

# **La efectividad del método de la resistencia eléctrica del acero en la evaluación de la corrosión de armaduras en sistemas cementantes**

## ***Significance of steel electrical resistance method in the evaluation of reinforcement corrosion in cementitious systems***

**L. KRAJCI, I. JANOTKA**

**Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences, Bratislava**

Persona de contacto/*Corresponding author:* ivan.janotka@savba.sk

**SLOVAK REPUBLIC**

Fecha de recepción: 20-XI-02  
Fecha de aceptación: 26-VI-03

### **RESUMEN**

*La utilización de un sistema de detección de la corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón puede contribuir a la reducción de sus costes de mantenimiento. El método de la resistencia eléctrica del acero consiste en la monitorización no-destructiva realizada sobre el acero en sistemas cementantes. Dentro de la muestra de mortero se coloca el sistema de detección, especialmente preparado y fijado, actuando como un sensor de la corrosión. En este trabajo se presentan ensayos de verificación de este método, junto con inspecciones visuales, en morteros sometidos a corrosión de armaduras por efecto de los cloruros.*

*La efectividad de este método de la resistencia eléctrica del acero se expresa, en la corrosión de armaduras, de acuerdo a los siguientes parámetros cuantitativos: reducción de la sección transversal del acero, espesor de la lámina atacada y pérdida de peso del acero. Se trata de un sistema integral que permite la determinación indirecta de las características de corrosión antes mencionadas. La comparación de este método con el de la evaluación gravimétrica en la corrosión de aceros es altamente positiva. Los resultados de los ensayos realizados en morteros con cloruro cálcico entre 0,5% y 4,0% en peso de cemento, demuestran la alta sensibilidad y fiabilidad del método propuesto.*

### **SUMMARY**

*The suitable detection system of steel reinforcement corrosion in concrete structures contributes to the reduction of their maintenance costs. Method of steel electrical resistance represents non-destructive monitoring of steel in cementitious systems. Specially prepared and arranged test specimen of steel as a corrosion sensor is embedded in mortar specimen. Verification tests of this method based on chloride corrosion of steel in mortars as well as its visual inspection are introduced.*

*Significance of steel electrical resistance method lies in the expression of steel corrosion by these quantitative parameters: reduction of cross-section of steel, thickness of corroded layer and loss of weight of steel material. This method is an integral method that allows the indirect determination of mentioned corrosion characteristics. The comparison of verified method with gravimetric evaluation of steel corrosion gives a good correspondence. Test results on mortars with calcium chloride dosages between 0.5% and 4.0% by weight of cement prove high sensitiveness and reliability of steel electrical resistance method.*

**PALABRAS CLAVE :** corrosión de armaduras, resistencia eléctrica, sensor de la corrosión, evaluación cuantitativa.

**KEYWORDS:** *steel corrosion, electrical resistance, corrosion sensor, quantitative evaluation*

## 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las armaduras esta considerada como una de las formas más peligrosas del deterioro de las estructuras de hormigón, no sólo por cuanto al ámbito de la seguridad se refiere, sino también desde el punto de vista económico y de servicios. Cada año se gastan ingentes cantidades de dinero en la reparación y sustitución del acero dañado. La corrosión afecta directamente a la seguridad de las estructuras de hormigón, reduciendo el área de actuación del acero e, indirectamente, haciendo que se fisure y se descomponga el hormigón circundante.

Adicionalmente, las últimas consecuencias pueden ser la pérdida de ductilidad en el acero y de la cohesión acero/hormigón. Hay dos vías por las que la película de protección (formada en la superficie del hormigón reforzado con acero). Una es el resultado de la interacción del dióxido de carbono presente en el aire con el hidróxido de calcio en el hormigón, provocando la del reducción del pH de la pasta de cemento y, como consecuencia de ello, se inicia el proceso de corrosión (1-5). La otra vía es por la presencia de iones cloruro procedentes bien de las sales de descongelación o bien por ambiente marino. Los iones cloruro son capaces de destruir la película pasiva que existe sobre el acero, incluso en un ambiente alcalino (6-10).

La necesidad de detectar y diagnosticar la corrosión de las armaduras es algo por todos reconocido. La medida del potencial de corrosión es un método tradicional sencillo y rápido que da información sobre dónde se produce la corrosión pero no sobre la velocidad a la que la misma ocurre (11). Si tal información es necesaria se deben utilizar otros métodos electroquímicos. La eficiencia de estos métodos así como sus posibilidades de aplicación en el laboratorio e *in situ* han sido estudiados y publicados por muchos investigadores (12-19). Adicionalmente, otras técnicas avanzadas para la medida de la corrosión de las armaduras han aparecido recientemente (20-24). Si repasamos las diversas técnicas electroquímicas utilizadas normalmente para detectar la corrosión de armaduras podemos ver que muchas de ellas están en el principio de su fase de desarrollo. Se debe destacar que muchas posibilidades y retos están abiertos en lo que respecta a las técnicas de medida de corrosión y que algunas están siendo exploradas (24).

El método de la resistencia eléctrica del acero es lógico y sencillo de aplicar, ya que cualquier tipo de corrosión (ya sea general o local) producirá una pérdida de átomos en el metal, y, por lo tanto, en la zona de conducción de la sección transversal (25). Por lo cual, este método se basa en un aumento de la resistencia eléctrica con la progresiva disminución en la sección transversal del acero cuando hay corrosión. El método

## 1. INTRODUCTION

*Steel corrosion is considered one of the most dangerous forms of deterioration in concrete structures. This process leads to the financial, service and safety problems. Large amounts of money are spent every year on the repair or replacement of damaged steel. Corrosion affects the safety of a concrete structure directly by reducing the area of steel, and indirectly through spalling and cracking of surrounding concrete. Besides, the further consequences can be the loss of steel ductility and loss of the steel/concrete bond. There are two ways in which the protective passive film (formed on the surface of steel in concrete) is destroyed and subsequently the corrosion process is developed. One is a result of the carbon dioxide in the air reacting with calcium hydroxide in the concrete. This will result in a reduction of the pH of the cement paste, and thereby corrosion starts (1-5). The other one is represented by the presence of chloride ions as a result of the application of deicing salts or exposure to a marine environment. Chloride ions are capable of destroying the passive film on steel even in the alkaline environment (6-10).*

*The need for detection and diagnosis of steel reinforcement corrosion is widely acknowledged. Half-cell potential testing as a traditional method is simple and rapid for identifying where corrosion is most likely but gives no information about the rate of corrosion (11). If such information is needed, some other electrochemical methods are used. The significance of these methods as well as their possibilities for application in the laboratory and on-site have been reported by many researchers (12-19). Additional advanced techniques for monitoring of steel reinforcement corrosion still appear (20-24). A review of electrochemical techniques currently used to assess corrosion of the reinforcement shows that some these techniques are in principle in the development state. It is emphasized that numerous possibilities and challenges in regard to measurement techniques of reinforcement corrosion often remain being explored (24).*

*Method of electrical resistance of steel is a logical and straightforward method to apply, since any corrosion that occurs (either general or local) will cause a loss of metal atoms, leading to a loss in conducting cross-sectional area (25). Thus, this method is based in principle on an increase in the electrical resistance with the progressive decrease in steel cross-section when corrosion proceeds. The method is not able to*

no da información sobre el proceso electroquímico que está teniendo lugar en la armadura, únicamente informa sobre las pérdidas de la sección transversal a través de la medida en el cambio de la resistencia eléctrica. Este método puede aplicarse también a otros campos, como, por ejemplo, el de las refinerías (26), para la evaluación del deterioro de circuitos eléctricos (26). Las mediciones deben ser corregidas cuando existan cambios de temperatura ya que cualquier variación podría afectar la resistencia del metal. Según Cavalier y Vassie (28) -ya que es difícil medir directamente los pequeños cambios en la resistencia- las muestras deberían ser probetas especiales que tuvieran dos ramales y un puente. Esto también fue confirmado por McKenzie (15).

El método de resistencia eléctrica es una forma de ensayo no destructivo del estado de las armaduras de acero en el hormigón (29-31). Para el desarrollo de este sistema se utilizan unos sensores especialmente diseñados. El sensor consiste en una muestra de acero, especialmente preparado, que es introducido en la muestra ensayada. La forma y el tamaño del sensor pueden variar según la finalidad del ensayo. Por lo general el sensor opera en el sistema wheatstone bridge. El diseño del sensor se encuentra bajo patente Checoslovaca nº 229 422, 1986.

