Materiales de Construcción Vol. 21, nº 141
Enero, febrero, marzo de 1971

619-31

Acerca del desarrollo de la estructura y la resistencia de la pasta de cemento

(continuación)

WERNER RICHARTZ, Düsseldorf

Beton, nº 5, mayo 1969, págs. 203-206

3.2. Endurecimiento acelerado

La hidratación del cemento se puede acelerar:

— por aumento de la finura del cemento;
— por aumento de la temperatura de endurecimiento;
— por adición de acelerantes.

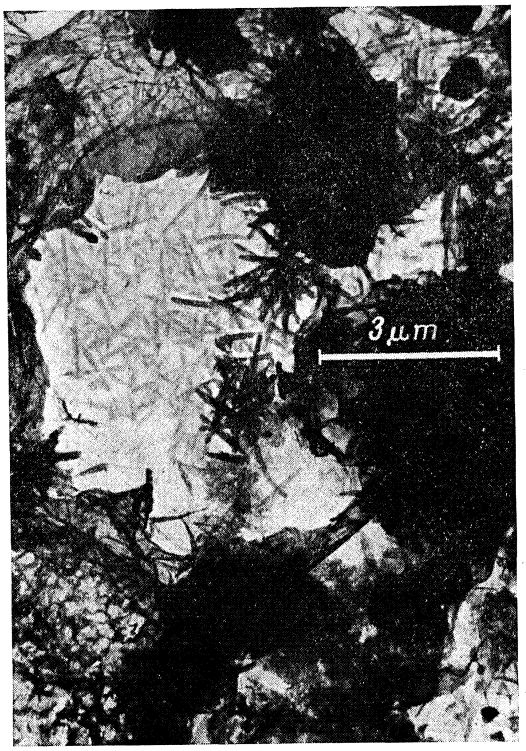

Fig. 6.—Fotografía al microscopio electrónico de la estructura de una pasta de silicato tricálcico a la edad de 7 días, cuyo endurecimiento se aceleró por adición de 1 % en peso de cloruro cálcico; A/Z = 0,44 (réplica de carbón).

Si se aceleran las reacciones de hidratación, se forma muy rápidamente una disolución fuertemente supersaturada en los poros, lo cual favorece una formación espontánea de gérmenes y un aumento precipitado de cristales de las fases de la hidratación. En la segunda etapa de hidratación sólo pueden crecer con fibra larga pocos cristales de silicato cálcico hidratado, a pesar de que en este período se dispone de suficiente espacio para un crecimiento longitudinal semejante. La estructura de la pasta de cemento, formada con un endurecimiento acelerado, se halla constituida, por lo tanto, predominantemente por silicatos cálcicos hidratados de fibra corta. En la figura 6 se representa un ejemplo de esto, mostrando la estructura de una pasta de silicato tricálcico después de 7 días de endurecimiento, con una adición de 1 % en peso de cloruro cálcico como acelerante. La proporción de cristales de fibra larga, que pueden actuar como microrrefuerzo, es menor que en el caso de una hidratación normal o retardada.

Las resistencias tempranas son mayores con endurecimiento acelerado que con endureci-

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

miento normal. Sin embargo, esto sólo es debido al mayor grado de hidratación. Por consiguiente, se consigue también antes la hidratación total y con ello la resistencia definida.

Una comparación del desarrollo de la resistencia con endurecimiento normal, acelerado y retardado se halla representado en la figura 7. La mayor resistencia inicial con endurecimiento acelerado hay que atribuirla a la más rápida reacción del cemento con el agua del amasado. A los 28 días aproximadamente, ha concluido la hidratación. Con ello se ha alcanzado también la resistencia definitiva. Si el cemento se endurece en condiciones normales, se produce una resistencia inicial claramente menor, pero, sin embargo, a los 28 días aproximadamente se llega a una resistencia alta y parecida a la lograda con un endurecimiento acelerado; en este momento aún no ha concluido la hidratación, de tal forma que la resistencia continúa aumentando hasta los 90 días y más. El cemento que endurece con ayuda de retardadores posee las más bajas resistencias iniciales, pero, no obstante, entre los 20 y 30 días alcanza la resistencia del endurecimiento normal y del acelerado, y sobrepasa a éstos notablemente por conservación ulterior en agua (2).

