

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

610-15 CINCUENTA AÑOS DE QUÍMICA DEL CEMENTO EN TEORÍA Y PRÁCTICA

(Conclusión)

(50 Jahre Zementchemie in Theorie und Praxis)

H. Kühl

De: "ZEMENT-KALK-GIPS" sept. 1951, nº 9, pág. 231

- - -

La explicación del confuso cuadro que presenta todavía la química del cemento a principios de este siglo, ha tenido lugar no por medio de un Concurso, sino considerado desde otro punto de vista completamente diferente: ha sido el resultado de un metódico trabajo de investigación de los sistemas de dos, tres, cuatro y cinco componentes, que son los más importantes en los aglomerantes hidráulicos.

La primera publicación en este campo, el estudio del sistema cal-silíce por los investigadores americanos Day, Allen, Sheperd, White y Wright, aparece en 1906, y en los años siguientes también ha llevado la dirección la investigación americana en el estudio de la constitución del clinker de cemento Portland, aunque también han contribuido notablemente ingleses, japoneses y alemanes; citaremos únicamente nombres como Lea y Parker, Koyanagi, Nagai y entre los alemanes Guttman y Gille, Endell, Nacken, Eitel y sus colaboradores, como Strassen, Büsser y Schwiete.

Aparte de la realización metódica y consecuente de un extenso plan de trabajo, ha sido especialmente el paso de la investigación dinámica de los equilibrios en la fase fundida al

método estático el que ha constituido la base del éxito obtenido en las investigaciones de sistemas de dos y mas componentes. El método dinámico, en el que se sigue el transcurso con el tiempo de un proceso de calentamiento o enfriamiento por medio de curvas, para poder sacar conclusiones sobre los procesos químicos que han tenido lugar durante el calentamiento o enfriamiento a partir del hábito de las curvas, y, en particular de la aparición de puntos de inflexión, falla en la química de los silicatos, porque aparecen marcados fenómenos de subfusión y sobreenfriamiento, con lo que las curvas quedan tan desfiguradas que resulta imposible su interpretación. Esta se consigue en el procedimiento estático manteniendo un sistema reaccionante a una temperatura determinada hasta que se establece el equilibrio correspondiente a dicha temperatura. Entonces se "congela" el equilibrio por enfriamiento súbito con agua o mercurio y el producto obtenido se somete al análisis químico y mineralógico. - Eitel explica este procedimiento con gran exactitud en la determinación del punto de fusión del diópsido $\text{Si}_2\text{O}_6\text{MgCa}$. Si se calienta diópsido fundido durante largo rato a 1.393° y se enfría entonces rápidamente la probeta, la masa enfriada consta exclusivamente de fase vítrea, de donde hay que sacar en conclusión que a la temperatura del ensayo de 1.393° estaba totalmente en estado líquido; pero si se descende la temperatura en 3° , y se calienta por lo tanto la masa durante largo tiempo a 1.390° , la probeta "congelada" ya no es vítrea, sino totalmente cristalina, de modo que el punto de fusión del diópsido se encuentra a 1.391° . Evidentemente, se complica mucho el procedimiento descrito aquí en un ejemplo sencillo, cuando se trata del producto de "congelación" de un sistema de muchas fases, que se debe analizar entonces química, microscópica y eventualmente también

roentgenológicamente. Podemos hacernos una idea de ésto al leer en los escritos de Rankin, que para el establecimiento del diagrama de Rankin debieron prepararse y estudiarse del modo descrito no menos de 1.000 probetas y que se precisó primero montar los aparatos necesarios, por ejemplo, los termostatos de altas temperaturas. Sin embargo, no entraremos mas a fondo en el aspecto de los aparatos y únicamente indicaremos algo, brevemente, sobre los métodos óptimos de análisis. Después de haber intentado estudiar Wetzel la constitución del clinker de cemento Portland en láminas planas pulimentadas antes de la primera guerra mundial, se ha perfeccionado tanto este procedimiento por los trabajos de Tavasci, Parker, Insley y Ward en época reciente que está a punto de desplazar en la actualidad el método de las láminas delgadas. Finalmente puede mencionarse aquí el microscopio electrónico, aunque con su ayuda no se han obtenido todavía grandes progresos en la investigación de los problemas del cemento.