La estructura del sensor no funciona correctamente bajo ciertos aspectos (por ejemplo, cambios de la temperatura ambiente), sin embargo no le afecta la resistencia alta o fluctuante del hormigón. La técnica es rápida, sencilla y admite mediciones periódicas o continuadas. Además, el método de la resistencia eléctrica hace posible la evaluación de la corrosión de la armadura en el hormigón por parámetros cuantitativos. La intención final de este artículo es la evaluación y cuantificación de la corrosión del acero en sistemas cementantes aplicando el método de resistencia eléctrica.

## 2. EXPERIMENTAL

Se prepararon probetas de mortero (40x40x160 mm) donde se introdujeron los sensores (Figura 1). Dichos sensores fueron construidos según las Normas STN 73 1341 (32) y preparados con molienda extraída del acero estructural 10 425 (33). Los sensores tienen forma de U, con una parte completamente aislada y la otra expuesta, con una longitud cada una de ellas de 100 mm., Las medidas de la sección son de 3 mm<sup>2</sup> (3x1 mm) y el área de exposición de 800 mm<sup>2</sup>. El sensor de corrosión se colocó centrado en la muestra de mortero. La superficie del acero se desengrasó antes de introducirla en el mortero. Simultáneamente, la barra de acero con las mismas características, clase 10 425 y preparada de la misma forma (molienda) a partir del acero estructural, se introdujo, asimismo, en la muestra de mortero. La longitud, sección transversal y área de

inform on the electrochemical process occurring on the reinforcement. It only informs on the cross – section loss, through the measurement of the change of electrical resistance. Method of electrical resistance have been applied also in other branches, e.g. for the evaluation of steel structures in refineries (26), for the deterioration of electrical circuitry (27). Measurements have to be corrected for temperature changes since even slight temperature variations affect the resistance of the metal. According to Cavalier and Vassie (28) -since it is difficult to directly monitor very small changes in resistance- the samples ought to be special probes that form two arms of an AC bridge network. This was confirmed by McKenzie as well (15).

Method of electrical resistance represents a non-destructive manner of monitoring of the steel reinforcement state in concrete (29-31). For this technique specially developed corrosion sensor is used. Sensor is a suitable arranged test specimen of given steel which is embedded in the monitored object. Size and form of the corrosion sensor can be various according to the purpose of the test. Generally, sensor operates in the system of the Wheatstone bridge. Design of the sensor is protected by Czechoslovak Patent nº. 229 422, 1986.

The structure of the sensor excludes disturbing effects (e.g. influence of temperature changes of environment). In addition, high or fluctuating concrete resistance does not compromise related measurements. The technique is fast, simple and enables periodic or continuous measurements. Moreover, the method of electrical resistance makes possible to evaluate the corrosion of steel in concrete by quantitative parameters. This paper is focused on a new approach to assess and quantify the corrosion of steel in cementitious systems by the method of electrical resistance.

## 2. EXPERIMENTAL

For the experiment mortar specimens (40x40x160 mm) with embedded corrosion sensor were prepared (Figure 1). Sensor was constructed according to the STN 73 1341 Standard (32). It was prepared by milling from structural steel 10 425 (33), resulting in the shape of U with half completely insulated part of sensor and half exposed part of sensor with the same length of 100 mm. The related cross-section was 3 mm<sup>2</sup> (3x1 mm) and exposed area 800 mm<sup>2</sup>. The corrosion sensor was centrally located into the mortar specimen. The surface of steel was degreased before embedding into mortar. Simultaneously, the steel bar with the same quality (class 10 425) and prepared by the same manner (milling) from structural steel was embedded into the mortar specimen. The length, cross-section and exposed area of the bar were identical than those of the sensor. Three parallel

exposición de la barra son idénticas a las del sensor. Fueron utilizados tres sensores paralelos y de la barra en cada tipo de mortero. La composición y propiedades del acero, del sensor y de la barra se dan en la Tabla 1.

Los morteros se prepararon con cemento Portland CEM I 42.5 (de la factoría Holcim) y arena silícea. La relación cemento:arena utilizada era 1:3 y la relación agua/cemento de 0,6. Las muestras contenían 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 2; 3 y 4% de cloruro cálcico en peso de cemento. Los morteros se curaron en moldes durante 24 horas al 100% de H.R. y 20 °C y, una vez desmoldados, fueron sometidos a ciclos repetitivos. Un ciclo (24 horas) significa un curado al H.R. de 75%/20 °C -durante 16 horas- y un posterior curado a 40 °C durante 8 horas. La duración del ensayo fue de 100 ciclos.

Debido al carácter no destructivo del método, las medidas de corrosión realizadas por los cambios en la resistencia eléctrica de los sensores colocados en la muestra fue realizada cada diez ciclos de curado. Los medios esenciales utilizados en este experimento fueron: energía

*specimens of the sensor as well as of the bar were used for each type of mortar. Composition and properties of steel of sensor and bar are given in Table 1.*

*The mortars were composed of ordinary Portland cement CEM I 42.5 (Holcim cement factory) and siliceous sand. The cement: sand ratio was 1:3 by weight and water to cement ratio was 0.6. The specimens contained 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 2; 3 and 4% dosages of calcium chloride by weight of cement. Mortars were cured in moulds for 24 hours at 100% R.H./20 °C, and after remoulding were subsequently subjected to the repeated cycles. One cycle (24 hours) represented curing at R.H. of 75%/20 °C - for 16 hours- and curing at 40 °C for 8 hours. Duration of the test was 100 cycles in this stage.*

*Because of the non-destructive character, the corrosion measurements of changes of steel electrical resistance on embedded sensors were performed every ten curing cycles. Standard stabilized power supply (current source),*

**TABLA 1/TABLE 1**  
Composición y propiedades del acero en los sensores y barras  
*Composition and properties of steel of sensor and bar*

Composición química, % <i>Chemical composition, %</i>	Estructura, <i>Structure</i>	Punto de campo, MPa <i>Yield point, MPa</i>	Resistencia a la tensión, MPa <i>Tensile strength, MPa</i>	Ductilidad, % <i>Ductility, %</i>	Resistividad, $\mu\Omega \cdot m$ <i>Resistivity, <math>\mu\Omega \cdot m</math></i>
C 0.24	ferrítica-perlita, presencia de inclusiones por oxidación y sulfatación				
Mn 1.14					
Si 0.47					
P 0.02					
S 0.03					
	<i>ferritic-pearlitic, occurrence of inclusion of oxidizing and sulphidic nature</i>	410	569	14	0.126

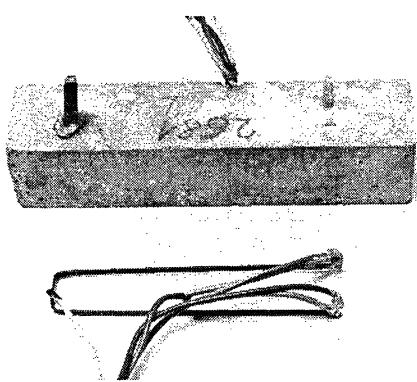


Figura 1.- Sensor de corrosión y muestra de mortero ensayada.

Figure 1.- Corrosion sensor and tested mortar specimen.

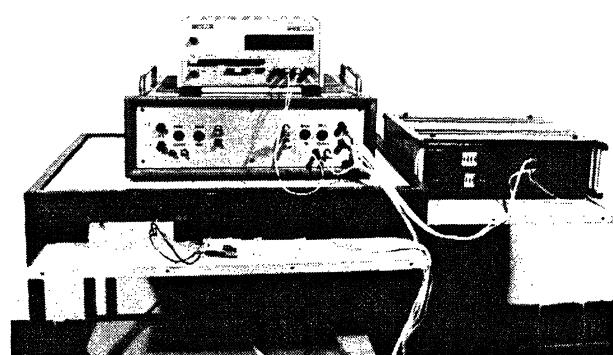


Figura 2.- Equipamiento para la medida de la corrosión en el acero reforzado a través del método de resistencia eléctrica.

Figure 2.- Equipment set for corrosion measurement of steel reinforcement by the method of electrical resistance.

estándard estabilizada (fuente habitual), unidad eléctrica de transferencia y milivoltímetro con sensibilidad de  $1 \mu\text{V}$  (Figura 2). Se comprobó el estado del acero a través de inspección visual junto con la valoración proporcionada por el sensor colocado en la zona de corrosión entre 40 y 100 ciclos tras la destrucción de las muestras de mortero.

