ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE LA INTERFASE CONCRETO-ACERO POR MEDIO DE LAS TÉCNICAS MODULACIÓN DE FRECUENCIA ELECTROQUÍMICA Y PULSO GALVANOSTÁTICO

William Aperador [1,2], Orlando Fernandez[1]. Manuel Mora[1]. Ruby M. de Gutierrez[2]. Enrique Vera[1], Robinson de J. Torres[1].*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (1): 107-114

ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE LA INTERFASE CONCRETO-ACERO POR MEDIO DE LAS TÉCNICAS MODULACIÓN DE FRECUENCIA ELECTROQUÍMICA Y PULSO GALVANOSTÁTICO

William Aperador [1,2], Orlando Fernandez[1]. Manuel Mora[1]. Ruby M. de Gutierrez[2]. Enrique Vera[1], Robinson de J. Torres[1].*

1: Grupo de Superficies Electroquímica y Corrosión, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

2: Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

** E-mail: wiapch@yahoo.es*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 20-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

En el presente trabajo se muestra la aplicación de dos técnicas electroquímicas, Modulación de Frecuencia Electroquímica (EFM) y Técnica de Pulso Galvanostático (GPT) las cuales son utilizadas en el análisis de la transferencia de carga (velocidad de corrosión) en la interfase concreto – acero. El concreto portland tipo I fue sometido a carbonatación acelerada con el propósito de generar la despasivación del acero embebido en el concreto. Las técnicas utilizadas en este estudio fueron contrastadas obteniéndose buenos resultados frente a las técnicas convencionales, tales como: resistencia lineal a la polarización y curvas de polarización Tafel.

Palabras Claves: Técnicas electroquímicas, concreto portland, velocidad de corrosión.

Abstract

In the present work is the application of two technical electrochemical, electrochemical frequency modulation (EFM) (EFM) and technique of pulse galvanostatic (GPT) which are used in the analysis of the charge transfer (rate of corrosion) in the concrete – steel interface. The concrete Portland type I exposed to carbonation accelerated to generate despassivation of the absorbed steel in the concrete one. The techniques used in this study were resisted obtaining good results against the conventional techniques, such as: linear polarization measurements and potentiodynamic polarization behavior (Tafel).

Keywords*: two technical electrochemical, concrete Portland type I, rate of corrosion.*

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las barras de acero es la principal causa de daño y deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado. El acero embebido en un concreto de buena calidad es protegido del ambiente atmosférico por la alta alcalinidad de la solución del poro (pH>12.5) el cual, en la presencia de oxigeno, pasiva el acero. La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros "en ambientes marinos" o a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el CO2 atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto (pH≈8), desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo. [1,2]

La prevención y detección del deterioro de infraestructuras de concreto es uno de los mayores retos. Varias técnicas cuantitativas no destructivas basadas en métodos electroquímicos para medir la velocidad de corrosión han sido usadas para detectar la corrosión tempranamente. La técnica de pulso galvanostático se presenta como solución a problemas con la interpretación y calculo de parámetros electroquímicos, implementada en aplicaciones de campo hacia el año de 1988 en estructuras de concreto reforzado [3].

Para el estudio de la interfase concreto-acero, tomando como antecedentes la formación de macro celdas a causa de la coexistencia de áreas pasivas y activas en la misma barra de acero durante el proceso de corrosión, se propone la celda simple de Randles, modelo de circuito eléctrico equivalente a la celda electroquímica de la interface mencionada, como fundamento de la técnica de pulso galvanostático en la toma de los parámetros electroquímicos [1,4].