Si observamos ahora los resultados a los que han conducido estos trabajos de investigación durante 50 años, puede considerarse en realidad como fundamentalmente puesta en claro la constitución del clinker de cemento Portland; sin embargo, se pudo llegar a este término únicamente por caminos muy enrevesados. Particularmente ilustrativo es el desarrollo del problema de la alita. Mientras que Le Chatelier designaba ya la alita como silicato tricálcico, Törnebohm creía que se trataba de una solución sólida de silicatos y aluminatos ricos en cal, y esta opinión se repitió en los decenios siguientes en distintas formas, particularmente después de haber descrito Jaenecke un compuesto de fórmula $8CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, que a consecuencia de su

elevado contenido de alúmina no podía representar la alita propiamente dicha, pero podía muy bien formar parte de su estructura. - Ha sido precisa la introducción de todos los medios auxiliares modernos para que se demostrase como falso después de una controversia de 20 años el descubrimiento de Jaenecke, que era fruto de las pequeñas diferencias en las propiedades ópticas de los compuestos.

Respecto de la belita no se ha discutido nunca seriamente que se trata fundamentalmente de silicato dicálcico; sin embargo, el hecho de que la belita puede presentarse en varias formas distintas que se distinguen por su poder de reflexión de la luz - ha conducido también aquí a un difícil complejo de cuestiones, en las que se trata fundamentalmente de la relación entre las formas de la belita y las tres modificaciones del silicato dicálcico, - así como de las condiciones bajo las cuales pueden estabilizarse las formas α y β por formación de soluciones sólidas.

El problema de la constitución de la celita encontró en 1928 su sorprendente solución al ser descubierto el ferro-aluminato tetracálcico por Hansen, Brownmiller y Bogue. Al formarse el clinker del cemento Portland este compuesto cristaliza el último, por lo cual aparece en la imagen microscópica como masa de rollo entre los componentes minerales silicatados; por esta razón se le denomina desde hace poco "masa intermedia" y, a pesar de su coloración oscura, "masa intermedia clara", porque a consecuencia de su fuerte poder reflector de la luz aparece claro con luz reflejada.

Junto a la masa de fondo clara hay también una masa de fondo oscura; se trata fundamentalmente del resto de fase fundida solidificada vítrea, o -para un enfriamiento lento del clinker- de aquellos componentes aluminosos que no han sido utiliza-

dos para la formación del ferro-aluminato tetracálcico. Que se trata realmente de productos ricos en alúmina se desprende de la posición de su zona de separación en el diagrama de Rankin, que como es sabido comienza a 1.900° en la proximidad del punto del silicato tricálcico y se extiende después en forma de hoz estrecha en dirección al ángulo de la alúmina, de modo que la fase fundida residual será tanto mas rica en alúmina cuanto mas avanzado esté el proceso de cristalización de los minerales principales. Pero todavía queda pendiente la cuestión de la constitución de los compuestos aluminosos que se forman aquí, que los americanos distinguen como masa de fondo "del ángulo derecho" o "prismática" aunque probablemente se podría demostrar que se trata de dos modificaciones distintas del aluminato tricálcico.

Finalmente, en lo que concierne a los componentes secundarios ya no existe ninguna duda respecto de la magnesia de que en el clinker de cemento Portland existen grandes cantidades de magnesia libre en forma de cristales de periclasa que, como es sabido, son la causa de la separación de magnesia. Entre el ferro-aluminato tetracálcico (según Insley hasta un 1% y según Schwiete y Strassen hasta el 2%), y la fase fundida residual (según Bogue hasta el 4%), se distribuyen pequeñas cantidades de magnesia.

Respecto a los álcalis las cosas son muy distintas en el potasio que en el sodio; así, para la distribución del óxido de sodio existen según Bogue 4 posibilidades: en clinkers enfriados rápidamente el óxido de sodio se distribuye entre la fase fundida residual y el silicato dicálcico en forma de solución sólida, pero para un enfriamiento lento puede también separarse de nuevo a partir del silicato dicálcico en forma de compuestos

silicatados, o, finalmente, se forma independientemente el compuesto $8\text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ o -en ciertas circunstancias- también el compuesto $3\text{CaO} \cdot 3\text{Na}_2\text{O} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$.

Las cosas son menos complicadas en el caso del óxido de potasio que, en presencia de trióxido de azufre, se une con él para formar sulfato potásico y proporciona, en cuanto que no es consumido para esto, el compuesto $23\text{CaO} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 12\text{SiO}_2$.

