6. La carbonatación.
7. La temperatura y humedad relativa del concreto.
8. La rugocidad y limpieza del refuerzo.
9. El recubrimiento de concreto.

La corrosión se inicia cuando llega a presentarse un fenómeno electro-químico de flujo de corriente eléctrica (28), conocido como la formación de una media celda, que se presenta en un tramo de la varilla, que puede ir desde 1.0 cm hasta 6.0 m o más. Uno de los extremos de este tramo actúa como cátodo donde ocurre la reducción electro-química y el otro como ánodo, que es donde se produce la oxidación electro-química, formándose óxido de fierro, el cual puede expandirse a ocupar de dos a casi siete veces el volumen del acero original (29).

El flujo de la corriente sólo es posible si existe un medio conductor eléctrico. El concreto seco y sin la presencia de sales no actúa como tal, pero cuando contiene sales solubles en cantidad suficiente, como son los sulfatos o cloruros y con la presencia de humedad se convierte en un efectivo electrólito capaz de conducir corriente eléctrica mediante el flujo de iones. Para que se produzca la corrosión es indispensable además, la presencia de oxígeno (28). Por lo tanto para que se produzca la corrosión es necesaria, simultáneamente, la presencia del electrólito, un medio húmedo y oxígeno.

La estructura, la distribución de los tamaños y la interconexión de los poros en la pasta de cemento, determinan la disponibilidad de oxígeno y de humedad en la superficie del acero. Ellos también determinan la velocidad de penetración de los iones cloro y de CO_2, los cuales son los dos causantes más comunes de la corrosión del acero embebido (30).

El concreto de cemento Portland, debido a su contenido de $Ca(OH)_2$ que se origina durante la hidratación del cemento, aumenta la alcalinidad a valores de pH mayores a 12.5 (4), creando un medio excelente para proteger al acero de la corrosión, forma una película protectora de óxido de fierro en la superficie del metal, que es pasivadora. Cuando se alcanzan valores de pH por abajo de 11.0, se destruye la película pasiva protectora.

Solamente cuando se presentan sales, ó cuando el recubrimiento de concreto del refuerzo se carbonata, alcanzando valores de pH de cerca de 9.0, se despasiviza la película protectora, se facilita la conducción eléctrica y se hace vulnerable el acero a la corrosión.

Existen diversas formas para mantener pasiva la película protectora, a saber:

1. Aplicando membranas o selladores del concreto que impidan la penetración del CO_2, de la humedad, del oxígeno o de iones cloro en el concreto.
2. Dando un tratamiento químico a la superficie del acero (galvanizado) o aplicando pinturas epóxicas anticorrosivas.
3. Aumentando la impermeabilidad del concreto a los líquidos y gases, haciéndolo más denso.

4. Instalando una protección catódica.
5. Adicionando al concreto aditivos inhibidores de la corrosión, minerales u orgánicos.

Todos los métodos anteriores requieren de un análisis de eficiencia-economía para tomar una decisión en su uso si se desea aumentar la vida útil de una estructura de concreto.

Por lo que se refiere al uso de aditivos, diversos productos químicos minerales u orgánicos, han sido evaluados como potenciales inhibidores de la corrosión, los cuales incluyen, entre los minerales, benzoato de sodio, nitritos, floruros y otros, aunque recientemente se han encontrado resultados contradictorios en el uso de nitritos de calcio.

C. Andrade y co-autores (31), encontraron que una adición de 3% de nitrito de calcio en peso del cemento protegía al refuerzo de la corrosión en concreto carbonatado.

Berke y Rosemberg (32), realizaron estudios sobre la efectividad del nitrito de calcio en concretos con distintas cantidades de cloruros. La eficacia del nitrito para evitar la corrosión está en función de la cantidad de cloruros, ya que entre mayor sea esta cantidad, mayor será el consumo de nitrito de calcio para inhibir la corrosión.

Sin embargo, Collepardi y co-autores (33) en sus investigaciones sobre especímenes de concreto agrietados sumergidos en agua de mar, la presencia de nitritos de sodio, que supuestamente inhibiría la corrosión, realmente hizo la corrosión por cloruro más severa. Entre más angosta sea la grieta, mayor tiempo se requerirá para que se presenten los efectos corrosivos. Puesto que el nitrito de sodio no afecta la difusión del cloro en especímenes de concreto sin grietas, es de esperarse, que el efecto negativo esperado del nitrito de sodio pueda presentarse aún en áreas no agrietadas pero a largos períodos de inmersión.