Los resultados logrados por la técnica de pulso galvanostático con este prototipo, muestran valores de velocidad de corrosión que se confrontara con los conseguidos mediante técnicas convencionales tales como: Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) y curvas de polarización Tafel. Las técnicas electroquímicas son muy importantes para la evaluación del deterioro del material analizado; existe diversidad de técnicas pero las más utilizadas son las no destructivas tal como LPR, la desventaja de esta técnica es que, por si sola entrega un valor aproximado de la resistencia a la polarización, ya que el sistema permanece en cuasi equilibrio termodinámico debido a los pequeños voltajes que se le aplican ± 20mV; y para entregar un valor de velocidad de corrosión es necesario suponer o conocer por tabulación las pendientes catódicas y anódicas del proceso. Para poder conocer estas pendientes y poderlas tabular en muchos de los casos se utiliza la técnica de curvas de polarización Tafel en donde se saca al sistema del equilibrio, se pasiva el material y luego se oxida, sacrificando una muestra para poder obtener unos valores necesarios en la técnica LPR [5,6]. Teniendo en cuenta los problemas expuestos anteriormente planteamos como solución la implementación de la técnica Modulación de Frecuencia Electroquímica (EFM), propuesta por Walter Bogaerts en la universidad de Leuven (Bélgica), la cual genera los valores de velocidad de corrosión sin conocer previamente los valores de pendientes Tafel catódica y anódica, además, es una técnica no destructiva y su prueba se realiza en un tiempo similar al utilizado en la técnica LPR [7,8,9].

TRABAJO EXPERIMENTAL.

2.1 Muestras de concreto y Ensayos

Como cementante se utilizó un cemento Pórtland ordinario Tipo 1. Las características del material utilizado para preparar la mezcla se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Características del material para preparar la mezcla.

Cemento	**Tipo I, gravedad especifica 3.15**
Grava	Peso especifico: 3 Absorción: 5.5% Peso unitario seco 1,117% kg/m^3
Arena	Peso especifico: 2 Absorción 4.7% Modulo de finura: 2.64

El proceso para la medición del avance de la corrosión por la inclusión de dióxido de carbono se hizo en una cámara de carbonatación a condiciones controladas (3%CO_2, 65% humedad relativa y una temperatura de 20ºC). Para comparar los resultados obtenidos por la carbonatación se realizaron medidas a probetas expuestas al ambiente con las siguientes condiciones 68% humedad relativa, 28ºC y 0.03% CO_2. Las medidas electroquímicas se realizaron para los concretos OPC carbonatado y sin carbonatar las mediciones se realizaron a tiempos de 0, 350, 700, 1050, 1700 y 2600 horas.

2.2 Medidas electroquímicas

La caracterización electroquímica se realizó en un potenciostato / galvanostato Gamry modelo PCI 4 mediante las técnicas resistencia lineal a la polarización y curvas de polarización (Tafel). Las técnicas de pulso galvanostatico y Modulación de Frecuencia Electroquímica se evaluaron mediante un potenciostato / galvanostato Tekcorr modelo TG 4.

Todas las pruebas electroquímicas fueron hechas bajo inmersión en una solución de agua destilada, empleando una celda compuesta por un contraelectrodo de grafito, un electrodo de referencia de Ag/AgCl y como electrodo de trabajo se utilizó el acero estructural ASTM A 706 con un área expuesta de 10cm^2. La figura 1 esquematiza el montaje de la prueba.

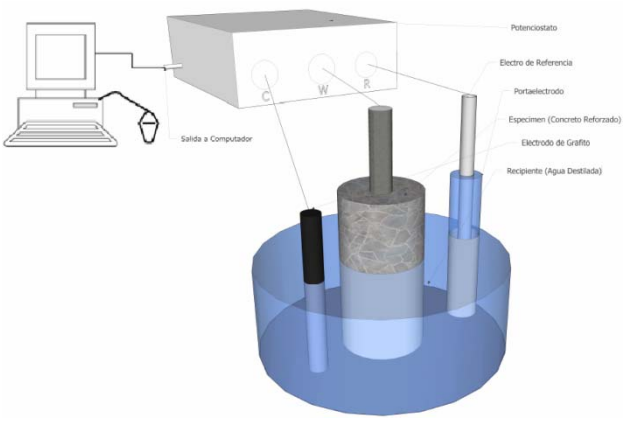


Figura 1. Montaje experimental para la realización de las medidas electroquímicas.