Simultáneamente se implementó la valoración de la pérdida de peso en las barras mediante métodos gravimétricos (34).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Principio del método y análisis teórico

El diagrama del circuito para el sistema de resistencia eléctrica del acero se muestra en la Figura 3. El sensor que detecta la corrosión presenta un puente de "wheatstone" en la probeta de mortero. Dicho sensor consta de cuatro resistencias eléctricas. Una de las ramas está formada por la parte expuesta (con una resistencia eléctrica  $R_{BA}$ ) y la parte compensada ( $R_{BC}$ ) con la misma longitud. La parte compensada permanece completamente aislada del medio ambiente. La segunda rama del puente está formada por un cable de constantan con resistencias eléctricas  $R_{K1}$  y  $R_{K2}$ , respectivamente. El sensor que detecta la corrosión (se mide la parte no aislada) excluye diversos efectos perturbadores durante la toma de datos (influencia de la temperatura, tensión eléctrica ambiental, etc.).

Con el fin de evaluar los cambios de resistencia eléctrica en el sensor que detecta la corrosión, será preciso caracterizar su voltaje de salida  $E$ :

$$E = E_i - E_o \quad [1]$$

Donde  $E_i$  se refiere al voltaje de salida en la corriente dada (1A) y  $E_o$  el voltaje de salida en condiciones estables. El valor último es el factor de corrección, que viene representado por diversas tensiones eléctricas.

*transfer electrical unit and milivoltmeter with the sensitivity of  $1 \mu\text{V}$  were the essential equipment set for the experiment (Figure 2). The real state of steel was checked by visual inspection connected with the assessment of corroded area of sensor in the time of 40 and 100 cycles after the destruction of mortar specimens. Simultaneously in the same time, the assessment of weight loss of steel on bars by gravimetric method (34) was implemented.*

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Principle of the method and theoretical analysis

*Circuit diagram for the steel electrical resistance method is shown in Figure 3. Embedded corrosion sensor represents Wheatstone bridge in mortar test specimen. Sensor consists of four electrical resistances. One branch is formed by the exposed part (with electrical resistance  $R_{BA}$ ) and the compensating part ( $R_{BC}$ ) with the same length. The compensating part is completely insulated from surrounding environment. The second branch of the bridge is formed by a constantan wire with electrical resistances  $R_{K1}$  and  $R_{K2}$ , respectively. Construction of corrosion sensor (its non-insulated part is measured) excludes various disturbing effects during the measurements (temperature influences, surrounding electric tensions etc.).*

*To evaluate the changes of electrical resistance of corrosion sensor, it is needed to characterize its output voltage  $E$ :*

*where  $E_i$  is output voltage at the given control current (1A) and  $E_o$  is output voltage in the currentless state. Latter value is the correcting factor which is represented by various disturbing electrical tensions.*

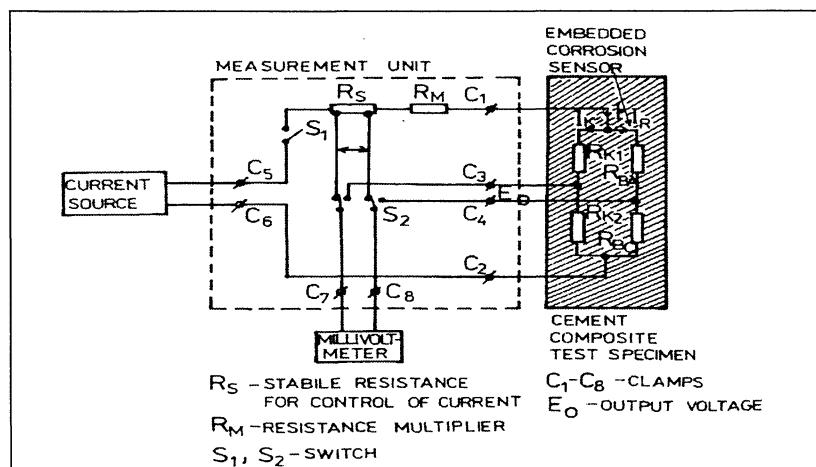


Figura 3.- Diagrama del circuito para el método de resistencia eléctrica del acero.  
Figure 3.- Circuit diagram for the steel electrical resistance method.

Por causa de las condiciones eléctricas en el sistema de medidas, se eligió el valor de un 1 A para el control de la corriente. Al comienzo de la prueba, los voltajes de salida  $E_b$  y  $E_t$  (este último durante el tiempo de ensayo t), se calcularon como sigue:

$$E_b = E_{1,b} - E_{0,b} \quad [2]$$

$$E_t = E_{1,t} - E_{0,t} \quad [3]$$

Donde  $E_{1,b}$  se refiere al voltaje de salida en el control de la corriente de un 1 A al comienzo del ensayo;  $E_{0,b}$  es el voltaje de salida en condiciones estables al principio del ensayo;  $E_{1,t}$  es el voltaje de salida de un 1A durante el tiempo de ensayo t;  $E_{0,t}$  es el voltaje de salida en condiciones estables en el curso del experimento t.

La diferencia entre estos valores es la siguiente:

$$E_t - E_b = \Delta E \quad [4]$$

Que representa el cambio total del voltaje de salida del sensor de corrosión a un tiempo dado. De acuerdo a la Figura 3 y basándonos en la conexión paralela de las resistencias eléctricas, la siguiente ecuación es válida:

$$1/R = 1/(R_{K1} + R_{K2}) + 1/(R_{BA} + R_{BC}) \quad [5]$$

Si tenemos en cuenta que  $R_{K1} = R_{K2} = R_K$  y tras evaluar las relaciones en el puente, el incremento de la resistencia eléctrica en las partes expuestas del sensor ( $\Delta R_{BA}$ ) como consecuencia de la corrosión localizada puede expresarse según la fórmula siguiente:

$$\Delta R_{BA} = 2 \cdot (\Delta E/I) \cdot (R_{BC} + R_K) / (R_K - \Delta E/I) \quad [6]$$

Si  $R_K \gg R_{BC}$  y  $R_K \gg \Delta E/I$ , la relación [6] puede simplificarse de la siguiente forma:

$$\Delta R_{BA} = 2 \cdot (\Delta E/I) \quad [7]$$

En general este incremento representa el cambio en la resistencia eléctrica del acero del sensor.

Por lo tanto, no hay valores individuales en la resistencia eléctrica, pero sí cambios en la misma como, por ejemplo, conocer cuantos microohmios son necesarios para que cambie el valor dado frente al establecido inicialmente.

La ventaja del método de resistencia eléctrica del acero permite expresar datos cuantitativos en la armadura de acero corroído: reducción de la sección transversal del

*Because of electrical conditions in measuring system, the value of 1A was chosen for the control electrical current. At the beginning of the test, the related output voltage  $E_b$  and during the experiment at time t, the related output voltage  $E_t$ , are calculated as follows:*

*where  $E_{1,b}$  is output voltage at the control current of 1A at the beginning of the test;  $E_{0,b}$  is output voltage in the currentless state at the beginning of the test;  $E_{1,t}$  is output voltage at the control current of 1A during the experiment at time t;  $E_{0,t}$  is output voltage in the currentless state during the experiment at time t.*

*The difference between these values*

*represents the total change of output voltage of the corrosion sensor in the given time. According to the Figure 3 and on the basis of parallel connexion of electrical resistances this equation is valid:*

*On the assumption that  $R_{K1} = R_{K2} = R_K$  and after evaluation of relations in bridge, the increment of electrical resistance of exposed part of sensor ( $\Delta R_{BA}$ ) as a consequence of localized corrosion can be expressed by this formula:*

*Since  $R_K \gg R_{BC}$  and  $R_K \gg \Delta E/I$ , the relation [6] can be simplified:*

*In general, this increment represents the change of steel electrical resistance of sensor:*

$$\Delta R = 2 \cdot (\Delta E/I) \quad [8]$$

*Thus, there are not values of alone electrical resistance, but changes of electrical resistance, i.e. about how many microohms changed related value opposite to the initial state.*

*The advantage of steel electrical resistance method lies in possibility to express quantitative data on corroded*

acero, espesor de la lámina corroída y pérdida de peso del acero.

