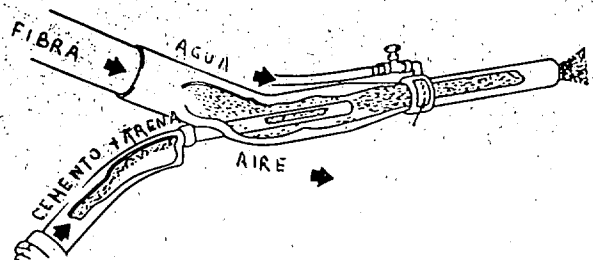


Figura 10

En pistas de aeropuertos y en firmes de carreteras se emplea mucho el refuerzo con fibras de acero. También se emplea en columnas de edificios que deben resistir a terremotos y en obras militares que deben resistir a impactos de morteros y granadas.

Hormigones impregnados con azufre

El hormigón de azufre formado solamente con arena, grava y azufre, sin agua ni cemento, es un material que tiene una buena resistencia a compresión a las pocas horas. Sin embargo su baja temperatura de fusión 119°C y sus efectos corrosivos hacen que su utilidad sea muy limitada.

En cambio el hormigón normal hecho con arena, grava y cemento, impregnado con azufre después de fraguado, mejora notablemente sus resistencias a compresión y a tracción y es empleado normalmente en ciertas aplicaciones en piezas prefabricadas.

Existen tres métodos de impregnación.

El más sencillo consiste en curar las piezas de hormigón en ambiente húmedo durante 24 horas, secarlas luego durante 24 horas a 13°C y sumergirlas en un baño de azufre fundido durante un tiempo que depende de las dimensiones de la pieza. En este procedimiento conviene emplear un hormigón de cierto volumen de huecos lo que se consigue con una relación agua/cemento entre 0,7 y 0,8.

Otro procedimiento es igual al anterior pero

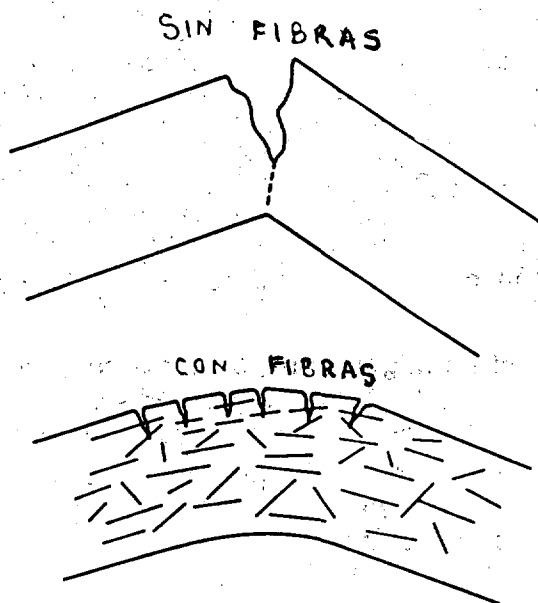


Figura 9

el baño de azufre se hace en vacío durante 2 horas. El hormigón puede ser más compacto con una relación agua/cemento entre 0,5 y 0,7.

El tercer procedimiento es igual al anterior pero después de salir las piezas del baño de azufre se las somete a una presión exterior para forzar al azufre a penetrar más en los poros.

Conclusiones

En la fabricación del cemento se han conseguido importantes logros en la economía de la energía necesaria para la fabricación, en la uniformidad de sus cualidades y en su calidad.

Las investigaciones en curso permiten esperar mejoras importantes en el mismo sentido en la molienda de clínker. Parece que está próxima la adaptación de los molinos verticales a este objeto y a más largo plazo los molinos por proyección.

Una mejor utilización del cemento se consigue adaptando la granulometría de forma que se eliminen los granos muy gruesos y muy finos que no intervienen de forma activa en el fraguado y endurecimiento.

No parece que se hayan conseguido apreciables progresos en la preparación del hormigón. Los mezcladores y hormigoneras que hoy se utilizan son, básicamente, las mismas desde hace muchos años. Sin embargo también aquí parece que existen posibilidades de mejora. Con la premézcla de agua y cemento en turbomezcladores de gran velocidad se consigue una mejor hidratación del cemento y aumentos de resistencias del orden del 10 por 100. Los mezcladores continuos pueden ser una próxima realidad.

En la puesta en obra del hormigón se consiguen mejoras importantes con la obtención de hormigones más trabajables. Los progresos en el estudio de la reología de las pastas de cemento permitirán un avance en este sentido.

La utilización creciente de cementos de adición permiten economías apreciables y una mejor adaptación de los hormigones a utilizacio-

nes específicas. Desgraciadamente los pliegos de condiciones están siendo un freno en muchos países.

Los cementos expansivos permiten obtener hormigones sin retracción e incluso autotensionales cuya utilización debe desarrollarse en el futuro.

Los hormigones polimerizados son ya de uso práctico en algunas utilizaciones tales como tableros de puente, paramentos de presa y piezas prefabricadas.

Los hormigones impregnados en azufre son también utilizables en algunos prefabricados.

Carlos Carril Carvajal



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción 1945. Ha ocupado entre otros los siguientes cargos: Presidente del Bureau International du Beton Manufacturé. Presidente y Consejero Delegado de Materiales y Tubos Bónna S. A. Delegado General en España de Saint-Gobain-Pont a Mousson. Presidente y Consejero Delegado de Compañía Catalana de Ce-

mentos Portland S. A. Presidente y Consejero Delegado de Hormigones Condal S. A. Consejero de Acueductos (Argentina) y de Spanish Egiptian Cement Company (Egipto). Presidente de la Asociación Técnica de Derivados del Cemento, etc. Ha realizado entre otras las siguientes obras: Sifones del Baeza y Valduesa. Sifón del Jerte. Saneamiento de Buenos Aires (Argentina). Abastecimiento de agua a Bahía Blanca (Argentina). Abastecimiento de agua a Calcuta (India). Fábrica de Cemento en Vallirana (Barcelona). Molienda de Clínker en Port-Said (Egipto), etc. Ha publicado dos libros: «Tuberías de Gran Diámetro» y «Fórmula para el uso de tuberías de Hormigón» además de numerosos artículos en varias revistas nacionales y extranjeras. Ha sido Ponente General en varios congresos internacionales y pronunciando varias conferencias sobre temas de hormigón en España y varios países extranjeros. Fue Presidente del 7.º Congreso Internacional de Prefabricados de Hormigón.