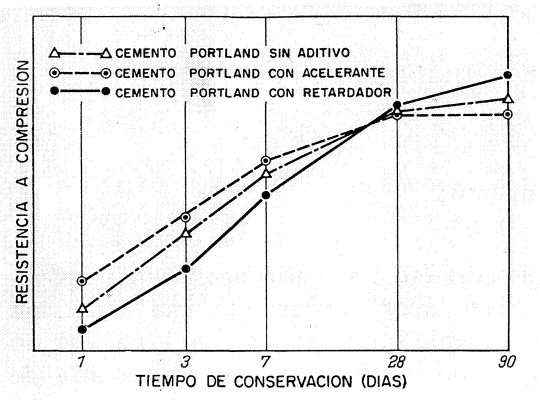

Fig. 7.—Desarollo de la resistencia de la pasta de cemento con endurecimiento normal, acelerado y retardado.

Estos análisis han demostrado que existe una buena relación entre el desarrollo de la estructura y la resistencia de la pasta de cemento. Altas resistencias iniciales son debidas, principalmente, a un alto grado de hidratación; y altas resistencias finales, a una densidad grande y a una clara proporción de silicato cálcico hidratado de fibra relativamente larga.

En esta representación sobre la relación entre formación de la estructura y desarrollo de la resistencia, parece ser que, en principio, no encajan los cementos con elevada finura de molturación, ya que el análisis al microscopio electrónico de pastas de PZ 475 mostraba la formación típica de la estructura para endurecimientos acelerados con productos de hidratación predominantemente de fibra corta. Sin embargo, de las pruebas mecánicas resultó que también la resistencia a los 90 días sobrepasaba la de un PZ 275 molido más grueso y con una composición de fases aproximadamente igual. Esto puede explicarse del siguiente modo: Al tener una mayor proporción de granos finísimos el PZ 475, puede lograrse una estructura de partida con una porosidad más finamente distribuida. Los huecos entre las partículas de cemento son menores que en la pasta de cemento de un PZ 275. Con una relación agua-cemento determinada hay, por lo tanto, suficiente número de fibras más cortas para el punteado de los poros a fin de formar una estructura sólida. Además, en la primera etapa de la hidratación (fig. 4) se forman más rápidamente los cristalitos de $Ca(OH)_2$, pero también como plaquitas menores, de tal forma que la acción separadora de estos cristales primarios repercute en menor medida. Cementos con mayor finura de molienda forman, para una determinada relación agua-cemento, debido a la

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

porosidad más finamente distribuida y la hidratación más rápida, una estructura más homogénea y más densa con una proporción menor de poros capilares que los cementos más gruesos, alcanzando, por lo tanto, una mayor resistencia final. A la inversa, para una determinada distribución granulométrica (finura de molido) se pueden disminuir los tamaños de los poros eligiendo una relación agua-cemento más baja, creándose fases hidratadas de fibra más corta para salvar los poros y desarrollándose, así, una estructura firme y densa que proporciona elevadas resistencias tanto iniciales como finales.

4. ENSAYOS PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA MEDIANTE REFUERZO CON FIBRAS

El hecho de aumentar la resistencia del silicato cálcico hidratado de fibra larga, impulsó a realizar ensayos para reforzar las pastas de cemento mediante adiciones de fibras ajenas.

Como material de fibras se utilizó, en principio, el perlón, con una longitud de corte de 6 a 10 mm y diámetros de 0,25 y 0,6 mm (densidad aproximada 1,0 g/cm^3). Estas fibras se mezclaron a un PZ 275 en cantidades de 1, 3 y 5 % en peso y se confeccionaron prismas de mortero de 4 × 4 × 16 cm para determinar la resistencia a la flexotracción y compresión. La resistencia a la flexotracción no se pudo mejorar por esta adición de fibras. En la figura 8 se representan las resistencias a la compresión en comparación con prismas exentos de fibras. De aquí se deduce que, con adiciones de hasta 3 % de peso, poco se pudo aumentar la resistencia a la compresión. Sin embargo, las probetas con 5 % de fibras de perlón no alcanzaron a ninguna edad la resistencia del mortero de base. Para justificar esto hay que observar que al fabricarse el mortero no se había logrado repartir uniformemente esta cantidad de fibra, como se pudo ver después en la superficie de rotura de los prismas. Además, casi todas las fibras asomaban hasta la mitad de su longitud en la superficie de rotura, es decir, no se habían fraccionado en el proceso de rotura. Como consecuencia de su bajo módulo de elasticidad, al aumentar la tensión en el mortero las fibras de perlón participaron en pequeña escala en la absorción de fuerza; con mayores deformaciones se dilataron más intensamente, por su contracción transversal adelgazaron más, de tal modo que la unión íntima o adherencia entre fibras y mortero quedó prácticamente anulada y las fibras se salieron del mortero en los puntos de rotura.