Hope y co-autor (34) en sus estudios preliminares, encontraron que una combinación 1:11 de nitrito de calcio y molibdato de sodio, mostraba ser más efectiva en la protección a la corrosión que el nitrito de calcio solo.

En ausencia de cloruros, la velocidad de carbonatación del concreto está en función de la porosidad y de la permeabilidad del concreto. En la Fig. 8 se presentan resultados obtenidos por M. Collepardi (35), en concretos de cemento Portland I, en un ambiente enriquecido de CO_2 y una humedad relativa del 75%, donde se puede observar que la velocidad de carbonatación del concreto se ve disminuida al bajar la relación A/C y también se ve disminuida la permeabilidad al agua y al aire, ingredientes necesarios para producir la corrosión. De aquí que cualquier aditivo capaz de reducir la porosidad y permeabilidad del concreto puede considerarse como un aditivo reductor de la corrosión. Por lo tanto, los aditivos superfluidificantes, son realmente reductores de la corrosión del acero, cuando se utilizan como super reductores de agua.

Se debe poner especial atención al uso de un aditivo potencialmente inhibidor de la corrosión del acero, para cada caso de exposición del concreto al CO_2, que en el agua o en el aire puede carbonatar el hidróxido de calcio, a la acción de cloruros o al curado en autoclave de los elementos de concreto, ya que este procedimiento reduce considerablemente la alcalinidad del concreto.

ADITIVOS QUE REDUCEN LA REACCION ALCALI-AGREGADO

La reacción álcali-agregado es un proceso físico químico en el cual ciertos agregados reactivos reaccionan con los álcalis presentes o inmigrantes a la masa del concreto. La reacción es expansiva y puede producir agrietamientos. La reacción más común es la de los álcalis con agregados silicosos.

En la reacción álcali-sílica se produce un gel que tiene las propiedades de tomar agua, expandirse y causar esfuerzos internos que originan agrietamientos y el deterioro progresivo del concreto.

La reacción álcali-sílica puede producirse por:

1. Un cemento que contenga suficiente cantidad de sodio y de potasio que pueda elevar el pH cuando el cemento se hidrata.

2. Un agregado reactivo que contenga sílice en una forma que pueda ser disuelta por soluciones con pH más altas que las del concreto común de 12.5 pH.

3. Los álcalis pueden ingresar al concreto en soluciones de agua desde el exterior.

Las soluciones actuales están orientadas a disminuir los ingredientes de la reacción. Si los agregados son reactivos, utilizando cemento bajo en álcalis con no más de 0.6%. Si el cemento es alto en álcalis se pueden utilizar cantidades apropiadas de suplementos cementantes como escoria granulada o puzolanas, éstas, por un lado disminuyen el porciento total de álcalis en el total del cementante y, tomando algo del hidróxido de calcio, bajan la alcalinidad. En cualquier caso, deberá verificarse la eficacia realizando las pruebas recomendadas por ASTM C 441.

Se han reportado importantes reducciones en los efectos de la reacción utilizando como aditivo sales solubles de litio, bario o sodio. Debido a la limitada información en el uso de estos aditivos, el Comité ACI 212-91, no tiene una práctica recomendada y sugiere que cualquier usuario de estos aditivos deberá ensayarlos ampliamente antes de proceder a su uso en el campo.

Si con la presencia de agregados reactivos y los álcalis se llega a producir la reacción en donde es necesaria la humedad, un aditivo super reductor de agua, podría considerarse como reductor de los efectos de la relación álcali-agregado, en la medida en que al disminuirse la relación A/CM aumenta la impermeabilidad e ingresa menor cantidad de agua en el concreto, que es un ingrediente de la reacción y además la disminución en la relación A/CM aumenta la resistencia a las fuerzas expansivas de la reacción.