2.1.2 Resistencia de Polarización Lineal (LPR).

Consiste en la aplicación de un potencial pequeño (±20mV), alrededor del voltaje del Electrodo de Referencia o Potencial de Reposo, con el fin de no causar efectos en el sistema electroquímico, el objetivo de este procedimiento es determinar la Resistencia a la Polarización *Rp*, la cual es la pendiente de la curva Voltaje Aplicado vs. Corriente en la celda, este valor en sí es uno de los parámetros útiles en el cálculo de la velocidad de corrosión en los sistemas, pero por sí solo, da únicamente información cualitativa de la celda.

2.1.3 Curvas de Polarización Tafel. Es similar a la prueba LPR pero aquí la excitación de voltaje se extiende entre ±200mV con respecto al potencial de reposo, la gráfica se presenta de manera semilogarítmica de la forma Log I vs V, el modelo que es usado para los procesos de corrosión asume que las ratas de los procesos anódico y catódico son controlados por la cinética de las reacciones de transferencia electrónica en la superficie del metal, que es el caso general de las reacciones de corrosión.

2.1.4 Pulso galvanostatico. La GPT Es una técnica no destructiva de polarización transitoria, trabajada en el dominio del tiempo. Un pulso transitorio de corriente anódica es impreso galvanostáticamente sobre el acero desde un contra electrodo ubicado en el electrolito. La corriente usualmente aplicada es del rango de 100 a 200μA y la durabilidad de este es aproximadamente de 10 segundos. La polarización del acero se da en dirección anódica con respecto al potencial de corrosión del equilibrio del mismo. Cuando se aplica una corriente constante (Iapp) al sistema, un potencial intermedio óhmico varia y además se presenta una ligera polarización en el acero. Bajo la consideración que un circuito simple Randles describe el comportamiento transitorio del acero, donde el potencial V(t), para un tiempo **t** puede ser expresado como:

$$V(t)=I_{app}\left[R_p\left[1-\exp\left(\frac{-t}{R_pC_{dl}}\right)\right]\right]+R_\Omega \qquad (1)$$

Donde Rp= resistencia a la polarización

Cdl= capacitancia de la doble capa

RΩ= Resistencia óhmica

El orden para obtener los valores de Rp, Cdl y resistencia óhmica RΩ tienen que ser evaluados con base a los valores experimentales. Dos métodos diferentes, una linealización y una curva exponencial son propuestos.

2.1.4 Modulación de Frecuencia Electroquímica (EFM). La técnica EFM es un método alternativo para el monitoreo de la velocidad de corrosión en diferentes materiales conductores. Esta técnica utiliza dos señales de voltaje AC a diferente frecuencia aplicadas simultáneamente a la misma celda. Como la corriente es una función no lineal del potencial, el sistema responde de igual manera a la excitación del potencial, debido a que obtenemos como respuesta una medida de corriente, en dicha respuesta están conjuntamente involucradas las componentes de suma, diferencia y múltiplos de las frecuencias de entrada [6,7,10]. La ventaja de la técnica EFM es la utilización de los factores de causalidad, los cuales pueden verificar los datos experimentales, además halla los valores exactos de la densidad de corriente de corrosión, la corriente de corrosión y las pendientes Tafel catódica y anódica, a diferencia de la técnica convencional LPR en la cual se tienen que obtener los parámetros (Tafel) de forma indirecta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

3.1 Resistencia a la Polarización

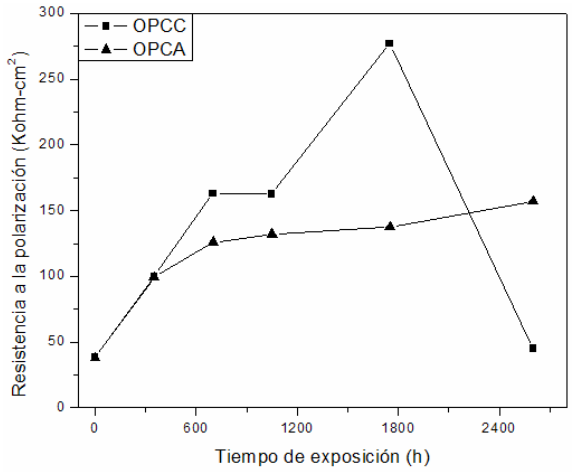


Figura 2. Resistencia a la polarización del concreto OPC con y sin exposición a carbonatación acelerada.