Antes de dedicarnos al problema de las escorias de alto horno, vamos a ocuparnos brevemente del cemento aluminoso descubierto por Bied hacia 1910, porque se trata, como en el cemento Portland, de un aglomerante, que se endurece por sí mismo, mientras que las escorias de alto horno necesitan siempre un "activador" que activa la capacidad de endurecimiento hidráulico en ellas latente.

Aunque los primeros cementos aluminosos han sido algo diferentes de los productos actuales, sin embargo, hemos encontrado en un cemento aluminoso, que recibimos en Marzo de 1911 de Bied, a los 3 días una resistencia a la tracción de solo 14 kg que ascendió ciertamente a los 7 días a 29, siendo para esta fecha la resistencia a la compresión de 418. Evidentemente Bied debía haberse dado cuenta de que el cemento aluminoso no es un cemento Portland modificado por un alto contenido de alúmina, sino que se trata de un aglomerante completamente distinto cuya resistencia, dentro de ciertos límites, no aumenta con un contenido creciente, sino decreciente, de cal.

El estudio de la composición del clinker de cemento aluminoso ha llevado al conocimiento de que el primer componente es siempre el aluminato monocálcico pero según Solacolu con el aglo-

merante que él denomina cemento aluminoso de segunda especie puede ser sustituido en amplia escala por dialuminato cálcico. La silice, forma silicato dicálcico y gehlenita, el óxido de hierro, - según la cantidad de cal, ferrito mono- o dicálcico. Puesto que - la gehlenita no participa en el proceso de endurecimiento, la mezcla cruda de cemento aluminoso debe ser compuesta de modo que el contenido de gehlenita del cemento sea lo menor posible, esto es, la mezcla ha de orientarse predominantemente al aluminato monocálcico o al dialuminato cálcico, pero ha de evitarse la zona intermedia en la medida de lo posible.

Hacia comienzos de siglo estaban todavía en pugna las escorias de alto horno con el cemento Portland. Que se pudiese - llegar a una pugna de años de duración entre estos dos valiosos - aglomerantes tiene su explicación en que también las escorias de alto horno ofrecían un difícil problema a la investigación científica. Aunque hoy consideramos que únicamente las escorias de - determinada composición química, y éstas únicamente cuando han - sido enfriadas rápidamente, constituyen un material de partida - adecuado para la fabricación de cemento metalúrgico de alta calidad, no podemos pasar por alto que este conocimiento no era en - modo alguno del dominio público hace 50 años. Lo que han supuesto Le Chatelier y Törnebohm respecto del problema del clinker de cemento Portland, es lo que ha significado Passow para las escorias de alto horno. Que también aquí se trataba de una difícil - pugna por el conocimiento científico se pone de manifiesto clara - mente en la evolución de las opiniones de la que no se vió libre el mismo Passow en el curso de sus trabajos de investigación. Así, por ejemplo, cuando Passow se inclinaba de vez en cuando al parecer de que, para granulación al aire, el poder de endurecimiento

hidráulico de las escorias era activado por la oxidación de los sulfuros, y después el mismo volvía mas tarde a rechazar este punto de vista, porque había encontrado en unos ensayos con fases fundidas sintéticas, que puede ser totalmente necesario en las escorias un determinado contenido de sulfuro cálcico, o cuando otros técnicos, como Colloseus y Mathesius creían poder elevar de un modo decisivo el poder hidráulico de las escorias por tratamiento de las mismas con soluciones salinas o por tratamiento con vapor en autoclave. Todos estos esfuerzos quedaron sin sentido cuando se hizo del dominio público, bajo la guía de Passow, el conocimiento de que debe asegurarse un contenido de energía más elevado en las escorias por medio de un enfriamiento rápido, y que esta energía almacenada, que llamaremos latente, debe desencadenarse por un impulso externo, la "activación" alcalina por medio de cal o mejor por clinker de cemento Portland. Con esto estaban dados los principios seguros para la fabricación del cemento Portland metalúrgico y del cemento de alto horno; a estos se añadió después del descubrimiento de la "activación" por sulfatos en 1908 el cemento de escorias y yeso, que empezó a introducirse después de la aportación fundamental de Blondiau a la teoría de su endurecimiento, en la que afirmaba que, tanto en el cemento de escorias y yeso como en el cemento aluminoso, se encontraba, después del amasado, una concentración de cal mucho menor en la fase líquida que en los cementos que contienen clinker muy básicos.