REFERENCIA

1. Ramachandran, V.S., and Mailvaganam, N.P. "New Developments in Chemical Admixtures". Advances in Concrete Technology CANMET. Editor: V.M. Malhotra. Ottawa, 1992. p.p. 859-898.

2. RILEM Technical Committee 84 AAC. "Guide for Use of Admixtures in Concrete". Materials and Structures Research and Testing. Vol. 25 No. 145, Jan./Feb. Paris, 1992. p.p. 49-56

3. "Superplasticizers in Concrete, Proceedings of an International Symposium". CANMET. Ottawa, 1978.

4. "Memoria. 4o Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto". Instituto de Ingeniería Civil, UANL. Monterrey, N.L., Marzo 1979.

5. "Concrete Admixtures Handbook, Properties Science and Technology". Noyes Publications. Editor: V.S. Ramachandran. Park Ridge, 1984.

6. "Proceedings, Third International Conference, Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete". ACI SP 119. Detroit, 1989.

7. "Admixtures for Concrete, Improvement of Properties". Proceedings of the International RILEM Symposium. Chapman and Hall. Barcelona, 1990.

8. Ratinov, V.B. and Rozemberg, T.I. "Anti-freezing Admixtures" Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology. Noyes Publication. Editor: V.S. Ramachandran. Park Ridge. pp 430-479.

9. Rukovodstov, P.P.B. and Protivomorznymi, D. "Manual of the Use of Concrete with Anti-freezing Admixtures. Stroyisdat, Moscow, 1978.

10. Betony, T.N.M., Mironov, S.A. and Lsgoya, A.V. "Frost Hardened Concretes". Stroyisdat, Moscow, 1974. pp. 263.

11. Hermite, R.L. "Volume Changes of Concrete" Proceedings of the Internationa Symposium on the Chemistry of Cement. Washington D.C., 1960. p.p. 659-694.

12. Ravina, D. and Shalon, R. "Shrinkage of Fresh Mortars Cast Under and Exposed to Hot Dry Climate Conditions". Proceedings RILEM/CEMBUREAU Colloquium on Shrinkage of Hydraulic Concretes. Vol. II. Madrid, March 1961.

13. Ravina, D. and Shalon, R. "Plastic Shrinkage Cracking". Journal of America Concrete Institute. Vol. 65. Detroit, 1968. p.p. 282-292.

14. "Concrete Technology". Longman Scientific and Technical. Editor: Neville, A.M. and Brooks, S.J. Essex. 1987. p.p. 239.

15. Odman, S.T.A. "Effects of Variations in Volume Surface Area Exposed to Drying, and Corrosion of Concrete on Shrinkage." International Colloquium on the Shrinkage of Hydraulic Concretes, RILEM/CEMBUREAU. Madrid, 1968. pp 1-20.

16. Verbeck, G.J. "Carbonation of Hydrated Portland Cement." ASTM Special Technical Publication No. 205. Philadelphia, 1958. pp. 17-36.

17. "Concrete Technology". Longman Scientific and Technical. Editor: Neville, A.M. and Brooks, S.J. Essex. 1987. p.p. 286.

18. Jackson, E.H. and Timms, A.G. "Evaluation of Air Entraining Admixtures for Concrete". Public Roads. Washington, D.C., 1954. p.p. 259-267.

19. Klieger, P. "Further Studies on the Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Aggregates." Highway Research Board Bulletin No. 128. Washington, 1956. pp. 1-19

20. American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Microscopical Determination of Air Void System in Hardened Concrete." ASTM Designation: 457-90. Philadelphia, 1992.

21. Powers, T.C. "Void Spacing as a Basic for Producing Air Entrained Concrete." Journal of American Concrete Institute Vol. 50. Detroit, 1954. pp. 741-60 and Discussion pp. 760.

22. Backstrom, J.E., Burrows, R.W., Mielenz, R.W., and Wolkodroff, V.E. "Origin, Evolution and Effects of the Air Void System in Concrete." Proceedings American Concrete Institute No. 55, Part 2, Influence of Type and Amount of Air Entraining Agent. Detroit, 1958. pp. 261.

23. Dolch, W.L. "Air Entraining Admixtures." Concrete Admixtures Handbook Properties, Science and Technology. Noyes Publications. Editor: V.S. Ramachandran. Park Ridge, 1984. pp. 292.

