

Determinación de la velocidad de corrosión de la barra de refuerzo del hormigón armado mediante técnicas electroquímicas

Abel Castañeda, Francisco Corvo y Juan Meitín.*

*Departamento de Corrosión, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25, Playa, Apartado Postal 6414, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 10 de junio de 2003. Aceptado: 23 de diciembre de 2003.

Palabras clave: corrosión, relación agua/cemento, hormigón armado, técnicas electroquímicas.
Key words: corrosion, water/cement ratio, concrete reinforcement, electrochemical techniques.

RESUMEN. Se realizó un estudio de la velocidad de corrosión de la barra de refuerzo del hormigón armado durante un período de 20 meses. Para esto, se utilizaron diferentes técnicas electroquímicas, tales como la determinación de los potenciales de corrosión, curvas de polarización. La velocidad de corrosión fue obtenida a partir de los métodos de las pendientes de Tafel y de resistencia de polarización. Se dosificaron seis probetas con diferentes relaciones agua/cemento (0,4; 0,5; 0,66 respectivamente). Tres de ellas, se colocaron a la intemperie en una estación de ensayo de baja contaminación atmosférica y cada mañana fueron sometidas a una niebla salina simulada constituida por una disolución de cloruro de sodio 3 %, mientras las otras tres se mantuvieron por un período igual bajo inmersión en la misma disolución a temperatura ambiente en el laboratorio. Los resultados demostraron la diferencia que existe entre la probabilidad de ocurrencia del fenómeno bajo ambas condiciones mediante la determinación de los potenciales de corrosión clasificados según la norma ASTM(876-91) y la cinética del proceso. Se verificó también que para ambas condiciones (niebla salina e inmersión) el proceso de corrosión se hace más evidente a medida que aumenta la relación agua/cemento, así como que en presencia de la niebla salina, el fenómeno se pone de manifiesto de forma más agresiva que en inmersión. Se demostró además, el efecto de la lluvia en el lavado de los iones cloruro en la superficie y en el interior del hormigón en la probeta de relación 0,66 (agua/cemento) expuesta a la intemperie.

ABSTRACT. A study of the corrosion speed determination of the concrete reinforcement bar, during a measurement period of 20 months was carried out. For this purpose, the following electrochemical techniques were used: corrosion potentials determination and polarization curves. The corrosion rate was obtained by means of Tafel slope and polarization resistance methods. Six test specimens of different water/cement relationship (0.4, 0.5, 0.66) were prepared with the right amounts. Every morning three of them were placed in a test station of atmospheric low pollution under the action of a simulated saline fog using a 3 % sodium chloride solution and the other three were immersed for a similar period in the same solution and exposed at room temperature in the laboratory. The results demonstrated the difference between the phenomenon occurrence probability in both exposition conditions determined by means of the corrosion potentials classified according to the ASTM (876-91) Standard and the process kinetics. It was also checked for both conditions (saline fog and immersion), the corrosion process became more remarkable as long as it increases the water/cement ratio and in saline fog it was found that it is more aggressive than in immersion. Besides, that rain effect on the chloride leaching of concrete probes for the 0.66 (water/cement) ratio at the open environment was shown.

INTRODUCCION

La corrosión del acero de refuerzo del hormigón armado es un gran problema en todos los países, incluyendo a Cuba, ya que la gran mayoría de las edificaciones, puentes, industrias, etc. se construyen utilizando este material por su bajo costo. Este está compuesto por dos elementos fundamentales: concreto y acero de refuerzo. El primero, se compone de agua, cemento, agregado fino (arena) agregado grueso (gravilla) y aire. El segundo, por una aleación de acero de medio contenido de carbono.¹⁻²

En un principio se pensaba que este era un material de gran durabilidad, pero con el transcurso del tiempo comenzaron a surgir problemas que llevaron a la necesidad de protegerlo contra la corrosión, pues su interacción con el medio ambiente y su composición en numerosas ocasiones provocan una corrosión apreciable en el acero de refuerzo.