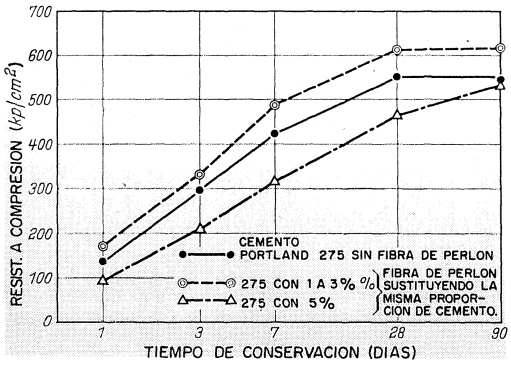

Fig. 8.—Resistencia a la compresión de morteros de cemento con diferentes adiciones de fibras de perlón.

En otra serie de ensayos, se probó la resistencia de prismas de mortero de 4 × 4 × 16 cm que contenían hasta 30 % en peso de fibras de vidrio al boro rico en SiO_2 y exento de álcalis. Las fibras tenían una longitud de 10 mm y un diámetro de 20 µ. El módulo de elasticidad de las fibras de vidrio al boro es notablemente mayor que el de la pasta de cemento. Además, las fibras de vidrio no se descomponen químicamente por el medio

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

intensamente alcalino de la pasta de cemento, como se comprobó con unos ensayos previos. Con ello parecían haberse cumplido algunas condiciones previas fundamentales para un refuerzo con fibras. La prueba de resistencia dio, sin embargo, como resultado, que con estas adiciones de fibras de vidrio no se pudo aumentar ni la resistencia a la flexotracción ni la resistencia a la compresión.

Este resultado sorprende en principio, si se le compara con el refuerzo logrado con fibras de vidrio en plásticos. También metales (6) y masas cerámicas (7) se pudieron reforzar claramente por adición de cristales en forma de fibras (Whisker), cuando el módulo de elasticidad de las fibras excedía esencialmente del de los metales o del de la masa cerámica. Pero en este caso pudo demostrarse que existía una unión íntima entre las fibras y la matriz circundante, lo que es una condición previa fundamental para una acción reforzadora de fibras.

Una unión íntima suficiente (adherencia entre fibras y pasta de cemento) no existía, sin embargo, en las probetas con adiciones de fibras de vidrio, como se aprecia en las superficies de rotura. Las fibras se habían salido de la matriz de la pasta de cemento sin romperse, de forma que su elevado módulo de elasticidad no pudo utilizarse para un aumento de la resistencia por un defecto en su adherencia.

Un refuerzo de la estructura de la pasta de cemento mediante fibras de materiales ajenas es, por consiguiente, únicamente posible si se cumplen las siguientes condiciones:

De acuerdo con la mecánica de la deformación bajo carga y de la mecánica del proceso de rotura de pasta de cemento y fibra, la fibra ha de tener un módulo de elasticidad esencialmente mayor que el de la pasta de cemento.

Las fibras se distribuirán uniformemente en la pasta de cemento.

La cantidad de fibras agregadas se proporcionará de forma que exista una multitud de fibras orientadas anárquicamente (en el esfuerzo de compresión sería más conveniente una orientación en dirección de la dilatación transversal y con esfuerzo de tracción en dirección del esfuerzo de tracción).

Entre fibra y pasta de cemento estará garantizada una buena adherencia, para que puedan ser eficaces la menor deformación y la elevada resistencia propia de las fibras.

Las fibras serán resistentes frente al medio ambiente alcalino de la pasta de cemento, ya que, en caso contrario, vuelve a anularse el efecto reforzador en el transcurso del tiempo. También la pasta de cemento húmeda conservará las propiedades que le favorecen en estado seco.

Una reacción parcial que se extienda uniformemente en sólo una capa superficial de las fibras de vidrio, podría mejorar el desfavorable efecto de adherencia observado en la pasta de cemento. Pero, en la práctica, un vidrio corriente químicamente menos resistente, no reacciona favorablemente y lo hace en diferentes puntos con distinta rapidez, de modo que se llega a fenómenos parecidos a la corrosión de metales, reduciendo notoriamente la resistencia de la fibra.