Con el concreto evaluado se observa que las medidas realizadas a las 350 horas tanto el expuesto a condiciones naturales como aceleradas muestran un comportamiento similar; debido a que sus valores de resistencia a la polarización son análogos. Luego de este tiempo se observa que el mejor desempeño en cuanto a resistencia a la polarización lo da el concreto expuesto a condiciones aceleradas esto se debe al hecho de que se tienen unas condiciones controladas donde la variación es mínima y se puede generar una buena condición para la conformación de la capa pasivante del acero, debido a que las reacciones de hidratación del concreto se siguen generando debido a que si existen unas condiciones de humedad relativa apropiadas estas reacciones que siguen ocurriendo generando una buena formación de capa protectora sobre la superficie del acero gracias a la presencia de especies alcalinas, como son KOH, NaOH y Ca(OH)2, igualmente existe un taponamiento de poros debido al ingreso de CO_2, los cuales ayudan a la generación de una buena resistencia a la polarización. La resistencia a la polarización sigue aumentando hasta las 1800 horas de exposición en especial para el concreto expuesto a CO_2 esto se debe a que en este tiempo el CO_2 ha ingresado más en el concreto pero aun no ha alcanzado la interfase concreto - acero. A las 2600 horas el ingreso del CO_2 ha llegado a la interfase concreto acero y destruyo parte de la capa de pasivación protectora generando valores de resistencia a la polarización cercanos a los hallados en tiempo de 0 horas de exposición. Los concretos de portland ordinario expuestos a condiciones de ambiente natural generan un incremento de la resistencia a la polarización a medida que se evalúa en el tiempo de exposición sin exposición a CO_2 acelerado, este incremento gradual pero pequeño comparado con el expuesto a condiciones aceleradas muestra que la variación de la humedad relativa es indispensable para que se sigan generando las reacciones de hidratación del cemento las cuales ayudan a la obtención de una capa con mejores propiedades protectoras.

3.2 Curvas de Polarización Tafel

Este ensayo se realizo en las probetas de OPC a diferentes tiempos con y sin exposición a CO_2, el nivel 0 indica las 0 horas; luego se realizo una medida a las 700 h con y sin exposición, la última medida se realizo a las 2600h tiempo en el cual se encontró la carbonatación de las probetas sometidas a exposición acelerada de CO_2. Indicando el proceso de formación de la película pasiva en el acero. Estas tendencias coinciden con lo observado en los ensayos de LPR.

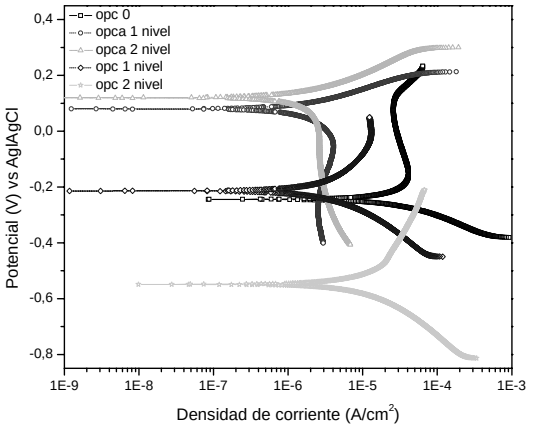


Figura 3. Curvas de polarización Tafel del concreto OPC con y sin exposición a carbonatación acelerada.