24. "Concrete Technology". Longman Scientific and Technical. Editor: Neville, A.M. and Brooks, S.J. Essex. First Edition. 1987. p.p. 291.

25. Rivera V., R. Air Entraining Admixtures Chapter. "State of the Art of Admixtures for Concrete". Reported by RILEM TC-84 AAC (Application of Admixtures for Concrete)". To be published by Chapman and Hall. London.

26. Philleo, R.E. "Freezing and Thawing Resistance of High Strength Concrete." Synthesis of Highway Practice 129. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. Washington, D.C. 1986. pp 31.

27. Cohen, M.D. Zhou, Y. and Dolch, W.L. "Non-Air Entrained High-Strength Concrete--Is it Frost Resistance" ACI Materials Journal, Vol. 89 No. 4. Detroit, 1992. pp. 406-415.

28. ACI 201 2R-82. "Guide for Durable Concrete." Detroit, 1982.

29. Ehrlich, S.G. and Rosemberg, A.M. "Methods of Steel Corrosion Control and Measurement in Concrete." Materials Science of Concrete II. The Ceramic American Society. Editor: Skalny, J. and Mindess, S. Westerville, 1991. pp. 201-240.

30. Rosemberg, A., Hansson, C.M. and Andrade, C. "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete."Materials Science of Concrete II. The Ceramic American Society. Westerville, 1991. pp. 285-314.

31. Alonso, C., Acha, M. and Andrade C. "Inhibiting Effect of Nitrites on the Corrosion of Rebars Embedded in Carbonated Concrete." Proceedings of RILEM TC-84 AAC International Symposium on Admixtures for Concrete, Improvement of Properties. Chapman and Hall. London, 1990. pp. 219-228.

32. Berke, N.S. and Rosenberg, A. "Calcium Nitrite Corrosion Inhibitor in Concrete." Proceedings of RILEM TC-84 AAC International Symposium on Admixtures for Concrete, Improvement of Properties. Chapman and Hall. London, 1990. pp. 251-268.

33. Collepardi, M., Fratesi, R., Moriconi, G., Coppola, L. and Corradeti, C. "Use of Nitrite Salt as Corrosion Inhibitor Admixture in Reinforced Concrete Structures Immersed in Sea-Water". Proceedings of RILEM TC-84 AAC International Symposium on Admixtures for Concrete, Improvement of Properties. Chapman and Hall. London, 1990. pp. 279-288.

34. Hope, B.B. and Ip, A.K.C. "Effect of Calcium Nitrite and Sodium Molybdate on Corrosion Inhibition of Steel in Simulated Concrete Environment." Proceedings of RILEM TC-84 AAC International Symposium on Admixtures for Concrete, Improvement of Properties. Chapman and Hall. London, 1990.

35. Collepardi, M., Fratesi, R., Moriconi, G. and Biagini, S. "The Use of Superplasticizer as Steel Corrosion Reducer in Reinforced Concrete." Proceedings of RILEM TC-84 AAC International Symposium on Admixtures for Concrete, Improvement of Properties. Chapman and Hall. London, 1990. pp. 269-278.

Raymundo Rivera Villarreal,
Jefe Depto. Investigación en Tecnología del Concreto, Fac. de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

