

SENSORES PARA EL SEGUIMIENTO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Gustavo S. Duffó (1,2,3) y Silvia B. Farina (2,3)

(1) División Corrosión – Departamento de Materiales
Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Gral. Paz 1499 (B1650KNA) San Martín,
Buenos Aires, Argentina.

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET) – Buenos Aires, Argentina

(3) Universidad Nacional de San Martín
(UNSAM) – San Martín, Argentina

Expositor: Gustavo S. Duffó
(duffo@cnea.gov.ar)

RESUMEN

Las estructuras de hormigón armado se deterioran, fundamentalmente por la corrosión de sus armaduras de acero. Por ese motivo, existe una necesidad de utilización de sensores que, permanentemente embebidos en las estructuras de hormigón armado, permitan conocer su estado desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras. Estos sensores le indican al especialista qué ocurre dentro de la estructura y le permiten tomar decisiones concientes a estrategias de mitigación de la degradación. Como contrapartida, estos sensores son extremadamente caros, tanto por su instrumentación como por las técnicas de recolección y análisis de datos. En el presente trabajo se describe el desarrollo de sensores que permiten medir on-line determinados parámetros que dan indicación del grado de corrosión del acero embebido en una estructura de hormigón armado. Estos parámetros son: el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión de las armaduras, el flujo de oxígeno que alcanza las mismas, la resistencia eléctrica del hormigón, el contenido de cloruro y la temperatura interna de la estructura. Dentro de esta línea de desarrollo, fue necesario fabricar y tipificar los distintos electrodos y se ha desarrollado una interfase que permite conectar estos sensores a una PC, y un software que maneja adecuadamente la información obtenida. Estos sensores han sido instalados en diversas estructuras. Los resultados obtenidos son promisorios y se está determinando su eficiencia a lo largo del tiempo.

Palabras clave: hormigón armado, corrosión, sensores.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles tales como puentes, represas hidroeléctricas y edificios

requieren enormes esfuerzos de construcción, grandes inversiones y una vida útil considerable. Tales estructuras son vitales para los estándares de vida de la población y sus roturas prematuras y/o inesperadas suelen ser catastróficas en términos de tiempo, dinero y, en algunos casos, vidas. Esto lleva a la necesidad de la utilización de sistemas –no destructivos, en lo posible– de evaluación de dichas estructuras. Previo a la posibilidad del monitoreo in-situ de la corrosión de las barras de acero de refuerzo en un hormigón armado, el análisis del estado de tales estructuras, se hacía a través de la toma de muestras de hormigón o por medio del uso de técnicas invasivas (destructivas). Sin embargo, la posibilidad del empleo de sensores embebidos es menos invasiva, y permite la medición de señales analógicas que pueden ser interrogadas empleando dispositivos electrónicos externos a la estructura [1].

La complejidad de los diversos tipos de corrosión hace que este monitoreo sea dificultoso. La temperatura y la concentración de especies disueltas tales como cloruro, afectan dramáticamente tanto el tipo de corrosión como su velocidad de propagación. Además, los parámetros controlables pueden modificarse con el tiempo, requiriendo periódicas mediciones en tiempo real. Un sistema de medición de corrosión integrado debe ser capaz de medir adecuadamente no sólo los parámetros electroquímicos relacionados con el proceso corrosivo en sí (resistencia de polarización, por ejemplo), sino también otros importantes parámetros medioambientales tales como temperatura, concentración de iones cloruro, conductividad eléctrica del hormigón y disponibilidad de oxígeno. Una vez medidos dichos parámetros, el especialista puede utilizar esa información para conocer la situación de la estructura y tomar decisiones respecto a la necesidad de aplicar estrategias de remediación, en caso de ser necesarias.

El monitoreo y control de la corrosión de aceros de refuerzo requiere de la medición de potenciales estables y por ende, los electrodos de referencia embebidos en la estructura son un elemento esencial para cualquier sistema de monitoreo [2]. Un electrodo de referencia "ideal" debe cumplir ciertos requisitos; debe ser estable e invariante frente a cambios térmicos y químicos en el hormigón; tolerante a diversas condiciones climáticas; tener la capacidad de dejar circular una pequeña corriente con un mínimo de polarización y de efectos de histéresis; ser estable a largos plazos y ser económico. Los electrodos más utilizados para este fin son los de óxido de manganeso y de grafito, pero en ciertas ocasiones, para cumplir con los requisitos mencionados, suelen emplearse *pseudo* electrodos de

referencia tales como los de óxido de titanio activado.