En las curvas de polarización de los OPC expuestos a CO_2 y ambiente, se puede observar que los concretos que mejor desempeño tienen frente a fenómenos de degradación son los que se coloco en un ambiente natural, debido a que muestran potenciales más nobles (positivos) y además, densidades de corrosión menores lo cual indica que la velocidad de corrosión es menor para este medio, los OPC expuestos a CO_2 muestran una disminución

en la corriente de corrosión cuando su evaluación se ha hecho a las 2600 horas frente al evaluado a las 0 horas, lo cual indica que el proceso de carbonatación afecta el material, pero no en su totalidad debido a que al aumentar el tiempo la capa pasivante se está generando de forma más compacta, lo cual evita que cuando el material se carbonate el acero empiece su proceso de degradación de forma acelerada, debido a esto encontramos valores de densidad de corriente de corrosión por debajo del hallado a 0 horas, debido a que a 0 horas la formación de esta capa pasivante no se ha generado.

Tabla 2. Valores de los parámetros hallados mediante las técnicas de polarización Tafel.

		Ecorr (Voltios)	Rp(KΩ-cm^2)	Icorr (μA)	Vcorr (mpy)
OPC 0	0 horas	-0,246	40,216	4,168	0,192
OPC nivel 1	700 horas	-0,148	171,416	0,575	0,026
OPC nivel2	2600 horas	-0,607	47,64	1,458	0,067
OPCA nivel1	700 horas	0,054	139,47	0,270	0,012
OPCA nivel2	2600 horas	0,173	165,71	0,353	0,016

3.3 Pulso Galvanostático.

Las mediciones electroquímicas realizadas con esta técnica se genero para cada uno de los 6 niveles evaluados con las probetas carbonatadas y sin carbonatar las mediciones se realizaron a tiempos de 0, 350, 700, 1050, 1700 y 2600 horas. La utilización de esta técnica en la evaluación de la corrosión de las barras de acero embebidas en el acero data del año 2001 cuando J.A. Gonzalez et al [11], utilizaron por primera vez esta técnica para evaluar la velocidad de corrosión on situ, esta técnica fue contrastada con los otros procedimientos electroquímicos aceptados para este material generando buenos resultados; este trabajo de investigación presentado en este artículo es el primero realizado en Colombia, esto se debe principalmente a que no existen los equipos necesarios para la utilización de esta técnica.

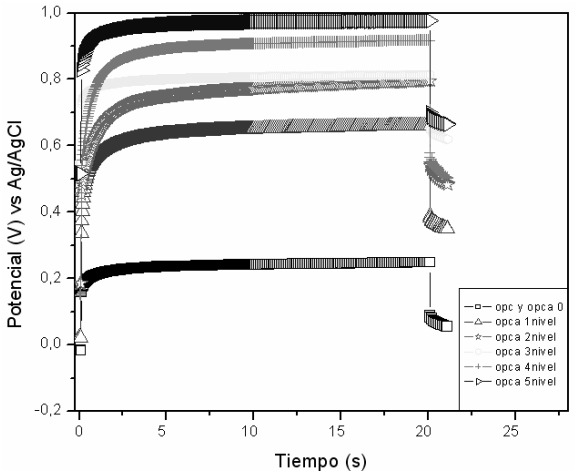


Figura 4. Pulso galvanostático del concreto OPC sin exposición a CO_2

La grafica 4 muestra el potencial Vs tiempo, en el ensayo se utilizan tres tiempos 1) tiempo de retardo: el cual es el correspondiente al tiempo necesario para calcular el potencial de corrosión; 2) tiempo de duración de pulso: es el que genera el pulso en donde se obtienen los parámetros para calcular la velocidad de corrosión; 3) tiempo de espera: es el correspondiente al que genera el capacitor.

Al analizar la grafica 4 podemos encontrar que la respuesta de los pulsos galvanostáticos nos muestran que los concretos expuestos a condiciones de carbonatación generan una medida de potencial por encima del evaluado a las 0 horas indicando que la velocidad de corrosión en cada uno de los casos es menor, debido a que los valores de resistencia a la polarización hallados con esta técnica tienden a aumentar en cada uno de los niveles evaluados. Se observa que la tendencia en cada uno de los casos es aumentar el valor de resistencia a la polarización (Tabla 3), hasta el cuarto nivel evaluado; debido a que en el quinto el cual corresponde a las 2600h el valor de resistencia a la polarización disminuye considerablemente por lo tanto el valor de corrosión para este caso aumenta llegando a valores cercanos al hallado para el concreto evaluado a las 0 horas, esto tiene una justificación igual a la hallada en la técnica de resistencia a la polarización lineal en donde se observa que a las 2600h el concreto tiene un menor valor debido a la inclusión del CO_2 hasta la interfase concreto – acero, generando la despasivación de la superficie de acero y así aumentando la velocidad de corrosión.