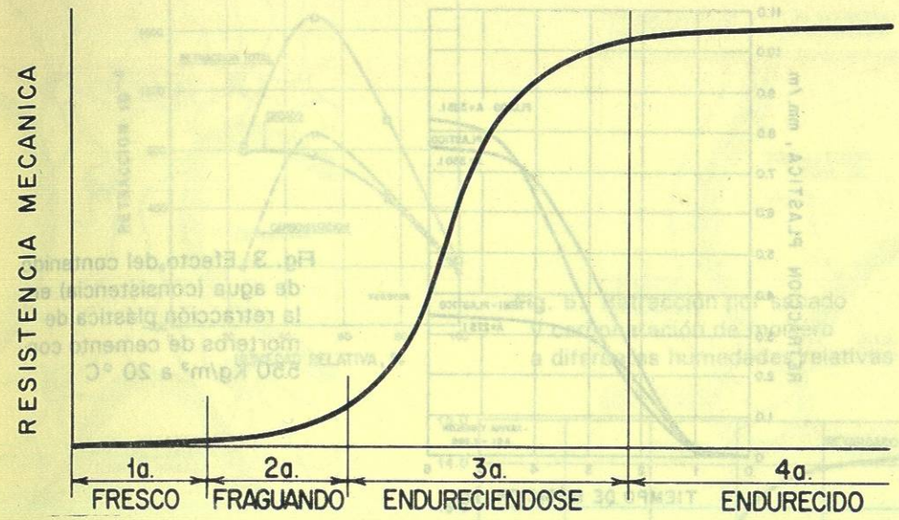

Fig. 1. Etapas de la vida del concreto

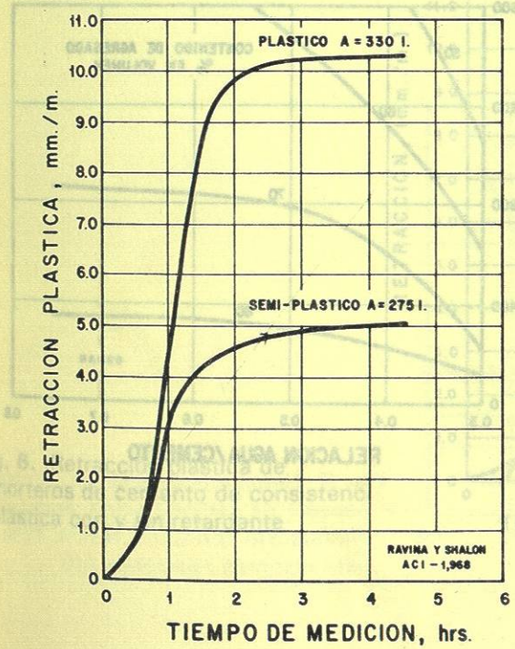

Fig. 2 Efecto del contenido de agua (consistencia) en la retracción plástica de morteros de cemento con 550 Kg/m³ a 30 °C.

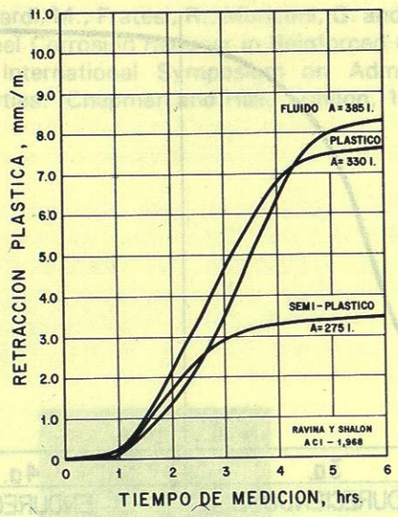

Fig. 3 Efecto del contenido de agua (consistencia) en la retracción plástica de morteros de cemento con 550 Kg/m³ a 20 °C

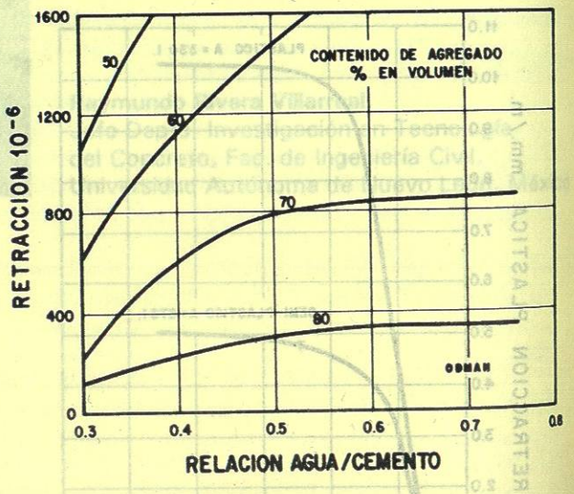

Fig. 4. Influencia de la Relación A/C y el contenido de agregado en la retracción