Cuba con un clima tropical húmedo, se caracteriza por tener más de la mitad del año temperaturas superiores a 25 °C y humedades relativas superiores al 80 %. Además de recibir la influencia de la salinidad que afecta prácticamente todo el territorio nacional,³ lo que favorece al proceso de corrosión, no solo del hormigón armado, sino de cualquier estructura metálica. La zona de mayor agresividad corrosiva del país es la costa norte. Se conoce que existen 180 000 viviendas en esta zona cuyo

estado es el siguiente: bueno, 80 000; regular, 60 000 y malo, 40 000.⁴

El estado actual de las secundarias básicas de Ciudad de La Habana en cuanto a su durabilidad es menor a la mitad de lo planificado debido a la corrosión de la barra de refuerzo del hormigón armado.

Los puentes constituyen estructuras de gran importancia económica, su reparación requiere un gasto apreciable. La del túnel de la Bahía de La Habana, costó \$5 800 000 USD, más la afectación provocada por su no funcionamiento durante un período de tiempo relativamente largo. Una parte importante de las pérdidas ocasionadas estuvieron también directamente relacionadas con el fenómeno de la corrosión.

El concreto confiere al acero de refuerzo una protección de doble naturaleza; por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido (disolución) encerrado en sus poros puede formar un óxido protector (pasivación) de forma duradera. Esta disolución está compuesta por iones OH^- que son aportados por $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH y KOH presentes en el material. A esta elevada alcalinidad y con el contenido de oxígeno normal del ambiente en las estructuras aéreas, el acero se recubre con una capa pasiva de óxidos muy adherentes, compacta e invisible, que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras el hormigón sea de buena calidad y no cambie sus características físico-químicas por la acción del medio exterior.⁵

Cuando las condiciones de servicio cambian el hormigón se altera ya que a través de él, penetran sustancias agresivas que producen el rompimiento de esta película, que genera como consecuencia el fenómeno de corrosión que consiste en la oxidación destructiva del acero por el medio que lo rodea formándose en el interior del hormigón una celda electroquímica con sus cuatro elementos principales: un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo donde ocurre la reducción, un conductor metálico donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones (barra de refuerzo) y un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por un flujo de iones en un medio acuoso.⁶

La corrosión de la armadura se desencadena con una triple consecuencia: el acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido; el hormigón puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejer-

ce con su expansión el óxido que se genera; la adherencia armadura-hormigón disminuye o desaparece.

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse, existen dos mecanismos que en general, son los más aceptados: reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido y por la acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia del oxígeno.⁷

Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el hormigón de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y tampoco es factible que se desarrolle el fenómeno con una velocidad apreciable. Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las armaduras están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando considerablemente el ataque. En los países fríos existe un gran problema de corrosión debido a la utilización de sales (cloruros) en el deshielo de las calles y puentes.

El objetivo de este trabajo fue hacer una comparación entre la norma ASTM (876-91) que establece un pronóstico en cuanto a la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión y la determinación de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas (curvas de polarización y resistencia de polarización). Estas dos técnicas tienen diferentes bases, pero ambas permiten calcular la velocidad de corrosión de los metales en un electrolito. De esta forma, son muy utilizadas para el control y seguimiento de la velocidad de corrosión. Cada técnica nos ofrece diferentes informaciones de acuerdo con sus características.⁵

MATERIALES Y METODOS

El ensayo experimental está referido solamente a la influencia de iones cloruros. Se dosificaron seis probetas con dos barras de acero de refuerzo de área igual a $78,6 \text{ cm}^2$ con un espesor de 2 cm de recubrimiento y tres diferentes relaciones agua/cemento. Esta relación fue dosificada según el método O'Reilly, que consiste en mantener constante la cantidad de cemento utilizado.⁸ Mediante este método se obtuvieron las relaciones 0,4; 0,5 y 0,66 agua/cemento respectivamente. Tres de ellas fueron colocadas a la intemperie

en una estación urbana de relativamente baja contaminación y fueron sometidas diariamente a una niebla salina en forma de aerosol obtenida a partir de una disolución de cloruro de sodio 3 % en horas de la mañana durante 20 meses, mientras las otras tres, fueron inmersas en la misma disolución durante un tiempo similar a temperatura ambiente en el laboratorio.