Tabla 3. Resultado del GPT utilizado para el concreto OPCA sin CO_2.

	RΩ (Ω)	Rp (KΩ*cm2)
OPCA 0 nivel	189	32,4
OPCA 1 nivel	492	94,5
OPCA 2 nivel	162	121,1
OPCA 3 nivel	372	132,45
OPCA 4 nivel	545	147,9
OPCA 5 nivel	448	177,8

Para el caso del concreto sin carbonatación se observa un aumento gradual en la resistencia a la polarización (Tabla 4) esto se puede observar en la figura 5 en donde se observa que en cada uno de los casos el potencial en función del tiempo es cada vez mayor indicando el aumento del parámetro electroquímico (Rp), por lo tanto se puede encontrar una disminución gradual en la velocidad de corrosión.

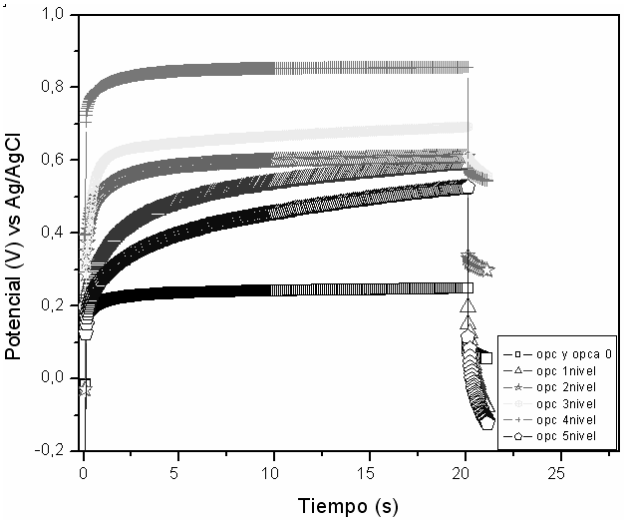


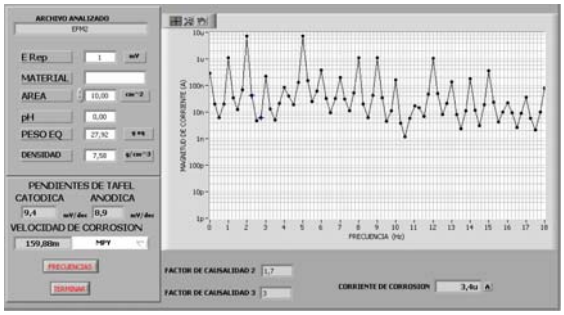
Figura 5. Pulso galvanostático del concreto OPC con exposición a CO_2

Tabla 4. Resultado del GPT utilizado para el concreto OPCC con CO_2.

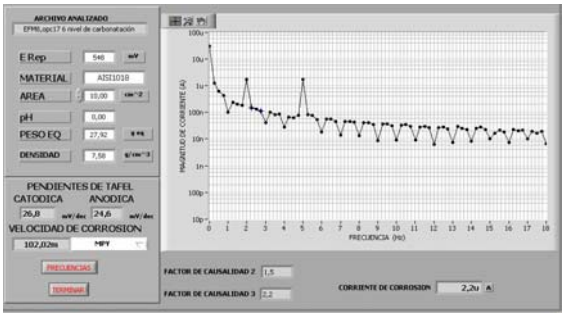
	RΩ (Ω)	Rp (KΩ*cm2)
OPCC 0 nivel	189	32,4
OPCC 1 nivel	742	78,6
OPCC 2 nivel	342	98,4
OPCC 3 nivel	324	100,3
OPCC 4 nivel	309	112,6
OPCC 5 nivel	307	46,32