#### - Reducción de la sección transversal del acero

Partiendo del valor general de las ecuaciones:

$$\Delta S/S = \Delta R/R$$

y/and

$$R = \rho \cdot l/S$$

[9]

[10]

Donde  $\Delta S$  es la reducción de la sección transversal,  $S$  es la sección transversal inicial del sensor de acero,  $\Delta R$  corresponde al cambio de la resistencia eléctrica del sensor de acero,  $R$  la resistencia eléctrica inicial del sensor,  $\rho$ , la resistividad del sensor de acero y  $l$  es la longitud del sensor, con lo que se establece la siguiente relación:

$$\Delta S = \Delta R \cdot S^2 / \rho \cdot l \quad [11]$$

#### - Espesor de la lámina corroída

$$T_L = \Delta S/C \quad [12]$$

donde  $C$  es la circunferencia inicial del sensor

#### - Pérdida de peso del material de acero

$$\Delta W = \Delta S \cdot l \cdot \gamma \quad [13]$$

donde  $\gamma$  es el peso específico del sensor.

Debido a la dependencia entre la resistencia eléctrica del acero con la longitud y sección transversal de la muestra de acero, obliga a relacionar la proporción entre la sección transversal del acero y la longitud. Este requerimiento implica la aplicación de pequeños sensores para detectar la corrosión (de una longitud de, aprox. 100 mm) con una relativamente pequeña sección transversal del acero ( $3-5 \text{ mm}^2$ ). La corriente más conveniente es de 1A. Por otro lado, este método puede aplicarse también -con parámetros seleccionados de acero- para el control *in situ* del acero, por ejemplo, un sensor de corrosión de 1 metro no aislado (“medido”) con una sección transversal de aproximadamente  $50 \text{ mm}^2$  (circuito del diagrama-Figura 3). Por lo tanto, el valor de las proporciones entre la sección transversal y la longitud del acero limita el factor de utilización del método *in situ*. Ello se debe al porcentaje de electricidad en la unidad de transferencia eléctrica como parte de la unidad de medida, según se aprecia en la Figura 3.

La limitación en el uso del sensor con respecto a la aplicación del método de armaduras muestra que este tipo de acero no precisa tener relación alguna con el refuerzo que, normalmente, se utiliza en la práctica, siendo, sin embargo, importante en caso de que el sensor de acero utilizado sea tan ancho como sea

*steel reinforcement: reduction of cross-section of steel, corroded layer thickness and weight loss of steel.*

#### - Reduction of cross-section of steel

*From the general validity of equations:*

[9]

[10]

*where  $\Delta S$  is reduction of cross-section of steel of sensor,  $S$  is initial cross-section of steel of sensor,  $\Delta R$  is change of electrical resistance of steel of sensor,  $R$  is initial electrical resistance of sensor,  $\rho$  is resistivity of steel, and  $l$  is length of sensor; follows this relationship:*

$$\Delta S = \Delta R \cdot S^2 / \rho \cdot l \quad [11]$$

#### - Corroded layer thickness

[12]

*where  $C$  is initial circumference of sensor*

#### - Loss of weight of steel material

*where  $\gamma$  is specific weight of sensor*

*Because of dependence of steel electrical resistance on length and cross-section of steel specimen, it is needed to adhere to proportions between steel cross-section and length. This demand requires the application of small corrosion sensors (length about of 100 mm) with relatively small cross-section of steel ( $3-5 \text{ mm}^2$ ). The suitable control current is of 1A. On the other hand this method can be applied -at suitable selected steel parameters- for checking of steel *in situ*, e.g. corrosion sensor with length of non-insulated (“measured”) part of 1 metre with cross-section of about  $50 \text{ mm}^2$  (circuit diagram-Figure 3). Thus, the holding of proportions between cross – section and length of steel is limiting factor for use of the method *in situ*. This is due to electrical proportions in the transfer electrical unit as a part of measurement unit as seen in Figure 3.*

*Limitation of the use of sensor with respect to the application of the method on reinforcement lies in the fact, that type of steel need not to be in the relation with actual reinforcement which is usually used in practice. Therefore it is important, if the used steel of sensor is to the extent as large as possible similar to actually used*

posible y similar al refuerzo de acero que se usa en la actualidad. La utilización de acero acanalado o pulido es inviable.

### 3.2. Resultados experimentales

Debido al carácter no destructivo del método de resistencia eléctrica del acero, los valores de cambio de resistencia del sensor  $\Delta R$  se registran regularmente cada diez ciclos de curado. En la Figura 4 se muestra la evolución de las medidas de resistencia eléctrica en tiempo. Es evidente que cuando aumenta el contenido de cloruro cálcico en el mortero aumenta también el cambio en la resistencia eléctrica. Eso indica una significativa corrosión gradual del acero, dicha corrosión depende tanto del tiempo como de la dosificación de  $\text{CaCl}_2$ . Los cambios observados de la resistencia eléctrica del acero en el mortero de referencia (0%  $\text{CaCl}_2$ ) y en el mortero con 0,5%  $\text{CaCl}_2$  no son significativos. Estos valores coinciden con la zona de no fiabilidad del método.

Los resultados de la inspección visual de los sensores tras la destrucción de las muestras de mortero en tiempos de 40 y 100 ciclos de curado, pueden apreciarse en la Tabla 2. La extensión de la corrosión en porcentaje se evalúa dependiendo por la relación entre área corroída y área total del acero. Esto se confirmó a través de un procedimiento de integración gráfica. Los cambios en la resistencia eléctrica del acero de los sensores se obtienen simultáneamente (40 y 100 ciclos-Tabla 2). El porcentaje de área atacada representa únicamente una de las consecuencias que determina la medición del ataque corrosivo.

De esta forma es posible, directa y claramente deducir el estado pasivo o activo del acero a partir de los valores independientes de la zona atacada. Por otro

*steel reinforcement. The use of ribbed and polished steel is unsuitable.*

### 3.2. Experimental results

*Because of non-destructive character of steel electrical resistance method, the related values of change of electrical resistance of sensor  $\Delta R$  are regularly ascertained every ten curing cycles. The evolution of electrical resistance measurements in time is evaluated in Figure 4. It is evident that with the increased dosage of calcium chloride in mortar, the change of steel electrical resistance is increased. This indicates gradual steel corrosion. Corrosion is significantly dependent on the time as well as the  $\text{CaCl}_2$  dosage. The change of electrical resistance of steel in control mortar (0%  $\text{CaCl}_2$ ) and in mortar with 0.5%  $\text{CaCl}_2$  exhibits negligible changes. These values partially represent the region of unsensitivity of method.*

*The results of visual inspection of sensors after destruction of mortar specimens in the time of 40 and 100 curing cycles are shown in Table 2. The extent of corrosion in percentage is evaluated by the ratio of corroded area to total steel area. This was objectively assessed by the procedure of graphical integration. The changes of steel electrical resistance of sensors are ascertained in the same time (40 and 100 cycles-Table 2). Percentage of corroded area represents only one of the consequences that determine a measure of its corrosion attack.*

*Thus, it is not possible directly and clearly to deduce passive or active state of steel from the alone values of corroded area. On the other hand, significantly*

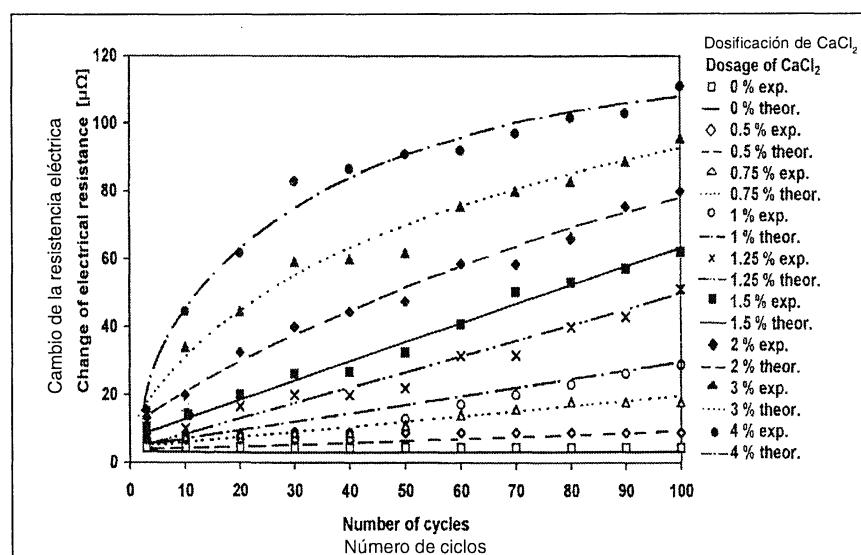


Figura 4.- Relación entre el cambio de resistencia eléctrica en las muestras de acero y el número de ciclos de curado en morteros dosificados con  $\text{CaCl}_2$ .  
Figure 4.- Dependence of change of electrical resistance of steel specimens on number of curing cycles for dosages of  $\text{CaCl}_2$  in mortar.