Las mediciones electroquímicas fueron ejecutadas con un equipo inglés (ACM Modelo Autofast DSP) acoplado a una computadora. El electrodo de referencia utilizado fue el de calomel ($\text{KCl}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Hg}$) y en los casos necesarios, se transformó a (Cu/CuSO_4) para clasificarlas según la norma ASTM(876-91) con respecto al potencial de corrosión.⁸ El electrodo auxiliar fue una de las barras de refuerzo siendo la otra utilizada como electrodo de trabajo. Entre el electrodo de referencia y el concreto se colocó una esponja fina con agua destilada para aumentar la electroconductividad del sistema.

Los ensayos electroquímicos realizados fueron: medición del potencial de corrosión, observando su variación con respecto al tiempo para ambas condiciones, clasificados de acuerdo con la norma antes mencionada; la cual establece que para potenciales más positivos que -200 mV existe un 10 % de probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión; entre -200 y -350 mV , un 50 % y más negativos que -350 mV , un 90 %. Las curvas de polarización se realizaron a continuación de las de potenciales. Las mediciones se efectuaron con un barrido de potencial desde 100 hasta -700 mV a una velocidad de 1 mV/s ; y para el método de resistencia de polarización, se utilizó una polarización de $\pm 10 \text{ mV}$ del potencial de corrosión.

RESULTADOS Y DISCUSION

Primeramente, se analizó la variación del potencial en el tiempo. Se pudo observar que la probeta que poseía la relación 0,66 (agua/cemento) de las sometidas a la niebla salina a la intemperie presentó potenciales de corrosión más negativos en comparación con las de relaciones 0,4 y 0,5 respectivamente (Fig. 1). Asimismo, se pudo apreciar que al segundo mes de efectuadas las mediciones, el potencial correspondiente a la primera (0,66) llegó a la zona de 90 %, mientras que para las segundas (0,4 y 0,5) los potenciales alcanzaron dicha zona al sexto mes de comenzadas las mediciones.

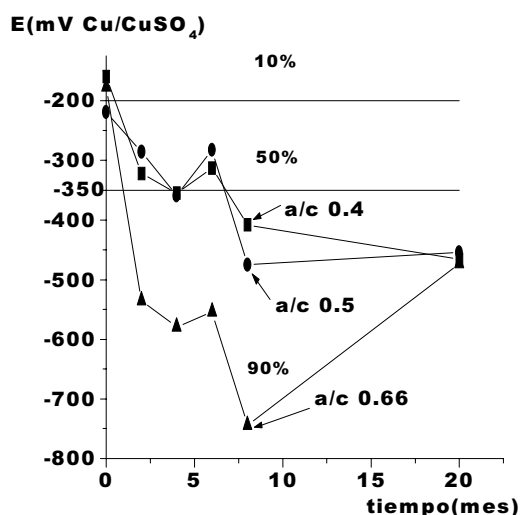


Fig. 1. Comportamiento de los potenciales de corrosión en el tiempo en niebla salina de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c). Se muestran los intervalos de potencial establecidos en la norma ASTM (876-91).

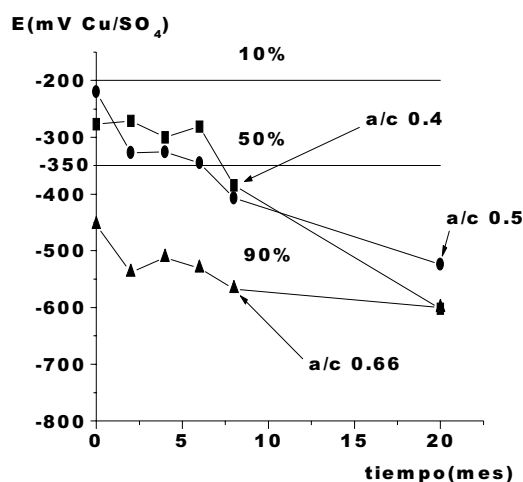


Fig. 2. Comportamiento de los potenciales de corrosión en el tiempo en inmersión de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c). Se muestran los intervalos de potencial establecidos en la norma ASTM (876-91).