Si comparamos las escorias de alto horno y el cemento Portland en lo que se refiere al estado de su investigación científica a comienzos de este siglo no vacilaremos en conceder una considerable ventaja a las escorias de alto horno, pues mientras

en aquella época el estudio de los sistemas de dos, tres y más componentes, que nos había de traer la solución del problema del cemento Portland, estaba aún en sus principios, el problema de las escorias estaba ya resuelto totalmente en lo fundamental por los trabajos de Passow. Que esto fuese así, tiene el sencillo fundamento de que en las escorias vítreas tenemos que tratar con un sistema de una sola fase, mientras que en el clinker de cemento Portland se trata de un sistema de muchas fases. Pero de aquí se deduce forzosamente que los problemas de investigación que las escorias de alto horno tenían que plantear aún a la ciencia debían ser más bien en el campo de la hidratación y de la utilización técnica de los cementos metalúrgicos que cuestiones de constitución. El trabajo correspondiente ha sido realizado, casi exclusivamente, por investigadores alemanes como Guttman, Grün, Gille y Keil.

Si tratamos ahora de saber qué efecto ha tenido en la práctica la investigación del cemento Portland, debemos distinguir primero dos modos de considerar las cosas que deberíamos designar como americano y europeo. En América se ha hecho corriente no juzgar ya los cementos Portland por su análisis bruto, sino según el análisis en componentes minerales, derivable potencialmente de aquel, y Bogue afirma en su libro, aparecido no hace mucho, que él ve precisamente aquí un avance fundamental en la química del cemento Portland. Podemos darle aquí la razón a Bogue desde el punto de vista del tratamiento teórico del problema del cemento, pero no podemos estar de acuerdo con él en lo que respecta al influjo sobre la práctica. Pues si se calcula el análisis potencial según las fórmulas de Bogue, se obtienen valores para el componente más importante -el silica-

to tricálcico- que se desvían mucho de la realidad. Esto tiene su explicación en que el cemento Portland, ni aún cuando se hace cristalina la fase fundida residual por enfriamiento lento, no representa en modo alguno un sistema en equilibrio, que es lo que habría que presuponer para aplicar las fórmulas de Bogue. Si se quiere efectuar un cálculo correcto hay que servirse de las fórmulas de Dahl cuya deducción representa una aportación científica realmente extraordinaria, pero que, sin embargo, con sus 90 grupos, son de una complicación tal que apenas se puede realizar nunca su aplicación a la práctica.

Aunque este punto de vista americano parece ahora ganar terreno poco a poco en Europa, lo que hay que atribuir más bien a razones psicológicas que a científicas o técnicas, en nuestro país y en la mayoría de los países europeos se hacen aún hoy los cálculos de buena gana con los conceptos, introducidos por Michaelis y por el autor, de los módulos y de patrón de cal. No repetiremos aquí cosas que han sido dichas con frecuencia y solo plantearémos la cuestión de si el contenido en cal de un cemento queda mejor definido afirmando que el cemento contiene 57% de silicato tricálcico, según Bogue -correspondiente quizá a 62% según Dahl- o diciendo que el valor del patrón de cal es 98,3. Parece que la respuesta es inmediata.

Paralelamente a los grandes cambios que ha experimentado la química del cemento en 50 años, se han operado análogas transformaciones en la instalación técnica de las fábricas de cemento. Evidentemente en el año 1900 había fábricas de cemento modernas, bien instaladas de acuerdo con la situación de la técnica en aquel momento; pero había también verdaderos monstruos de fábricas de cemento, en las que se echaba remiendo tras remiendo sin

Éxito visible a una instalación equivocada empezando por el edificio. Vamos a mencionar un caso particularmente grosero de una fábrica de cemento montada en 1895, en la que unos 10 años más tarde trabajó el autor durante algún tiempo. Ya el hecho de que la fábrica se hubiese montado en 1895 según el antiguo procedimiento de "suspensión diluida" con grandes piletas de sedimentación, no correspondía con el estado de la técnica en aquel momento. Entonces se sustituyó muy pronto el procedimiento mencionado por el llamado de Berggreen en el que se amasaba greda y arcilla con la humedad de cantera. Esta preparación era tan defectuosa que la cocción en los hornos proporcionaba un clinker deleznable, totalmente inservible. Cuando visitamos la fábrica, este clinker formaba ya en el patio una montaña de 300.000 barrilos, que ya había empezado a alterarse por efectos atmosféricos y ya había deformado la pared lateral del edificio que albergaba el horno.