TABLE 2/TABLE 2

Comparación de los datos cuantitativos del grado de corrosión del acero determinado por el método de resistencia eléctrica con el estado real del acero tras inspección visual  
*Comparison of quantitative data on corrosion degree of steel determined by means of method of electrical resistance with real state of steel after its visual inspection*

Dosificación de $\text{CaCl}_2$ en mortero, % (según peso de cemento) <i>Dosage of <math>\text{CaCl}_2</math> in mortar, % (by weight of cement)</i>	Inspección visual <i>Visual inspection</i>	Método de resistencia eléctrica / Method of electrical resistance					
		Área corroída, % <i>Corroded area, %</i>	Cambio de resistencia eléctrica <i>Change of electrical resistance <math>\Delta R</math>, <math>\mu\Omega</math></i>	Reducción de la sección transversal <i>Reduction of cross - section <math>\Delta S</math>,</i>		Espesor de la lámina corroída <i>Thickness of corroded layer <math>T_L</math>, <math>\mu\text{m}</math></i>	Pérdida de peso <i>Loss of weight <math>\Delta W</math></i>
				$\text{mm}^2$	%		
40 ciclos / cycles							
0	0	4.4	0.003	0.10	0.38	2.98	0.10
0.50	0	6.7	0.005	0.17	0.63	4.95	0.17
0.75	5	8.9	0.006	0.20	0.75	5.89	0.20
1	5	8.9	0.006	0.20	0.75	5.89	0.20
1.25	15	20.0	0.014	0.47	1.75	13.74	0.47
1.50	35	26.7	0.019	0.63	2.38	18.68	0.63
2	50	44.4	0.032	1.07	4.00	31.40	1.07
3	70	60.0	0.043	1.43	5.38	42.23	1.43
4	85	86.7	0.062	2.07	7.75	60.84	2.07
100 ciclos / cycles							
0	0	4.4	0.003	0.10	0.38	2.98	0.10
0.50	5	8.9	0.006	0.20	0.75	5.89	0.20
0.75	15	17.8	0.013	0.43	1.63	12.80	0.43
1	30	28.9	0.021	0.70	2.63	20.65	0.70
1.25	45	51.1	0.037	1.23	4.63	36.35	1.23
1.50	50	62.2	0.044	1.47	5.50	43.18	1.47
2	80	80.0	0.057	1.90	7.13	55.97	1.90
3	90	95.6	0.068	2.27	8.50	66.73	2.27
4	100	111.1	0.079	2.63	9.88	77.56	2.63

lado, una superficie donde el acero ha sido atacado significativamente, indica su estado activo, así como una superficie intacta indica su estado pasivo. Sin embargo, no es posible establecer el inicio de la despasivación.

El grado de no fiabilidad o insensibilidad del método de resistencia eléctrica se estima para valores por encima de  $4 \mu\text{V}$  (voltaje de salida del sensor), como resultado del cambio de resistencia eléctrica del acero  $\Delta R$  por encima de  $8 \mu\Omega$ . Sin embargo estos valores no pueden considerarse indicativos del inicio de la corrosión (Tabla 2). Por lo tanto existen ciertas dificultades para detectar ese momento. En la Figura 5 se ilustra la comparación entre los resultados del método de resistencia eléctrica con los de la inspección visual. Los valores en los cambios de la resistencia eléctrica están

*corroded steel surface indicates its active state and absolutely non-corroded steel surface indicates passive state. It is not possible to estimate the beginning of depassivation.*

*The range of insensitiveness of steel electrical resistance method represents the value up to  $4 \mu\text{V}$  (output voltage of the sensor) subsequently resulting in the change of steel electrical resistance  $\Delta R$  up to  $8 \mu\Omega$ . Therefore, these values cannot be considered as the values indicating initiation of corrosion (Table 2). Thus, there are difficulties to detect the depassivation moment. In Figure 5 the comparison of the results of electrical resistance method with those of visual inspection of steel is illustrated. The values of changes of electrical resistance are in a good harmony with*

en buena armonía con los del área atacada. Este fenómeno es completamente válido al margen del número de ciclos en la corriente (40 y 100)

La corrosión del acero por cloruros se manifiesta en forma de picaduras. Con el aumento del número de éstas, aumentan también los valores de la resistencia del acero. En una inspección visual queda claro que por el número de picaduras, se trata de una corrosión generalizada. En este caso el cambio de la resistencia eléctrica del acero se corresponde con los valores de 26,7  $\mu\Omega$  (40 ciclos) y 28,9  $\mu\Omega$  (100 ciclos), respectivamente. Finalmente, la corrosión generaliza (prácticamente de un 100%-acero atacado casi en su totalidad) corresponde con un cambio en la resistencia eléctrica de aproximadamente, 100  $\mu\Omega$  (111,1  $\mu\Omega$ ). Este argumento es válido para las mencionadas condiciones experimentales y no puede ser extrapolado a otro tipo de circunstancias. Los demás valores referentes al cambio de la resistencia eléctrica en el acero se obtienen bajo distintas condiciones experimentales. Todo ello significa que deben considerarse las condiciones particulares de cada muestra en la evaluación de los resultados de los ensayos.

La Figura 6 muestra los puntos obtenidos en el experimento -área de corrosión en el acero tras la inspección visual- y el ya mencionado cambio en la resistencia eléctrica del mismo. Dichos valores, obtenidos en diferentes momentos en la muestra de mortero son, por una parte, de los 40 y, por otra, de los 100 ciclos. El término “40 y 100 ciclos” se da en la Figura 6, ya que se obtienen los mismos valores tanto para el área atacada como para el cambio de resistencia eléctrica en ambos ciclos (área atacada 0%, cambio en la resistencia eléctrica 4,4  $\mu\Omega$  y área atacada 5%, cambio en la resistencia eléctrica 8,9  $\mu\Omega$  respectivamente (Tabla 2). Los mínimos cambios apreciados en la resistencia eléctrica están relacionados con los pequeños valores del área atacada.

En la Tabla 2 se dan los valores obtenidos de las características cuantitativas del acero. Se observa cómo mientras progresiva la corrosión existe la misma tendencia entre todos los parámetros cuantitativos y la resistencia eléctrica. En las Figuras 7 y 8 se muestra la relación entre el cambio de resistencia eléctrica y reducción de la sección transversal del acero, su pérdida de peso, así como el espesor de la lámina de acero atacada. Cuando se incrementa el cambio de resistencia eléctrica del acero aumentan los valores de los parámetros cuantitativos.

Aparte del número de ciclos (40 y 100) el estado de corrosión del acero tras inspección visual (Tabla 2)

corroded area values. This phenomenon is fully valid apart from the number of curing cycles (40 and 100).

*Chloride corrosion of steel appears as a pitting corrosion. With the increased number of pits, the values of electrical resistance of steel are increased. It is clear from visual inspection that combining of pits results in the extended pitting corrosion that can be regarded as a general corrosion already. In these cases the change of electrical resistance of steel corresponds to the values of 26.7  $\mu\Omega$  (40 cycles) and 28.9  $\mu\Omega$  (100 cycles), respectively. Finally, the general corrosion (practically to 100% - fully corroded steel) is the characteristic feature of steel state with the change of steel electrical resistance over 100  $\mu\Omega$  (111.1  $\mu\Omega$ ). These statements are valid for these experimental conditions and cannot be taken into account for the other circumstances. The other values of the change of steel electrical resistance are obtained at different experimental conditions. This means that individual approach for the evaluation of the test results must be considered.*

*Figure 6 shows experimentally obtained points - corroded area of steel after visual inspection and related change of steel electrical resistance. These values are ascertained partly separately in the time of 40 curing cycles, partly separately in the time of 100 curing cycles of mortar specimens. The term «40 and 100 cycles» is given in Figure 6 because of the same values of corroded area and change of electrical resistance in the both cycles (corroded area 0%, change of electrical resistance 4.4  $\mu\Omega$  and corroded area 5%, change of electrical resistance 8.9  $\mu\Omega$  respectively-Table 2). The very small values of change of electrical resistance are connected with very small values of corroded area.*