3.4 Modulación de frecuencia electroquímica

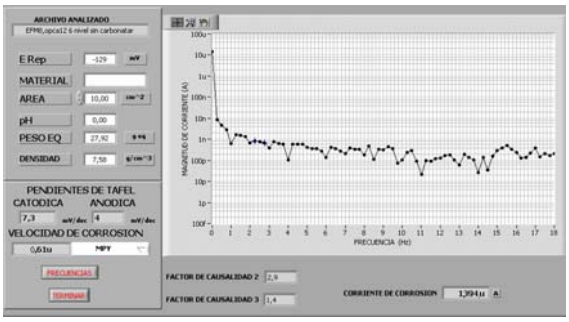
El fundamento matemático de la técnica de Modulación de Frecuencia Electroquímica (EFM), al igual que las técnicas convencionales tales como curvas de polarización Tafel, LPR entre otras, parte de la ecuación fundamental de la electroquímica o ecuación de Butler-Volmer. Lo novedoso de esta técnica es que genera los valores de velocidad de corrosión sin conocer previamente los valores de pendientes Tafel catódica y anódica, además, es una técnica no destructiva y su prueba se realiza en un tiempo similar al utilizado en la técnica LPR.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Espectros de EFM a) OPC con y sin carbonatación a 0 horas b) OPC carbonatado a 2600h c) OPC sin carbonatar a 2600 h.

En la figura se observa los espectros correspondientes al concreto con y sin carbonatación, en la figura 6a se observa el espectro para el concreto OPC a 0 h, el cual corresponde a ambos concretos debido a que en este nivel ambos están a las mismas condiciones, en la figura 6 b, se encuentra el espectro del concreto OPC totalmente carbonatado, en la figura 6 c, se observa el concreto OPC sin carbonatación en el ultimo nivel de carbonatación, como se puede observar este valor de velocidad de corrosión es el menor en comparación a las demás figuras mostradas en la técnica EFM.

Los demás espectros correspondientes a los otros niveles tanto para el concreto carbonatado como el no carbonatado no se muestran debido a que la información se tabula en las tablas X y X , en donde se observa que para el concreto OPC carbonatado se mantiene una tendencia de disminuir los parámetros electroquímicos en especial la corriente de corrosión y la velocidad de corrosión estos valores empiezan a decaer a medida que se evalúa en el tiempo hasta el sexto nivel en donde el CO_2 ha llegado hasta la interfase y ha generado la despasivación del acero.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos hallados con la técnica EFM para el concreto OPC carbonatado.

	OPC C 0 nivel	OPC C 1 nivel	OPC C 2 nivel	OPC C 3 nivel	OPC C 4 nivel	OPC C 5 nivel	OPC C 6 nivel
βc(mV/decada)	40,7	48	32	21	19	18	17,8
βc(mV/decada)	38,8	35	29	27	26	17	11,8
Icorr(µA)	6,9	6,2	5,6	4,3	3,1	2,2	1,8
Vcorr (mpy)	0,32	0,28	0,25	0,19	0,14	1,01	0,08
F2	1,5	1,8	1,7	1,8	1,9	1,8	1,6
F3	2,3	2,7	3	2,9	3,1	2,8	2,8

En la tabla 6 correspondiente al concreto OPC sin carbonatar se observa la disminución de los parámetros hallados con esta técnica los cuales nos indican que a medida que se evalúa este material en ambiente natural el valor de la velocidad de corrosión disminuye debido a que se genera una capa de pasivación homogénea.

Tabla 6. Parámetros electroquímicos hallados con la técnica EFM para el concreto OPC sin carbonatación.

