

689 - 18

estructura y propiedades físicas de la pasta de cemento, fraguado

T. C. POWERS
J. A. C. I. Vol. 41, pág. 1 (1958)

El propósito que guió al autor, cuando redactó este trabajo fué, según él mismo refiere en su resumen: Dar cuenta de los resultados obtenidos en los estudios iniciados por la «Asociación del Cemento Portland (Portland Cement Ass. Chicago)», hace más de 20 años. La autoridad del autor (Director de la Sección de investigaciones básicas en la División de «Investigación y Fomento» de la Asociación ya mencionada), y el haber sido presentado este trabajo al 59 Congreso anual de la Sociedad Norteamericana de Cerámica como exposición del estado actual de los conocimientos acerca del comportamiento del hormigón, son motivos suficientes para tratar de presentar en breve espacio las cuestiones que comprende, ya que, tanto más adecuadamente se utilizará el hormigón de portland, cuanto mejor se le conozca, evitándose, por otra parte, las desagradables sorpresas que produce la utilización de un material fuera de las condiciones y limitaciones que le son propias.

Comienza el autor por fijar el alcance de los conceptos en el lenguaje técnico, y así indica que la mezcla de cemento y agua constituye la pasta (que nosotros llamamos «pasta pura»). Cuando las reacciones químicas cuyo conjunto constituye «la hidratación» confieren a la pasta una rigidez, recibe el nombre de «pasta endurecida» o, en nuestro país, pasta fraguada.

Los datos históricos que completan la introducción dan a conocer, en primer lugar, el propósito que inspiró y ha guiado estos estudios y, después, las incidencias y cambios de dirección que sufrieron.

Se trató de relacionar la composición química del portland con las propiedades de la pasta; y éstas, con las cualidades técnicas del hormigón. De este modo se establecía un puente entre la química y la tecnología de estos materiales. Buen ejemplo, para aquellos que establecen barreras y categorías artificiosas entre la investigación que consideran «pura» y la que aprecian como «técnica».

Desde 1936 a 1940, la pasta se estudia como sólido poroso. A partir de esta fecha se cambia este concepto por el de un conjunto de partículas. En la primera etapa, los espacios ocupados por el agua se tienen en cuenta como poros, mientras son calificados de espacios intersticiales en la segunda. El éxito que a partir de este cambio acompañó a los esfuerzos realizados, los atribuye Powers a la utilización de la teoría de Brunauer, Emmet y Teller, desarrollada en el primer volumen de la obra «Absorción de gases y vapores», original de Brunauer y editada por la Universidad de Princeton en 1943.

Por medio de esa teoría, aplicada para interpretar los datos reseñados acerca de la absorción del agua por la pasta desecada, se obtuvo un conocimiento muy estimable acerca de la magnitud de la superficie interna del sólido, lo que condujo al cálculo del tamaño de las partículas que componen la pasta.

Después de la segunda Guerra Mundial y durante 11 años se relacionaron estos conocimientos con las propiedades físicas, tales como permeabilidad, resistencia mecánica y cambios de volumen. En esta etapa se coordinaron todos los métodos aprovechables, tales como técnicas de rayos X, análisis térmico ponderal y diferencial, etc.

31

Los conocimientos conseguidos han sido clasificados por T. C. Powers según los siguientes apartados: Estructura de la pasta. Resistencia. Porosidad y Permeabilidad. Inestabilidad del volumen. Congelación.

1. Estructura de la pasta

Recién preparada, la pasta es una red de partículas de cemento embebida en agua. Cuando fragua, es decir, al terminar un período latente de unas horas durante el cual la pasta permanece plástica, el conjunto adquiere rigidez y sus cambios de volumen son pequeños aunque técnicamente de gran valor.

Las reacciones químicas entre el agua y el cemento, originan dos nuevos componentes sólidos: El hidróxido cálcico, cristalino; y el «gel de cemento», amorfo microscópicamente. Este cuantitativamente es predominante.

Powers atribuye al gel un contenido de $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Menciona el importante papel que juegan, tanto el Al como el Fe en las velocidades de reacción, pero, bajo un punto de vista estructural, sólo considera el silicato antes indicado.