*The calculated values of quantitative characteristics of steel are given in Table 2. The same tendencies for changes of all quantitative parameters as for those of electrical resistance are observed during the progress of steel corrosion. The relationship between the change of electrical resistance and reduction of cross-section of steel, its loss of weight as well as thickness of corroded layer are shown in Figure 7 and Figure 8. There are distinguished the values of individual numerical quantities. With the increase of change of steel electrical resistance, the values of individual quantitative parameters are increased.*

*Apart from the number of cycles (40 and 100) it is evident that the corrosion state of steel from visual inspection*

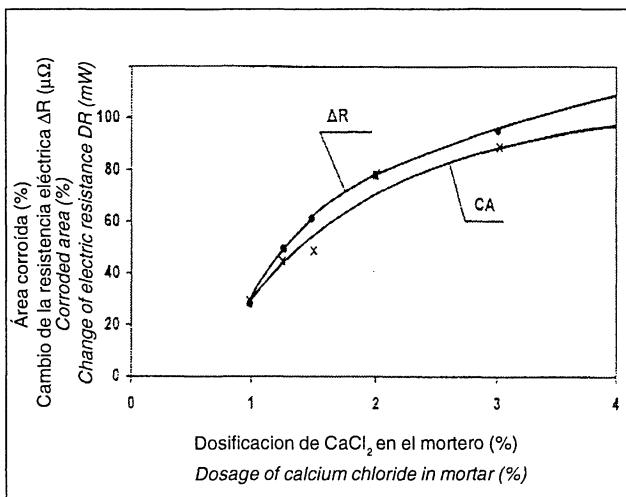


Figura 5.- Comparación del método de resistencia eléctrica con respecto a los valores de acero determinados por inspección visual.

Figure 5.- Comparison of electrical resistance method with corroded area values of steel determined by visual inspection.

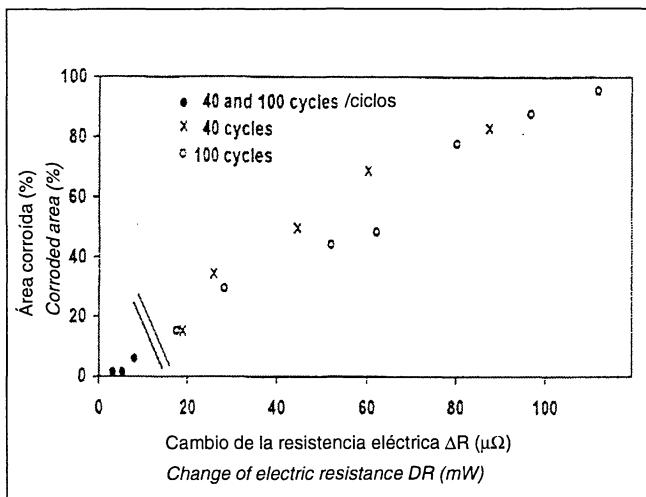


Figura 6.- Relación entre el cambio entre la resistencia eléctrica y el área atacada en la superficie del sensor de acero.

Figure 6.- Relationship between change of electrical resistance and corroded area on the surface of steel sensor.

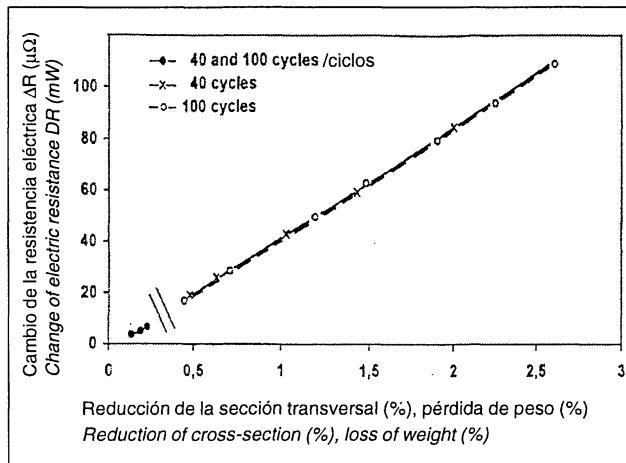


Figura 7.- Relación entre el cambio de la resistencia eléctrica y los parámetros cuantitativos en la corrosión del acero.

Figure 7.- Relationship between change of electrical resistance and quantitative parameters of steel corrosion.

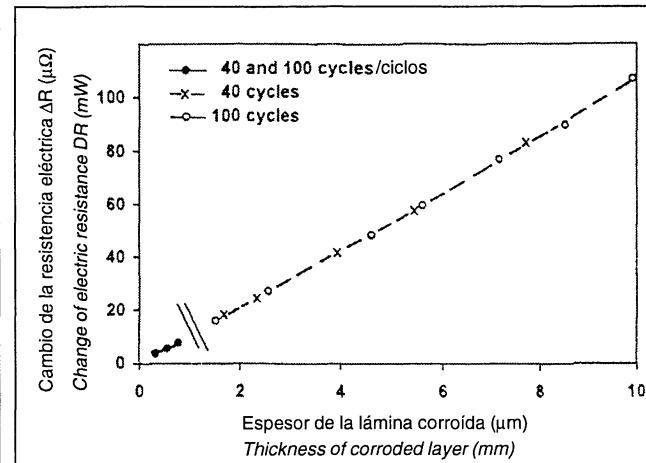


Figura 8.- Relación entre el cambio entre la resistencia eléctrica y el espesor de la lámina de acero corroída.

Figure 8.- Relationship between change of electrical resistance and thickness of corroded layer of steel.

va haciéndose cada vez más evidente a medida que aumenta la pérdida de peso del acero determinada a partir de la ecuación [13]. La comparación de los valores de pérdida de peso del acero obtenidos gravimétricamente y calculados a través del método de resistencia eléctrica puede verse en el Tabla 3. Los resultados obtenidos son muy parecidos, según puede verse en la Figura 9. Los ensayos se realizaron sobre las tres muestras paralelas. La evaluación estadística ya mencionada se muestra en la Tabla 4 (desviación estándar, coeficiente de variación). Estos resultados confirman la validez del método.

(Table 2) is getting worse with increasing steel weight loss values based on the calculation by the equation [13]. The comparison of values of steel weight loss found gravimetrically and calculated from the method of electrical resistance shows Table 3. The obtained results are very similar. This is clearly illustrated in Figure 9. The tests are always performed on three parallel specimens. The related statistical evaluation is given in Table 4 (standard deviation, coefficient of variation). This confirms relatively good reliability of results.

TABLA 3/TABLE 3

Comparación de los valores de pérdida de peso en los materiales de acero determinada por el método gravimétrico y los calculados utilizando el método de resistencia eléctrica  
*Comparison of values of weight loss of steel material found by gravimetric method and calculated from method of electrical resistance*

Dosificación de $\text{CaCl}_2$ en mortero, % (según peso de cemento) <i>Dosage of <math>\text{CaCl}_2</math> in mortar, % (by weight of cement)</i>	Pérdida de peso del acero / Weight loss of steel							
	40 ciclos / cycles				100 ciclos / cycles			
	Método gravimétrico <i>Gravimetric method</i>		Método de resistencia eléctrica <i>Method of electrical resistance</i>		Método gravimétrico <i>Gravimetric method</i>		Método de resistencia eléctrica <i>Method of electrical resistance</i>	
	g. $\text{m}^{-2}$	%	g. $\text{m}^{-2}$	%	g. $\text{m}^{-2}$	%	g. $\text{m}^{-2}$	%
0	3.51	0.12	2.98	0.10	3.95	0.14	2.98	0.10
0.50	6.80	0.23	4.95	0.17	6.91	0.24	5.89	0.20
0.75	7.02	0.24	5.89	0.20	18.11	0.62	12.80	0.43
1	7.12	0.24	5.89	0.20	21.00	0.72	20.65	0.70
1.25	16.21	0.55	13.74	0.47	42.26	1.44	36.35	1.23
1.50	22.03	0.75	18.68	0.63	51.18	1.75	43.18	1.47
2	38.15	1.30	31.40	1.07	63.12	2.16	55.97	1.90
3	51.14	1.75	42.23	1.43	71.58	2.45	66.73	2.27
4	75.25	2.57	60.84	2.07	97.25	3.32	77.56	2.63