Se buscó la salvación en una nueva instalación que se denominaba "Meierci", porque la montaba el conocido técnico Ferd. M. Meyer. Esta instalación se basaba en la acertada idea de espesar la "suspensión diluida" con producto crudo molido y seco, sin embargo, la realización de esta idea era más primitiva. En un local de unos 30 m² de superficie había una mezcladora de tornillo sin fin sobre la cual se encontraba una abertura en el techo a través de la cual se volcaba en el tornillo sin fin la suspensión elevada por medio de cangilones sobre una cinta transportadora inclinada. Al poco rato entraban en acción 6 obreros, colocados a ambos lados de la mezcladora, que echaban en ésta con todas sus fuerzas producto crudo molido, por medio de palas, crudo que procedía de una instalación de molienda y era transportado a

la sala de mezclado por medio de un transportador de cubiletes, cayendo libremente a través de un agujero en el techo y extendiéndose sobre el suelo como un líquido.

Podríamos contar muchas más cosas parecidas de nuestro trabajo en aquella fábrica, pero lo dicho basta para dar una idea de lo que era posible todavía a principios de siglo, aunque evidentemente se trataba de un caso excepcional.

Pero también las fábricas de principios de siglo que estaban en orden, tenían una apariencia muy diferente de las fábricas de nuestro tiempo. La magnitud de la instalación, las más veces para una producción anual de 300.000 barriles -esto es, 50.000 toneladas-, pone ya de manifiesto la diferencia entre entonces y ahora, y como resultan pequeños los rendimientos de entonces frente a los actuales.

Respecto a la trituración casi no había más que trabajo a mano: hemos trabajado todavía en fábricas en que se transportaba el crudo a las machacadoras de muelas por medio de carretillas; las machacadoras eran generalmente de piedras o de rodillos; eran desconocidas todavía las de martillos y de percusión. La preparación por vía húmeda se limitaba casi totalmente para los crudos blandos; la molienda por vía húmeda de crudos duros estaba todavía en sus principios y la molienda húmeda por filtración de suspensiones empezó a aplicarse en gran escala - después de la primera guerra mundial, mientras que el procedimiento de flotación es de los últimos tiempos y se realiza en pocas instalaciones y en condiciones especiales.

Para la molienda se utilizaban aún numerosos molinos de muelas; fueron sustituidos primeramente por la combinación -

molino de bolas/molino de rodillos, que se desarrolló más tarde para dar el molino Compound. Hubo una etapa intermedia caracterizada por la preferencia por aquellos molinos que, como los Griffin-Bradley y Fuller, así como los de rulos, eran accionados por la fuerza centrífuga. La introducción de las clasificadoras por corrientes de aire estaba todavía en sus principios, y los molinos con corrientes de aire combinados con dispositivos de secado del producto molido empezaron a emplearse en los últimos decenios. Todo el tiempo se arrastra la controversia sobre la conveniencia de la clasificación por corrientes de aire en la molienda de cementos y de crudos; la bibliografía de los últimos tiempos pone de manifiesto que esta controversia no ha llegado todavía a resolverse definitivamente.

El autor no ha llegado a ver en funcionamiento los hornos circulares para la cocción del cemento, pero si los hornos de cuba tipo Dietz, aunque a principios de siglo ya estaban en vías de desaparición; en su lugar se introdujeron casi en todas partes los hornos Schneider, esto es, los antiguos hornos verticales Hauenschild por el procedimiento de alimentación de Schneider, que combatió con éxito la temida formación de suspensiones o adherencias protegiendo el producto de alimentación del horno del ataque de las cenizas del coque que se utilizaba entonces todavía sin excepción.

En 1896 fué instalado en Alemania el primer horno rotatorio por Forell en Lollar; tenía un rendimiento diario de 30-35 Tm.; los primeros hornos rotatorios mayores se pusieron en funcionamiento en 1898 en Aalborg y en 1899 en Hemmoor. La rápida introducción del horno rotatorio, por ejemplo, por las firmas Polysius de Dessau, Fellner y Ziegler de Frankfurt, y

Schmidt de Copenhague, pareció al principio significar el fin del horno vertical, pues el clinker de horno rotatorio era de calidad muy superior al de horno vertical por la falta absoluta de cocción ligera, y únicamente suponía un impedimento en este desarrollo el consumo de combustible entonces todavía extraordinariamente elevado del horno rotatorio.