Físicamente, el gel está compuesto de partículas coloidales y espacios o intersticios entre ellas denominados «poros de gel». El método de Brunauer-Emmet-Tellers asigna a 1 cm^3 de gel una superficie específica de 700 m^2 ; este valor está confirmado mediante el análisis (con pequeño ángulo) por rayos X. En el microscopio electrónico aparece el gel formado por partículas fibrosas en paquetes que originan una red rectangular con material amorfo intersticial.

La pasta difiere en su estructura del gel; los vacíos que presenta una probeta de pasta contienen gel, cristales de hidróxido cálcico, residuos de cemento y algo de agua. Cuando la pasta adquiere rigidez este agua residual se aloja en canales intercomunicados, o menos que sea muy densa la pasta en cuyo caso los canalillos sólo se comunican por los «poros de gel» ya mencionados. En ambos casos se trata de cavidades submicroscópicas, a las cuales se denominan poros o cavidades capilares. Por consiguiente, existen en la pasta dos categorías de vacíos: (1) los poros del gel y (2) los poros capilares, que no están ocupados ni por gel ni por otros componentes sólidos.

El tamaño submicroscópico de los espacios vacíos y el carácter hidrófilo de la fase sólida contribuyen a la higroscopicidad de la pasta, variando la cantidad de agua contenida según la humedad ambiente.

La importancia que poseen los espacios o poros capilares se debe a que sólo en ellos se puede producir y desarrollar el gel de cemento, y la hidratación del aglomerante se detiene cuando todas las cavidades están colmatadas.

Ahora bien, mientras en la pasta recién amasada la porosidad capilar es máxima, ésta decrece hasta un mínimo a medida que el aglomerante alcanza la hidratación que le permite adquirir las condiciones ambientales; pero ha de tenerse muy en cuenta que la capilaridad original es función de la cantidad de agua adicionada en un principio, es decir, es función del coeficiente cemento agua o concentración inicial del aglomerante.

Fácilmente se deduce, a la vista de esta información, la importancia resolutive que posee el valor de la concentración y la influencia de las condiciones higrométricas que rodean al hormigón. Esta influencia que Powers pone de manifiesto en los hormigones de portland, es más profunda cuando se trata de otros aglomerantes tales como los siderúrgicos, el aluminoso y el sobresulfatado; permitásenos subrayar esto, pues aún está muy lejos de constituir una idea básica en la mente de los constructores españoles.

2. Resistencias

En primera aproximación se puede suponer que la resistencia del hormigón es función de la resistencia intrínseca del gel; efectivamente se comprueba experimentalmente que, descartando todas las influencias de los áridos, la resistencia de una probeta es proporcional a la tercera potencia de la relación entre el volumen del gel y el volumen de los espacios utilizables. Esta relación mide en qué grado el gel ha rellenado las cavidades.

Cuando se trata de conocer o atribuir las causas de la cohesión intrínseca del gel, aparecen dos grupos de fuerzas: las de naturaleza física, o de London-van-der-Waals, y las de origen químico. Debido al exiguo tamaño de los poros de gel (15 unidades Amstrongs) en ellos se desarrollan las fuerzas físicas que tienden a disminuir el diámetro de los poros aproximando las partículas, con lo cual engendran una cohesión.

Como el agua no puede desunir las partículas del gel, éstas tienen también que hallarse reunidas por enlaces químicos; ahora bien, las fuerzas físicas preponderan, como se demuestra por el hecho de que al transformar el gel en cristales bien organizados, por ejemplo, mediante curado en vapor a más de 200°C, la cohesión se destruye.

3. Porosidad y permeabilidad

La pasta de cemento es, a la vez, porosa y permeable, como lo es todo sólido formado por partículas reunidas al azar. Efectivamente, aun la más densa de las pastas de cemento totalmente hidratado presenta una porosidad del 26 % en volumen.

La porosidad depende de la medida en que los productos de la hidratación del aglomerante colmaten los vacíos capilares y, también, de la cantidad inicial de agua, traducida al coeficiente cemento/agua.