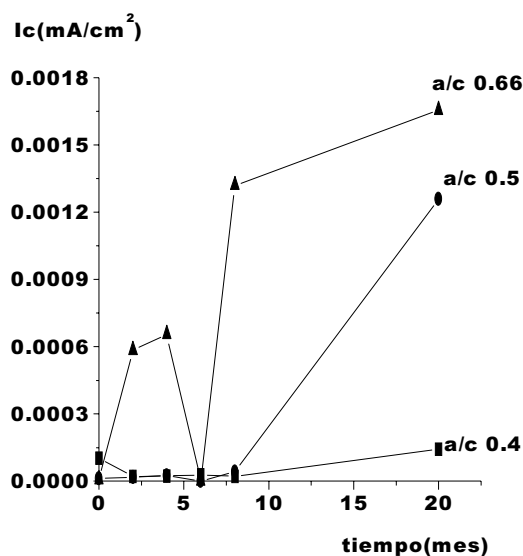


Fig. 3. Variación de las velocidades de corrosión con respecto al tiempo determinada por el método de las pendientes de Tafel en niebla salina de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c).

En el caso de las probetas sometidas a inmersión, la de relación 0,66 (agua/cemento) presentó también potenciales más negativos que las de relaciones 0,4 y 0,5 respectivamente (Fig. 2). En este caso, el potencial no varió tanto con respecto al tiempo como en aquellas sometidas a la niebla salina, sin embargo, desde el primer mes de comenzadas las mediciones, se notó que el potencial de la probeta de relación 0,66 (agua/cemento) se ubicaba en la zona de más del 90 % de probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión. Para las probetas de relaciones 0,4 y 0,5 los potenciales respectivos también llegaron a esa zona al sexto mes de comenzadas las mediciones al igual que lo hicieron los de las sometidas a la niebla salina.

Un análisis detallado permitió corroborar que la probeta de relación 0,4 (agua/cemento) sometida a inmersión presentó un potencial de corrosión más negativo que su homóloga en niebla salina, tanto en el primer mes de efectuadas las mediciones como en el último. En el caso de las probetas de relación 0,5 (agua/cemento) en ambas condiciones se observó que comenzaron con un potencial similar en la misma zona de probabilidad, pero en el segundo, cuarto y último mes de comenzadas las mediciones, los potenciales fueron más negativos dentro de la misma zona. Teniendo en cuenta lo anterior y de acuerdo con la norma ASTM (876-91) existe una mayor probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión en las probetas sometidas a la inmersión en la disolución salina con respecto a las tratadas con la niebla salina.

A partir de las curvas de polarización y la extrapolación respectiva de las pendientes de Tafel¹⁰ se pudo comprobar que para las probetas de las tres relaciones 0,4; 0,5 y 0,66 (agua/cemento) ubicadas a la intemperie y sometidas a la niebla salina se produjo un aumento de la velocidad de corrosión en el tiempo (Fig. 3), resultando mayor en la última, aunque al cabo del sexto mes de iniciadas las mediciones se apreció una disminución considerable en ella.

Un análisis similar para las probetas sometidas a la inmersión en la disolución salina igualmente demostró que la velocidad de corrosión en ellas también aumentó con respecto al tiempo y que la probeta de relación 0,66 (agua/cemento) presentó también la mayor velocidad de corrosión (Fig. 4).