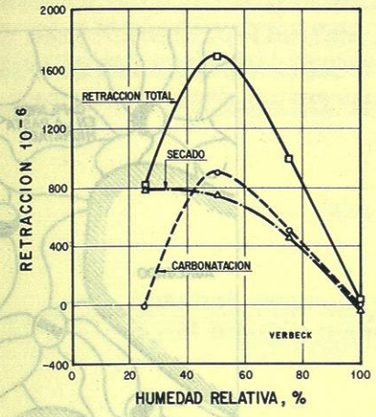

Fig. 5. Retracción por secado y carbonatación de mortero a diferentes humedades relativas

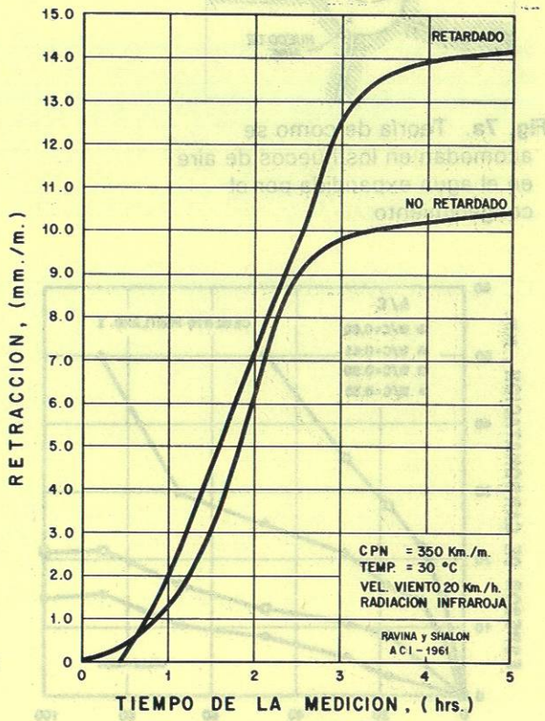

Fig. 6. Retracción plástica de morteros de cemento de consistenci plástica con y sin retardante

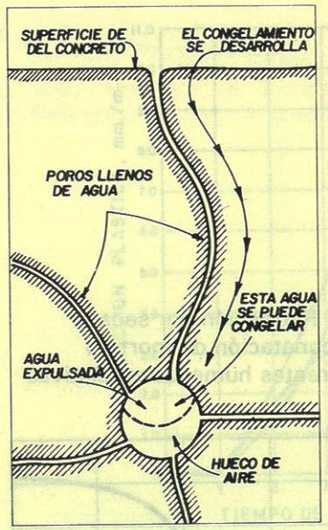

Fig. 7a. Teoría de como se acomodan en los huecos de aire en el agua expandida por el congelamiento

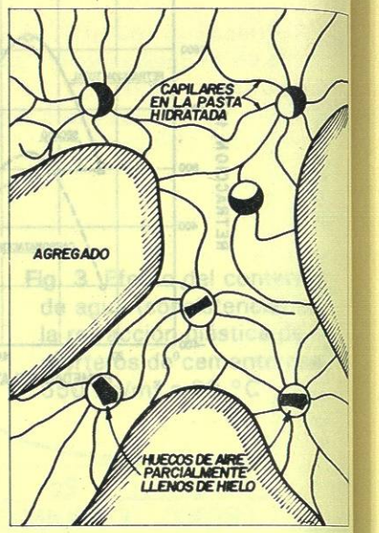

Fig. 7b Concreto congelado con inclusor de aire

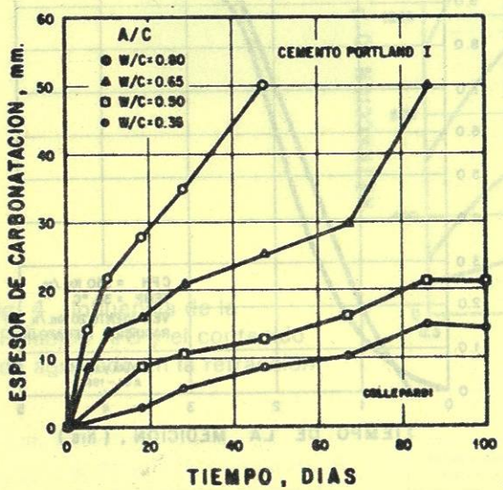

Fig. 8 Tiempo de exposición, contra espesor de carbonatación, ambiente enriquecido con CO_2 y H.R. = 75%, para distintas relaciones A/C