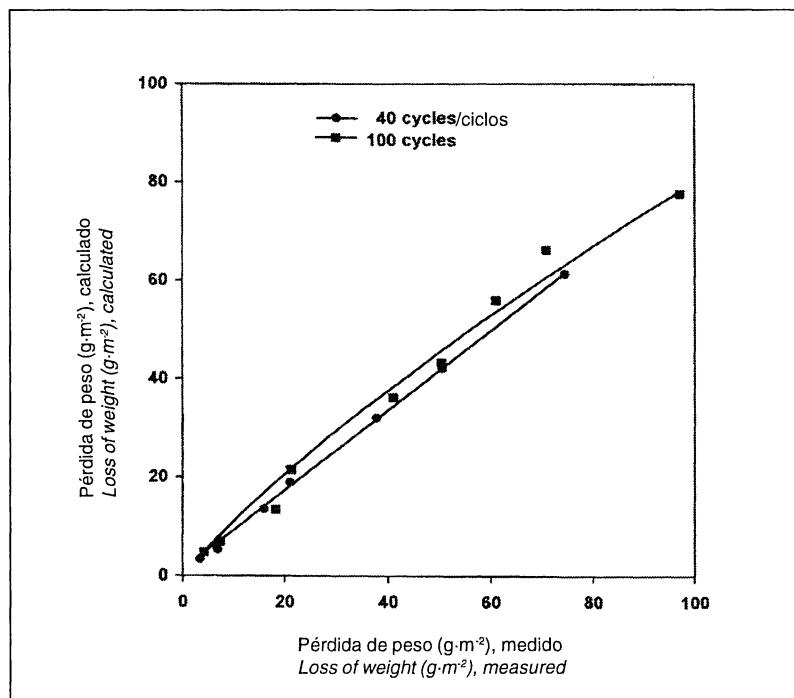


Figura 9.- Comparación entre la pérdida de peso del material de acero obtenido por el método de resistencia eléctrica (calculado) y el método gravimétrico (medido).

*Figura 9.- Comparison of weight loss values of steel material by method of electrical resistance (calculated) and gravimetric method (measured).*

TABLA 4/TABLE 4

Evaluación estadística de la pérdida de peso en el sensor de acero obtenida por el método de resistencia eléctrica

y pérdida de peso obtenida por gravimetría

*Statistical evaluation in loss of weight of steel of sensor obtained by method of electrical resistance and loss of weight of bar obtained gravimetrically*

Dosificación de $\text{CaCl}_2$ en mortero, % (según peso de cemento) <i>Dosage of <math>\text{CaCl}_2</math> in mortar, % (by weight of cement)</i>	Método de resistencia eléctrica <i>Method of electrical resistance</i>		Método gravimétrico <i>Gravimetric method</i>	
	Desviación standard, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ <i>Standard deviation, <math>\text{g}\cdot\text{m}^{-2}</math></i>	Coeficiente de variación, % <i>Coefficient of variation, %</i>	Desviación standard, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ <i>Standard deviation, <math>\text{g}\cdot\text{m}^{-2}</math></i>	Coeficiente de variación, % <i>Coefficient of variation, %</i>
40 ciclos /cycles				
0	0.036	1.21	0.044	1.25
0.50	0.114	2.30	0.280	4.11
0.75	0.082	1.39	0.062	0.88
1	0.079	1.34	0.135	1.90
1.25	0.467	3.40	0.223	1.38
1.50	0.239	1.28	0.354	1.61
2	0.548	1.75	1.037	2.72
3	0.876	2.07	1.637	3.20
4	2.380	3.91	2.710	3.60
100 ciclos /cycles				
0	0.036	1.21	0.036	0.91
0.50	0.066	1.12	0.070	1.01
0.75	0.201	1.57	0.437	2.41
1	0.864	4.18	0.506	2.41
1.25	0.560	1.54	0.865	2.05
1.50	1.021	2.36	1.050	2.05
2	1.078	1.93	1.465	2.32
3	1.459	2.19	2.724	3.81
4	2.118	2.73	3.709	3.81

#### 4. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones son extraíbles aplicando el método de resistencia eléctrica en la evaluación de la corrosión del acero:

1. El método de resistencia eléctrica del acero es una técnica experimental para la monitoreo no destructiva en la corrosión de las armaduras de acero en sistemas cementantes. Los ensayos realizados sobre sensores de la corrosión especialmente preparados, revelan una buena concordancia entre los resultados del método y el estado real del acero constatado a través de inspección visual. Los valores en los cambios de la resistencia eléctrica están en buena armonía con los valores del área atacada. Este fenómeno es absolutamente válido, independientemente del número total de ciclos aplicados a las muestras de mortero (40 y 100). El aumento de los valores calculados de los

#### 4. CONCLUSIONS

*The following conclusions are applicable to the electrical resistance method employed for steel corrosion measurements:*

*1. The method of electrical resistance of steel is one of the experimental techniques for non-destructive monitoring of steel reinforcement corrosion in cementitious systems. Tests performed on a specially prepared corrosion sensors reveal a good correspondence between the results of the method and real state of steel determined by visual inspection. The values of changes of electrical resistance are in a good harmony with corroded area values. This phenomenon is fully valid apart from the number of curing cycles of mortar specimens (40 and 100). The increase of calculated values of quantitative parameters of steel*

parámetros cuantitativos en la corrosión del acero (reducción de la sección transversal, espesor en el área atacada) son similares al incremento de la resistencia eléctrica cuando progresan la corrosión.

2. El método de resistencia eléctrica es un sistema integral que permite la determinación indirecta en la pérdida de peso del acero atacado.

3. Los valores calculados a través de dicho método en relación con la pérdida de peso son concordantes con los obtenidos a través de métodos gravimétricos convencionales. Se concluye que el método de resistencia eléctrica del acero representa una técnica experimental con resultados muy interesantes para determinar la extensión del acero atacado, sobre todo en los casos de corrosión inducida por cloruros.

4. Se ha perfeccionado y seguirá perfeccionándose el sensor de la corrosión, considerándose extremadamente importante esto para mejorar la sensibilidad del método y reducir así la no validez del mismo en los valores del voltaje de salida 2  $\mu$ V, con un cambio de resistencia eléctrica 4  $\mu\Omega$ .

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo desean agradecer a la "Slovak Grant Agency" VEGA (proyecto nº 2/3036/23) por la financiación de este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) L. J. Parrott: *A study of carbonation-induced corrosion*. Magazine of Concrete Research, Vol. 46, nº 166 (1994), pp. 23-28.
- (2) K. E. Kurtis, K. Mehta: *A critical review of deterioration of concrete due to corrosion of reinforcing steel*. Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete (Vol. 1), Sydney, 17-22 August, 1997, pp. 535-554.
- (3) R. H. Zhang, T. Nakazawa, F. Imai: *Estimation of depth of concrete carbonation*. Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete (Vol. 1), Sydney, 17-22 August, 1997, pp. 633-648.
- (4) L. J. Parrott: *Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete*. Materials and Structures, Vol. 29, nº 187 (1996), pp. 164-173.
- (5) J. Kropp, L. Basheer: *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties. A review*. Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete-Special Technical Session on Near-Surface Testing for Strength and Durability of Concrete, Barcelona, 4-9 June, 2000, pp. 65-89.
- (6) M. Raupach: *Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences*. Construction and Building Materials, Vol. 10, nº 5 (1996), pp. 329-338.
- (7) Y. Liu, R. E. Weyers: *Predicting the corrosion of steel in chloride-contaminated concrete*. Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete (Vol. 1), Sydney, 17-22 August, 1997, pp. 379-391.
- (8) J. Parker: *Carbonation and chlorides in concrete*. Concrete, Vol. 31, nº 9 (1997), pp. 18-20.
- (9) C. K. Larsen, J. Tritthart: *Effect of temperature on chloride ingress and chloride binding in hardened cement paste*, 9 pp.. In: C.K. Larsen: Chloride binding in concrete, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.
- (10) E. J. Hansen, V. E. Saouma: *Numerical simulation of reinforced concrete deterioration-Part I: Chloride diffusion*. ACI Materials Journal, Vol. 96, nº 2 (1999), pp. 173-180.
- (11) B. Elsener: *Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures*. Proceedings of the 5th CANMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete. - Special Technical Session on Near-Surface Testing for Strength and Durability of Concrete, Barcelona, 4-9 June, 2000, pp. 155-170.
- (12) P. Lay, P.F. Lawrence, N.J.M. Wilkins, D.E. Williams: *An A.C. Impedance study of steel in concrete*. Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 15 (1985), pp. 755-766.
- (13) J. A. Gonzalez, A. Molina, M.L. Escudero, C. Andrade: *Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates-I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete*. Corrosion Science, Vol. 25, nº 10 (1985), pp. 917-930.

corrosion (reduction of cross-section, thickness of corroded area) is accompanied with the increment of steel electrical resistance, i.e. progress of corrosion.