La permeabilidad es función, por una parte, de la porosidad y, por otra, del tamaño, figura y cantidad de los poros. Esta última variable se representa por el «radio hidráulico», que es el cociente entre el volumen ocupado por el agua y la superficie que limita a dicho volumen; por ejemplo: el «radio hidráulico» de los poros de gel viene a ser de cinco unidades amstrong; tal dimensión produce un coeficiente de permeabilidad en el gel, de 7×10^{-11} darcys. El «darcy» es la unidad de permeabilidad, y se dice que la posee un material cuando, a través de un área de 1 cm², y bajo el gradiente de presión de 1 atmósfera por cm, fluye, durante un segundo, 1 cm³ de un líquido cuya viscosidad sea de un centipoise.

Como la resistencia a fluir por los poros capilares es mucho más pequeña que la de paso a través del gel, la permeabilidad de una pasta depende, en su mayor parte, de su porosidad capilar.

En un buen hormigón corriente, la porosidad capilar es del 40 % y, por lo tanto, de 20 a 100 veces la del gel de cemento. A pesar de ello es menos permeable que la mayoría de las rocas naturales, como se deduce del siguiente cuadro:

TIPO DE ROCA	Permeabilidad de la roca (darcys)	«Agua/cemento» de la pasta de cemento
Cuarzo diorita	$8,56 \times 10^{-9}$	0,42
Mármol	$2,49 \times 10^{-9}$	0,48
Mármol	$6,00 \times 10^{-9}$	0,66
Granito	$5,57 \times 10^{-9}$	0,70
Arenisca	$1,28 \times 10^{-8}$	0,71
Granito	$1,62 \times 10^{-8}$	0,71

4. Cambios de volumen

En la pasta de cemento se producen cambios de volumen causados no sólo por las variaciones de temperatura, sino por las alteraciones del estado higrométrico ambiental. Esto último es una lógica consecuencia del carácter hidrófilo que posee el gel de cemento.

Pero el mecanismo de esta respuesta es bastante complejo. Los componentes no coloidales de un hormigón disminuyen la cuantía de las variaciones que experimenta el volumen del gel, a pesar de lo cual estas alteraciones tienen importancia técnica.

En la pasta de cemento aparece una contracción de volumen típica cuando disminuye la temperatura y distinta de la disminución de volumen normalmente debida al descenso térmico. Esta retracción suplementaria recibe el nombre de «retracción higró-térmica», que no es del todo reversible.

La capacidad de absorción de agua del gel aumenta cuando la temperatura desciende. Por ello, a lo largo de un enfriamiento, cuando toda el agua disponible ha sido absorbida por el gel y sigue bajando la temperatura, aparece una contracción del gel por encontrarse entonces éste en un estado de no saturación o desecación. El valor de esta retracción higró-térmica depende de la humedad interna de la probeta; generalmente es comparable, en magnitud, con el coeficiente de dilatación térmica, aunque puede alcanzar máximos de dos o tres veces mayor que este último. Actualmente, se está elaborando una teoría capaz de explicar, conjuntamente, el mecanismo de los cambios higrométricos y térmicos.

5. Congelación

Los poros del gel son tan pequeños que no permiten la formación de cristales de hielo, por lo cual sólo el agua contenida en las cavidades capilares es la que se congela cuando la pasta de cemento es sometida al efecto de temperaturas bajas; pero la presencia de sustancias disueltas en esta fracción congelable de agua origina otra reducción de la cantidad de agua que puede solidificarse.

Las presiones destructivas que se originan al congelarse el agua de una pasta son de dos clases: (1) presión hidráulica que, durante la congelación, fuerza al agua a salir de las cavidades. (2) Presión osmótica, engendrada por el agua, que tiende a entrar en las cavidades capilares parcialmente ocupadas por hielo.

Saturando la pasta de burbujas microscópicas de aire separadas apenas por espesores de pasta de algunas centésimas de milímetro, se consigue gobernar ambas presiones. En estas condiciones, la congelación provoca una retracción en lugar de la temida expansión. En efecto, el agua pasa desde la pasta al interior de las burbujas mediante un mecanismo osmótico. De esta manera se inhibe la disrupción producida por las presiones que acompañan a la congelación.

6. Otras propiedades

Debido a que en el hormigón las partículas no coloidales se hallan «encoladas» entre sí mediante el gel de cemento que las rodea, las propiedades mecánicas de aquel se caracterizan, en amplio grado, por las del gel. En este sentido se orientan actualmente los estudios de muchas relaciones, tales como resistencia a la tracción o a la compresión y edad del hormigón.

P. G. de P. G.