Al comparar los resultados correspondientes a ambas condiciones, se observó claramente que las probetas de relaciones 0,5 y 0,66 (agua/cemento) sometidas a niebla salina, presentaron mayor velocidad de corrosión que las probetas sometidas a inmersión, en cambio, el comportamiento de las probetas de relación 0,4 resultó bastante similar. Esto contradice la norma ASTM (876-91), la cual establece que en la condición de inmersión hay una mayor probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión.

Otro resultado interesante que arrojó esta técnica es que el fenómeno de la corrosión presenta una dependencia mucho mayor en el proceso anódico en comparación con el catódico en el último mes de efectuada las mediciones. Las figuras 5 y 6 muestran la variación de las densidades de corrientes anódicas y catódicas en el potencial durante un período de 20 meses, donde en el punto donde se interceptan ambas corrientes este sería el valor de velocidad de corrosión extrapolado. Se observó que para las probetas sometidas a la niebla salina existe una mayor variación entre los valores de velocidad de corrosión con respecto a los correspondientes a las probetas sometidas a inmersión.

Se comprobó que el comportamiento de la velocidad de corrosión determinada empleando el método de resistencia de polarización resultó muy similar a la obtenida por el método analizado anteriormente (Figuras 7 y 8), lo cual demuestra que existe una equivalencia entre ambas técnicas para este caso. Además, los resultados obtenidos mediante esta técnica también contradicen la norma ASTM (876-91).

Es importante destacar que el factor que provocó la disminución considerable de la velocidad de corrosión en la probeta de relación 0,66 (agua/cemento) en niebla salina pudo estar relacionado con la cantidad de lluvia caída en ese mes (159,5 mm), lo cual provocó un excesivo lavado de la superficie del concreto y por consiguiente, una disminución de la concentración de iones cloruro¹¹ sobre ella (Fig. 9).

CONCLUSIONES

Al aplicar la norma ASTM (876-91) se observó que el pronóstico indica una mayor corrosión en las probetas sometidas a inmersión, sin embargo, la determinación de la velocidad de corrosión mediante los métodos de Tafel y resistencia de

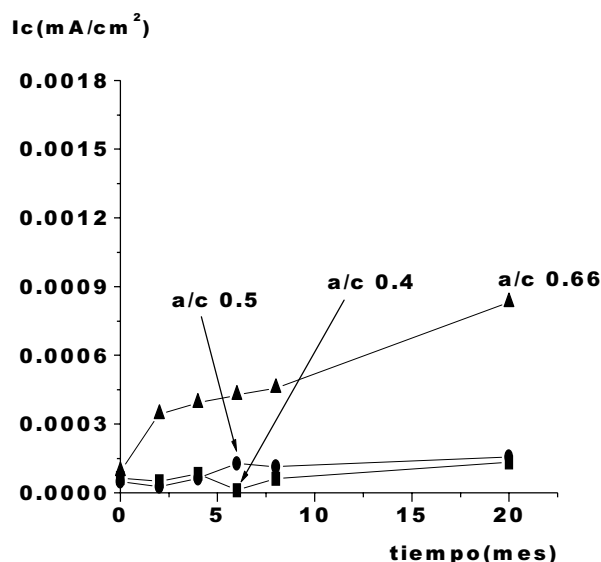


Fig. 4. Variación de las velocidades de corrosión con respecto al tiempo determinada por el método de las pendientes de Tafel en inmersión de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c).

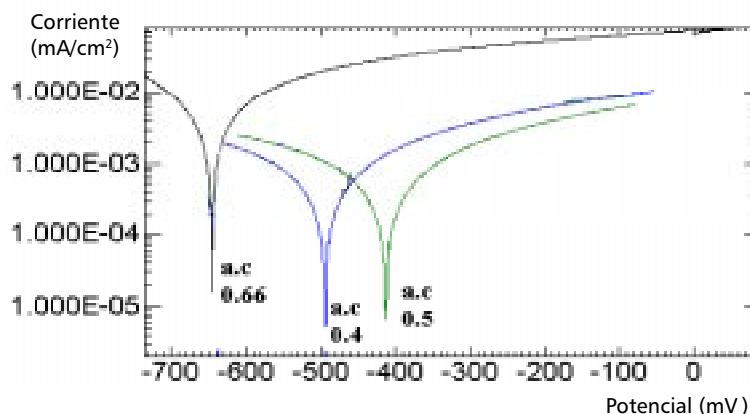


Fig. 5. Curvas densidad de corriente/potencial en un período de 20 meses de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c) en niebla salina.