2. Method of electrical resistance is an integral method that allows the indirect determination of the weight loss of corroding steel.

3. Calculated weight loss values from the related method are in good agreement with those found directly by standard gravimetric method. It is concluded that the method of electrical resistance of steel represents experimental technique giving reliable results on the extent of steel corrosion especially in the case of chloride-induced (pitting) corrosion.

4. The development of improved type of corrosion sensor is in a progress and is considered as markedly important to improve the reliability of this method and to reduce its insensitivity to the output voltage value of 2  $\mu$ V resulting in the change of electrical resistance 4  $\mu\Omega$ .

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Slovak Grant Agency VEGA (project no. 2/3036/23) for the financial support of this study

- (14) C. Andrade, V. Castelo, C. Alonso, J. A. González: *The determination of the corrosion rate of steel embedded in concrete by the polarization resistance and A.C. impedance methods*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1986, pp. 43-64.
- (15) S. G. Mc. Kenzie: *Techniques for monitoring corrosion of steel in concrete*. Corrosion Prevention and Control, Vol. 34, nº 1 (1987), pp. 11-17.
- (16) S. Feliú, J. A. González, C. Andrade, V. Feliú: *On-site determination of the polarization resistance in a reinforced concrete beam*. Corrosion, Vol. 44, nº 10 (1988), pp. 761-765.
- (17) S. Feliú, J. A. Gonzalez, S. Jr. Feliú, C. Andrade: *Confinement of the electrical signal or in situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 87, nº 5 (1990), pp. 457-460.
- (18) P. Rodríguez, E. Ramirez, J. A. González: *Method for studying corrosion in reinforced concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol. 46, nº 167 (1994), pp. 81-90.
- (19) C. Andrade, C. Alonso: *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. Construction and Building Materials, Vol. 10, nº 5 (1996), pp. 315-328.
- (20) P. Rodríguez, J. A. González: *Use of the coulostatic method for measuring corrosion rates of embedded metal in concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol. 46, nº 167 (1994), pp. 91-97.
- (21) D. W. Law, S. G. Millard, J. H. Bungey: *Galvanostatic pulse measurements of passive and active reinforcing steel in concrete*. Corrosion, Vol. 56, nº 1 (2000), pp. 48-56.
- (22) C. Andrade, C. Alonso: *On-situ measurements of corrosion rate of reinforcement*. Proceeding of the 5th CANMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete-Special Technical Session on Near-Surface Testing for Strength and Durability of Concrete, Barcelona, 4-9 June, 2000, pp. 171-183.
- (23) K. Hladky, K. G. Davies, J. P. Broomfield: *Corrosion monitoring of steel reinforced concrete structures*. Proceedings of the 9th International Conference on Failures of Concrete Structures, Bratislava, 5-7 September, 2001, pp. 63-70.
- (24) C. Andrade, I. Martínez, C. Alonso, J. Fullea: *New advanced electrochemical techniques for on site measurements of reinforcement corrosion*. Mater Construcc, Vol. 51, nº 263-264 (2001), pp. 97-107.
- (25) P. A. Cella, S. R. Taylor: *Electrical resistance changes as an alternate method for monitoring the corrosion of steel in concrete and mortar*. Corrosion, Vol. 56, nº 9 (2000), pp. 951-959.
- (26) A. J. Freedman, E. S. Troscinski, H. Dravnieks: *An electrical resistance method of corrosion monitoring in refinery equipment*. Corrosion-National Association of Corrosion Engineering, 1958, pp. 1756-1787.
- (27) L. J. Turbini, M. Š. Ramanachalam, P. Saied, B. Smith, V. Yelundar: *A corrosion test for characterizing solder flux residues*. Proceedings of the 1st Pan Pacific Microelectronics Symposium, Surface Mount Technology Association, Edina, 1996.
- (28) P. G. Cavalier, P. R. W. Vassie: *Investigation and repair of reinforcement corrosion in a bridge deck*. Proceedings of the Institute of Civil Engineering-Part I., 1981, pp. 461-480.
- (29) G. Schippa: *Influence du CaCl<sub>2</sub> sur les caractéristiques du mortiers de ciment*. Proceedings on Colloque International sur les Adjuvants des Mortiers et Bétons, Bruxelles, August, 1967, Rapport IV/10, pp. 127-138.
- (30) L'. Krajci, V. •ivica: *Application of improved electrical resistance method for checking the state of concrete reinforcement*. Proceedings of the International Conference on Material Problems in Civil Engineering, Cracow, 19-22 June, 1996, pp. 239-243.
- (31) V. •ivica, L'. Krajci, L'. Bágel', M. Vargová: *Significance of the ambient temperature and the steel material in the process of concrete reinforcement corrosion*. Construction and Building Materials, Vol. 11, nº 2 (1997), pp. 99-103.
- (32) Standard STN 73 1341: *Corrosion protection of reinforcement provided by the properties of concrete*. Methods of test (in Slovak).
- (33) Standard STN 41 0425: *Steel 10 425* (in Slovak).
- (34) Standard STN 03 8102: *Evaluation of corrosion tests by determination of weight and dimension changes* (in Slovak).

\* \* \*

# MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

## Monográfico dedicado al VIDRIO EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (Nºs 242/243) a un solo material: *El vidrio*.

Haciéndose eco del creciente interés que suscitan las investigaciones e innovaciones sobre los productos derivados del vidrio, este material se trata, por primera vez en la Revista, de forma monográfica, con la amplitud que permite un número especial.

Los distintos artículos que componen este número son muestra de la gran variedad de características, propiedades y aplicaciones bajo las que se presentan los derivados del vidrio. Entre sus usos más comunes se encuentran: elementos transparentes de cerramientos, materiales estructurales en las fachadas, aislamientos de muros y cubiertas, recubrimientos de pisos y paredes, componentes de refuerzo de placas,

paneles, morteros y hormigones, como material decorativo y estético. Hoy en día, el vidrio es un material indispensable en la construcción y su tecnología está en continua evolución para dar respuesta a la constante demanda de nuevos productos con carácter multifuncional.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos que cubren una temática muy diversa dentro de los materiales vitreos destinados o aplicados en construcción. Aparecen artículos relacionados con las vidrieras artísticas, los acristalamientos, los vidrios funcionales, las fibras de refuerzo, los vitrocerámicos y los porcelanatos. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en sus respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- Procesos de alteración de las vidrieras medievales. Estudio y tratamientos de protección.  
*(Alteration processes of medieval stained glass windows. Study and protection treatments).*  
J. Mª Fernández Navarro.
- El efecto de la corrosión en vidrieras coloreadas.  
*(The effect of corrosion of stained glass windows).*  
J. Leissner.
- Formulación de vidrios absorbentes del calor.  
*(Formulation of heat absorbing glasses).*  
P. Álvarez-Casariego y P. Mazón.
- Dimensionamiento de placas de acristalamiento para edificios mediante un modelo probabilístico de rotura.  
*(A probabilistic model for failure design of glass plates in building).*  
A. Fernández Canteli, I. Viña y A. Bernardo Sánchez.
- Caracterización de fibras en forma de lana de roca para aislamiento obtenidas a partir de basaltos canarios.  
*(Characterization of fibers as rockwool for insulation obtained from canary islands basalts).*  
J. M. Cáceres, J. E. García Hernández y J. Mª Rincón.
- El GRC: Material compuesto de matriz inorgánica reforzado con fibras de vidrio AR.  
*(GRC: Composite material from an inorganic matrix reinforced with ar glass fibres).*  
P. I. Comino.
- Los materiales vitrocerámicos en la construcción.  
*(Glass-ceramic as building materials).*  
J. Mª Rincón y M. Romero.
- Gres porcelánico: Aplicaciones arquitectónicas, procesado y propiedades fisico-mecánicas.  
*(Porcelainized stoneware: Architectural, processing and physico-mechanical properties).*  
T. Manfredini, M. Romagnoli y J. Mª Rincón.

Venta de ejemplares: Distribución de Publicaciones  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja  
Serrano Galvache, s/n - 28033 Madrid  
Tfno.: (91) 302.04.40 - Fax: (91) 302.07.00