	OPC 0 nivel	OPC 1 nivel	OPC 2 nivel	OPC 3 nivel	OPC 4 nivel	OPC 5 nivel	OPC 6 nivel
βc(mV/decada)	40,7	48	32	21	19	18	17,8
βc(mV/decada)	38,8	35	29	27	26	17	11,8
Icorr(µA)	6,9	6,2	5,6	4,3	3,1	2,2	1,8
Vcorr (mpy)	0,32	0,28	0,25	0,19	0,142	1,01	0,087
F2	1,5	1,8	1,7	1,8	1,9	1,8	1,6
F3	2,3	2,7	3	2,9	3,1	2,8	2,8

Al contrastar los valores de velocidad de corrosión hallados por medio de EFM con la técnica de curvas de polarización Tafel observamos que los valores hallados por Tafel siempre se encuentran por debajo, esto se debe a que en la técnica EFM las medidas se vieron influenciadas por el ruido existente durante la medición ocasionando una pequeña desviación de los factores de causalidad con respecto a los valores teóricos 2 y 3, por lo tanto los valores de velocidad de corrosión es un valor aproximado en cada uno de los casos, por otra parte se puede afirmar que ambas técnicas presentan la misma tendencia en cada uno de los niveles evaluados tanto para el concreto carbonatado como para el sin carbonatar, es decir que la técnica EFM es apropiada para el estudio de este tipo de material.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados logrados por la técnica de pulso galvanostático nos muestran valores de velocidad de corrosión similares a la técnica de resistencia lineal a la polarización LPR, mostrando que la técnica de pulso galvanostático es confiable al parametrizar los valores electroquímicos de la interfase concreto-acero.
- La técnica de pulso galvanostático permitió obtener valores confiables de velocidad de corrosión para el estudio del acero embebido en concreto por tanto la fiabilidad de la técnica es acertada al realizar el estudio del fenómeno de corrosión en este tipo de interfases.

- De acuerdo con los valores de velocidad de corrosión obtenidos con la técnica EFM, se aproxima de forma clara y precisa a la que arrojo la técnica de curvas de polarización Tafel sin la necesidad de conocer los parámetros Tafel anódico y catódico con anterioridad.
- Gracias a las frecuencias de entrada que utiliza la técnica EFM (2Hz y 5Hz), es posible obtener los resultados en un tiempo no mayor a 2 minutos.
- Una ventaja especial de la técnica EFM en comparación a las técnicas LPR, GPT y Tafel, es que con esta técnica se pueden validar los datos obtenidos mediante los factores de causalidad derivados de la relación de amplitudes de las frecuencias de intermodulación y armónicas. En esta oportunidad dichos factores fueron cercanos a los valores teóricos de 2 y 3.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] E. Moreno, G. Dominguez, F. Gomez. Ingenieria 8-2 (2004), p.117-130.

[2] S. Sathiyanarayanan, Panjali Natarajan, K. Saravanan, S. Srinivasan, G. Venkatachari. M. Y. Castro. Cement and Concrete Composites 28 (2006), p. 630-637.

[3] Thomas Frolund , Finn M. Jensen and Ralph Bassler. First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS (2002) , p.1-8.

[4] Kelly, R. Electrochemical Techniques in corrosion science and engineering. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003. ISBN: 0-8247-9917-8.

[5] M Alvarez, W Aperador, O Fernandez. Scientia et Technica Año XIII, No 36, Septiembre 2007, p, 579-584

[6] M Mora, W Aperador, E Vera. Revista colombiana de física, VOL. 39, No. 1, 2007, p. 143-146.

[7] R W Bosch; J Hubrecht; W F Bogaerts; B C Syrett, Corrosion; 57 (2001), p. 60-64.

[8] David A Eden, Practical Measurements Using Non-Linear Analysis Techniques – Harmonic Distortion and Intermodulation Distortion; InterCorr International, Inc.14503 Bammel North Houston, Suite 300, Houston, Texas. 2002.

[9] National Instruments. LabVIEW Graphical Development Environment. Datasheet, 2006.

[10] Kelly, R. Electrochemical Techniques in corrosion science and engineering. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003. ISBN:0-8247-9917-8.

[11] J.A. Gonzalez a, A. Cobo b, M.N. Gonzalez b, S. Feliu. Corrosion Science 43 (2001), p. 611-625