Se operó una transformación considerable en esta situación cuando el horno vertical fué hecho automático por Hauen-schild hacia 1910. Al principio se alimentaba todavía el horno con coque grueso, hasta que poco después de la primera guerra mundial se fué introduciendo cada vez más el empleo de carbonilla de coque prensada según habían propuesto Müller y Prüssing.

Al principio no se podía hacer nada contra el consumo de combustible extraordinariamente alto del horno rotatorio, que era casi doble que el del horno vertical. Se intentó mejorar el rendimiento térmico haciendo los hornos cada vez más largos, sin obtener ciertamente un efecto totalmente satisfactorio. Recordamos otros muchos intentos que realizamos en 1910 por iniciativa de la firma Polysius en la fábrica de cemento recién construida de Saale. Pero ni la modificación del número de revoluciones, ni las variaciones de la velocidad de carga, de la dirección del aire y de la adición de polvo de carbón condujeron al convencimiento de que la razón de la poca economía del horno rotatorio tenía su explicación en que las llamas se deslizaban sobre el fondo móvil del horno sin entrar en contacto íntimo con el mismo. Este convencimiento nos llevó a patentar la introducción de la suspensión espesa por pulverización o por medio de un dispositivo mecánico parecido a los empleados en las salinas. Como es sabido estas sugerencias han encontrado su realiza

ción muchos años más tarde en el procedimiento Rigby, en la introducción de la suspensión por medio de cadenas y en los aparatos de precalentamiento, como el Calcinator, el Concentrator y desecadores.

Más tarde se consiguió realizar un intercambio intenso de calor entre la masa del crudo y los gases de las llamas en el horno Lepol por medio de la parrilla Lollep; a ésta siguió la cinta de sinterización que a primera vista parece constituir una evolución de la parrilla Lollep, pero en ella el proceso de cocción tiene lugar de un modo muy distinto del horno Lepol, contribuyendo al mismo el producto anteriormente cocido.

Respecto a aparatos secundarios solo indicaremos brevemente que la eliminación del polvo a principios de siglo tenía lugar exclusivamente por medio de filtros, ya que no se había descubierto todavía el procedimiento eléctrico, y que no se conocía tampoco todavía la propulsión eléctrica individual, sino que se tenían en funcionamiento todas las máquinas por medio de una instalación de transmisión frecuentemente de extraordinaria complicación. El envasado tenía lugar todavía con gran frecuencia en barriles y el resto en sacos de yute que se ataban con una cuerda. En su tiempo se consideró un gran avance el sustituir la cuerda por un cierre de alambre que se ponía mecánicamente. Pero todo esto pertenece ya a un pasado muy remoto, después que a poco de terminar la primera guerra mundial se impusieron los sacos de papel y las ensacadoras de válvula.

Medidas con los criterios actuales las resistencias de hace 50 años eran modestas; además estaban sometidas a las fluctuaciones más intensas, presentando aún en el mercado las fábricas más antiguas comentos que con frecuencia apenas satis-

facian las exigencias de las normas (entonces 16 Kg. a tracción a los 28 días), aunque había una serie de fábricas que producían un cemento excelente. En los cementos estudiados por nosotros en 1908 la resistencia a la tracción a los 3 días fluctuaba entre 6 y 21 Kg. y a los 28 días entre 12 y 27 Kg. Aun mayores son las fluctuaciones en la resistencia a la compresión que oscilaba a los 28 días entre 80 y 378 Kg.

En aquella época no era conocida todavía una clasificación de los cementos según su resistencia; fué iniciada poco antes de la primera guerra mundial por Spindel al introducir el supercemento de Lorüns. En Alemania se ha seguido este ejemplo en principio y se ha llegado en el último decenio a la distinción de tres calidades; además se creó una clase especial para la construcción de pistas, con una tendencia a la retracción mínima. En otros países sobre todo en Norteamérica se ha seguido otro camino en la creación de cementos especiales; allí hay desde 1935 cuatro clases especiales, y no podemos por menos que mencionar que estos cuatro tipos corresponden a una propuesta que hizo el autor el año antes en una conferencia en la reunión general de la Unión Alemana de Fabricantes de Cemento Portland, sin que, ciertamente, pensemos que esta propuesta haya influido en algún modo sobre el desarrollo en América; los americanos han marchado siempre por su propio camino.