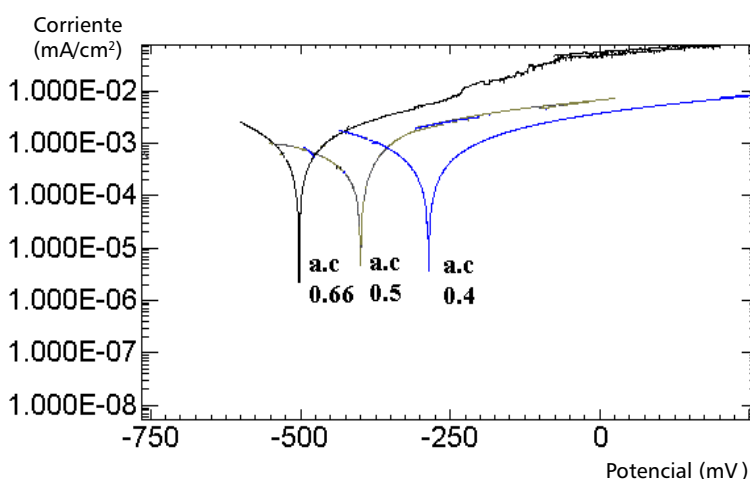


Fig. 6. Curvas densidad de corriente/potencial en un período de 20 meses de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c) en inmersión.

polarización demuestra que la mayor corrosión ocurre en las probetas sometidas a niebla salina.

No se observaron diferencias entre las técnicas utilizadas en cuanto al comportamiento de la ve-

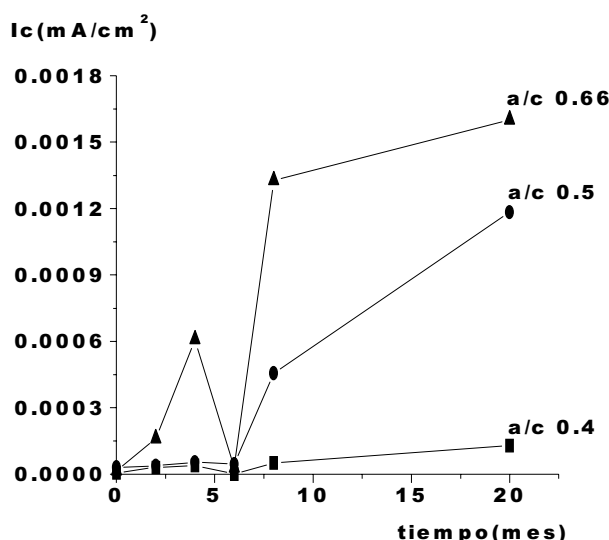


Fig. 7. Variación de las velocidades de corrosión con respecto al tiempo determinada por el método de Resistencia de Polarización en niebla salina de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c).

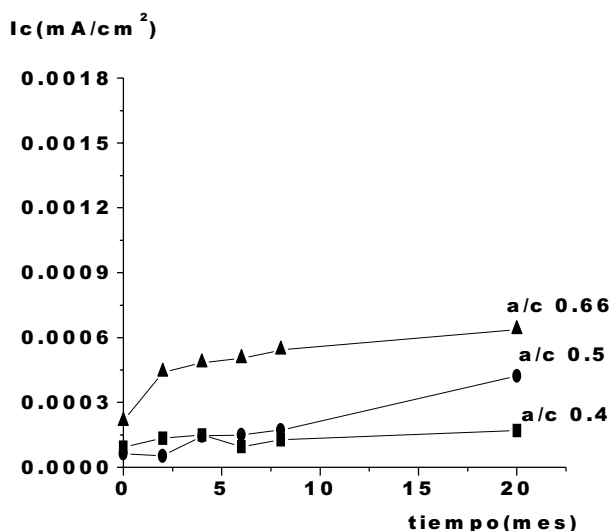


Fig. 8. Variación de las velocidades de corrosión con respecto al tiempo determinada por el método de Resistencia de Polarización en inmersión de probetas de diferentes relaciones agua/cemento (a/c).