Un esfuerzo de la pasta de cemento por adiciones de fibras de materias ajenas, orgánicas o inorgánicas, se relaciona, por tanto, con condiciones previas especiales, que, hasta ahora, solamente pudieron cumplirse con fibras de amianto.

Un refuerzo prometedor de éxito de la pasta de cemento parece ser posible, no obstante, mediante fibras "de la misma raza", porque los productos de la hidratación del cemento

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://materconstrucc.revistas.csic.es

poseen, evidentemente, una adherencia mutua muy buena. Semejantes fibras se forman muy pronto si la pasta de cemento finamente molturada se vuelve a hacer reaccionar nuevamente con agua, como se muestra comparando las figuras 9 y 10. Una pasta de cemento almacenada en seco durante varios años preparada, con una relación agua-cemento 0,19, está compuesta, después de una molienda fina, de partículas de forma irregular (fig. 9), que según un análisis radiográfico son, en parte, fases hidratadas y, en parte, restos de clínker. Después de añadirles agua, estas partículas forman, al cabo de 10 a 30 minutos, productos de hidratación en forma de fibras (silicatos cálcicos hidratados y ettringita), que a menudo alcanzan longitudes de más de 10 μ (fig. 10). O sea, que si se agregara pasta de cemento molida en la fabricación del hormigón, en breve tiempo las fibras formadas podrían actuar como gérmenes inyectados (inoculados) en la hidratación y, en consecuencia, reducir el trabajo de formación de gérmenes y acelerar el endurecimiento. Además, por su longitud de fibra relativamente grande, representarían un microrrefuerzo elevador de la resistencia, que incrementa la resistencia definitiva (apartado 3.1.). Así pueden explicarse los resultados de Duriez y Lezy (8) y los de Balazs y colaboradores (9), quienes, por "inyección" de un hormigón de cemento Portland con 2 % en peso de pasta de cemento finamente molida (referida al peso del cemento), pudieron aumentar la resistencia inicial de 10 a 30 %, alcanzando una resistencia a los 90 días de 20 a 25 % mayor. Los ensayos correspondientes se realizarán probablemente en la segunda mitad del presente año en el Instituto de Investigaciones de la Industria del Cemento.

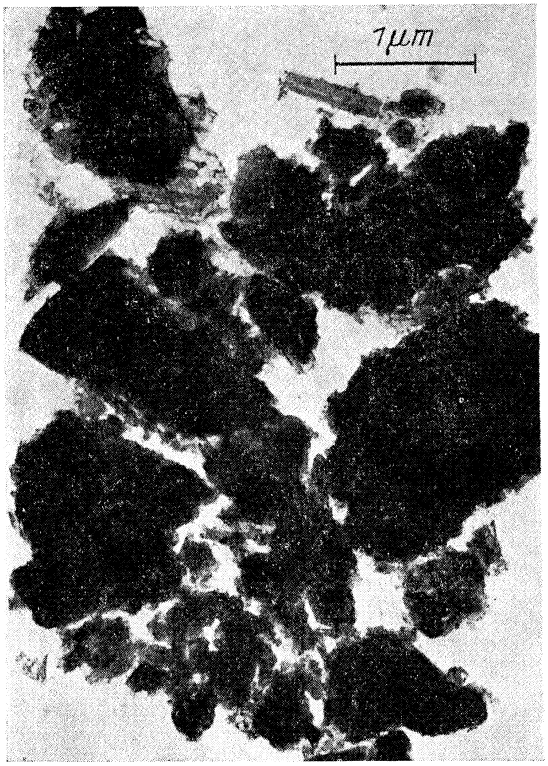

Fig. 9.—Fotografía al microscopio electrónico de la pasta de cemento (A/Z = 0,19) que, después de 5 años de conservación en seco, fue molida finamente (fotografía radioscópica).