Hace ya 50 años se intentó en la Asociación Internacional para el Ensayo de Materiales de la Técnica unificar las normas de los distintos países que entonces variaban mucho de unos a otros. Hasta el presente se ha repetido numerosas veces este intento de unificación pero han fracasado todos, antes bien, cada vez se diferencian más entre sí las normas de ensayo

circunstancia cuya gran importancia se refleja en el tratamiento repetido de la cuestión en las revistas técnicas en los últimos años.

En Alemania los procedimientos de ensayo han experimentado modificaciones, no solo al irse elevando con el avance de la técnica las resistencias exigidas, sino que también ha evolucionado fuertemente el criterio para juzgar las mismas. En el primer decenio se ensayaban los cementos únicamente respecto a la resistencia a la tracción, como en el periodo de tiempo anterior. Pocos años antes de la primera guerra mundial se sustituyó el ensayo de la resistencia a la tracción por el de la resistencia a la compresión y al mismo tiempo se introdujo la combinación de ambos. Aunque este procedimiento de ensayo fué recibido no sin prevenciones, se ha empleado; degenerando en una carrera por la resistencia a la compresión a expensas de la resistencia a la tracción, hasta que los extensos trabajos de Haegermann condujeron al conocimiento de que el ensayo plástico en morteros con arena de distintos tamaños de grano permitían hacerse una idea mucho más exacta que el antiguo ensayo de morteros con la antigua arena normal, gruesa.

Para terminar diremos unas breves palabras sobre la teoría del endurecimiento. El pasado siglo dejó sin resolver la controversia entre la teoría del endurecimiento cristalino de Le Chatelier y la del endurecimiento coloidal de Michaelis, y aún en los años 1905 - 1907 tropezó Michaelis con la oposición más enérgica cuando desarrolló su teoría en detalle en varias conferencias. El tiempo que siguió permitió reconocer que la diferencia de opiniones entre Le Chatelier y Michaelis no era ni mucho menos tan grande como parecía a los mismos investigadores,

y cuando hoy interpretamos el endurecimiento hidráulico como un proceso coloidoquímico en el sentido de Michaelis, no perdemos de vista que en los productos formados se trata de formas microcristalinas que constituyen la fase dispersa del sistema coloidal. Es una satisfacción que esta síntesis haya hecho justicia a estos dos grandes investigadores.

Aunque se está de acuerdo en lo fundamental, sin embargo, la investigación de los nuevos productos resultantes en el proceso de endurecimiento no ha alcanzado, ni con mucho, la altura que el estudio de la constitución del clinker de cemento Portland. Aunque se creía todavía no hace mucho tiempo que se podía deducir la composición de los productos formados de los sistemas binarios cal-silice, cal-alúmina y cal-óxido de hierro, incluyendo el agua de hidratación, un trabajo de Strasson y Strätling que condujo al descubrimiento de un "hidrato de gehlenita", ha demostrado que posiblemente hay que contar también con formaciones cuaternarias, quizá zeolíticas. El planteamiento del problema se ha complicado aún más con modernos trabajos americanos que han demostrado que en los granates puede sustituirse la sílice por agua y que los aluminatos que resultan aquí pueden formar soluciones sólidas entre sí y con la sustancia original; quizá se haga necesario tomar en cuenta esta formación, lo cual puede decidirse únicamente por estudios de equilibrios. Pero hay que añadir que la vieja teoría de Candlot y Michaelis, según la cual el sulfoaluminato tricálcico hidratado es la única causa de la deshidratación del yeso, ya no puede sostenerse en esa forma después que, también la investigación americana, ha demostrado que existe un compuesto análogo, en el que la alúmina está reemplazada por óxido de hierro, compuesto

que ciertamente tiene una velocidad de formación mucho menor - que la del sulfoaluminato tricálcico hidratado. Qué repercusión tendrá esto sobre la teoría del supercemento de Michaelis nos - lo dirá el futuro.

Creemos que esta breve descripción esquemática bastará para mostrar que aún queda mucho trabajo por hacer en el campo del endurecimiento hidráulico, hasta que podamos llegar también aquí a una claridad semejante a la que ya se ha conseguido respecto de la constitución de los aglomerantes hidráulicos.