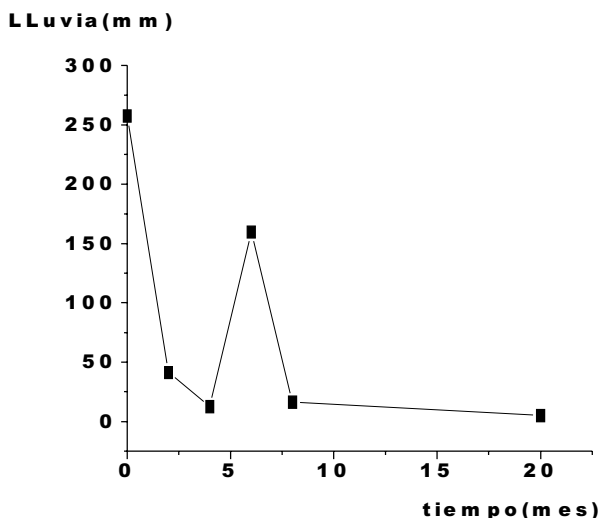


Fig. 9. Variación de la lluvia caída en el período de mediciones.

locidad de corrosión con respecto al tiempo.

Se confirmó el favorable efecto lavador de la lluvia a la intemperie sobre los agentes agresivos, tales como la salinidad en el caso del hormigón armado.

BIBLIOGRAFIA

1. Castro P. Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida Útil y Reparaciones. Capítulo 1. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1998.
2. Oladis Trocónis de Rincón *et al.* Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en estructura de Hormigón Armado. Capítulo 1. Proyecto CyTED, 1995.
3. Mendoza A.R., Corvo F. Outdoor and Indoor atmospheric corrosion of carbon steel, **Corrosion Science**, **41**, 75-79, 1999.
4. Corvo F., Betancourt N., Díaz J.C., Lariot C., León Y., Pérez J., Rodríguez O., Bricuyet E., Catalá F., Castro M., González R., Echevarría C., Lorente M., Ladrón de Guevara M.E. Segunda variante de Mapa Regional de Agresividad Corrosiva de la atmósfera de Cuba. Proceedings Primer Taller Internacional de Corrosión, CONACYT-CINVESTAV, Mérida, Yucatán, México, 23 al 28 de marzo de 1992.
5. Shalon R., Raphael M. Corrosion of Reinforcing Steel in Hot Countries, *Rilem. Bulletin*, No. 24, Paris, September, 1964.
6. Porbaix M. Lecciones de Corrosión Electroquímica. Capítulo 2. Instituto Español de la Corrosión. Madrid, España, 1987.
7. Erlin B., Verbek G.J. Corrosion of Metal in Concrete Needed. Research, Corrosion of Metals in Concrete. Chpt. 2. Publication, America Concrete Institute, Detroit, 1975.
8. O'Reilly V.A. Métodos para Dosificar Mezclas de Hormigón. Capítulo 2. Editorial Ministerio de la Construcción, Cuba, 1990.
9. Christiance J.A., Pourbaix M. Comptes. Rend 17th Conf. Stokolm, 82-84, 1953.
10. Domínguez J.A. Introducción a la Corrosión y Protección de Metales. Facultad de Procesos Químicos y Alimentarios. Capítulo 2. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". Empresa Nacional de Producción y Servicio de la Educación Superior, La Habana, 1987.
11. Castañeda A. y Corvo F. Cambios en la velocidad de corrosión del hormigón armado en dependencia del régimen de lluvia. Congreso Latinoamericano de Corrosión, Chile, 424-429, 2003.