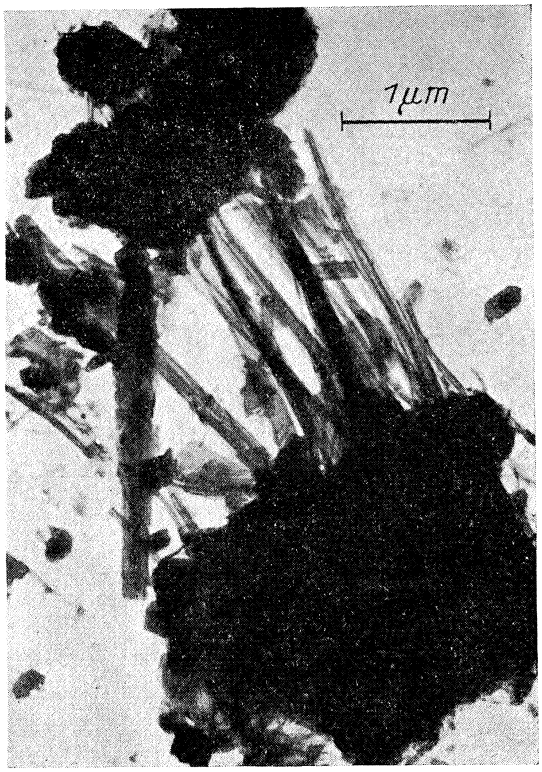

Fig. 10.—Fotografía al microscopio electrónico de la pasta de cemento finamente molida de la figura 9, después de un tratamiento con agua durante 15 minutos (fotografía radioscópica).

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

5. RESUMEN

5.1. En el análisis al microscopio electrónico de la estructura de la pasta de cemento se pueden distinguir tres fases de hidratación:

Inmediatamente después de añadirse agua al cemento, en la primera fase de la hidratación se forman hidróxido cálcico y ettringita. Después de aproximadamente una hora comienza, en una segunda fase de la hidratación, la cristalización de silicatos cálcicos hidratados de fibra larga. Juntamente con la ettringita acicular los silicatos cálcicos hidratados de fibra larga puentean o salvan microporos mayores, confiriendo a la estructura una cierta estabilidad.

En la tercera fase de la hidratación los huecos de los poros, aun existentes, se rellenan y reducen con la formación de silicato cálcico hidratado finamente cristalizado. Como consecuencia, la estructura básica se compacta y se aumenta la resistencia.

5.2. Si se retarda el endurecimiento por conservación a temperaturas más bajas o por adición de materias ajenas, la segunda fase de la hidratación se prolonga temporalmente. En consecuencia, se forma más silicato cálcico hidratado de fibra larga, y la resistencia definitiva es aproximadamente 20 % mayor que con endurecimiento normal. Si se acelera la reacción, la resistencia inicial es mayor, pero es menor la resistencia final, ya que, al acortarse las fases de la hidratación, se produce menos silicato cálcico hidratado de fibra larga.

5.3. Por adición de fibras y materias ajenas, sólo se puede aumentar la resistencia de la pasta de cemento si las fibras poseen un módulo de elasticidad más alto que la propia pasta de cemento y si entre ambos existe una buena unión íntima. Las fibras de perlón poseen un módulo de elasticidad demasiado bajo y, prácticamente, ninguna unión íntima. Las fibras de vidrio, o se atacan químicamente por la disolución alcalina de los poros de la pasta de cemento, o no producen una unión íntima suficiente si son resistentes químicamente. Por reacción de la pasta de cemento molido con agua se forman, dentro de 10 a 30 minutos, productos de hidratación de fibra larga. Por adición de tales fibras "de la misma raza" es posible que se aumente perceptiblemente la resistencia.

BIBLIOGRAFIA

(2) MTSCHEDLOW-PETROSSIAN, O. P. y TSCHERNJAWSKI, W. L.: *Influencia de bajas temperaturas en el proceso de hidratación de los cementos portland.*

(6) BRENNER, S. S.: *El caso para armaduras corrugadas.* Journal of Metals 14 (1962), págs. 809/811.

(7) HOFFMANN, U.: *Materiales cerámicos reforzados con fibras.* Ber. Dtsch. Keram. Ges. 43 (1966), n.º 5, págs. 337/345.

(8) DURIEZ, M. y LEZY, R.: *Nuevas posibilidades para asegurar el rápido endurecimiento de cementos, morteros y hormigones.* Annales I.T.B.T.P., n.º 9, 1956, pág. 138.

(9) BALAZS, G. J. KELEMEN y KILIAN, J.: *Nuevo método para acelerar el endurecimiento del hormigón.* Epitoayag (Budapest), n.º 10, 1958, págs. 326/331. Resumen en Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61), página 239.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es