Con el objeto de determinar la calidad del espesor de recubrimiento y del acero de refuerzo, deben ser considerados los siguientes parámetros [3-5]:

* **Potencial de corrosión.** Este valor es el potencial electroquímico entre un electrodo de trabajo fabricado con el mismo acero de refuerzo y un electrodo de referencia. El valor medido, analizado bajo ciertas normas, provee información cualitativa del estado de la barra de refuerzo cercana al lugar de la medición.

* **Velocidad de corrosión.** Este parámetro es generalmente medido basado en la técnica de la resistencia a la polarización lineal. La medición se efectúa empleando un electrodo de trabajo del mismo acero de refuerzo, un electrodo de referencia y un contraelectrodo inerte.

* **Resistividad eléctrica del hormigón.** Este valor es uno de los factores más importantes que controlan la velocidad de corrosión del acero. Se suele obtener a partir de la medición de la resistencia eléctrica entre electrodos inertes y es posteriormente convertida a resistividad empleando una constante de calibración correspondiente al arreglo geométrico de electrodos empleado.

* **Transporte de oxígeno.** Este parámetro es otro de los importantes que controlan la velocidad de corrosión del refuerzo. Puede ser medido por medio de la combinación de dos electrodos inertes y un electrodo de referencia, haciendo empleo del valor de la corriente límite de oxígeno.

* **Contenido de cloruro.** Es medido a partir de la medición de la diferencia de potencial entre un electrodo específico de cloruros y un electrodo de referencia y luego convertido en concentración de cloruro a partir de una curva de calibración. Los sistemas que detectan cambios en el contenido de cloruro dentro del hormigón suelen ser utilizados como alerta temprana para predecir deterioros en la estructura.

* **Temperatura.** Puesto que todos los procesos químicos, electroquímicos y de transporte son, en mayor o menor medida, térmicamente activados, la corrosión del acero dependerá de la temperatura y por ende, es de fundamental importancia conocer su valor dentro de la estructura considerada.

Sensores embebibles capaces de medir todos estos parámetros están disponibles en el mercado internacional, pero con precios prohibitivos para el mercado local,

debido a su alto grado de sofisticación (muchas veces, innecesaria). Por ese motivo, en el presente trabajo se presenta el desarrollo de sensores económicos que, permanentemente embebidos en una estructura de hormigón armado, puede ser empleado para el seguimiento del deterioro de una estructura, ya sea nueva o preexistente. Por supuesto que hay variadas técnicas para el seguimiento del proceso de corrosión, pero las empleadas en este trabajo son las más simples y económicas que proveen la mayor exactitud y reproducibilidad en los resultados.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El material seleccionado como electrodo de referencia para ser embebido en hormigón durante largos plazos fue un alambre de titanio de 3 mm de diámetro, recubierto por óxido de titanio y producido comercialmente para la fabricación de ánodos para la protección catódica con corriente impresa de estructuras de hormigón. El tipo de recubrimiento es el denominado Metal-Oxido de Metal (MOM). La superficie de los alambres está recubierta por óxidos de metales nobles que se aplicaron empleando un proceso de propiedad del fabricante, y que en el presente caso corresponden a óxidos de iridio y tantalio. Estos alambres fueron utilizados como electrodos de referencia efectuándose un contacto con un alambre de cobre y aislando adecuadamente la zona de unión entre ambos materiales.

Se llevó a cabo un estudio electroquímico completo de estos electrodos [6], a efectos de determinar su capacidad para ser utilizados como electrodos de referencia.

A efectos de determinar cómo se modifica el comportamiento de estos electrodos en función del pH del medio circundante, los electrodos fueron sumergidos en soluciones reguladoras, cuyos valores de pH estuvieron comprendidos dentro del ámbito habitual de pHs de hormigones sanos y fuertemente carbonatados. Las soluciones acuosas empleadas fueron: pH 7, solución de KH₂PO₄ 0,0087 M + Na₂HPO₄ 0,0302 M; pH 9,4 solución Na₂B₄O₇ 0,01M; pH 10, solución de NaHCO₃ 0,025M + Na₂CO₃ 0,025M; pH ~ 12,5 solución saturada de Ca(OH)₂; y pH 13,5, solución de poros de hormigón simulada (NaOH 0,190M, KOH 0,634M en solución saturada de Ca(OH)₂). Todas estas soluciones fueron preparadas con reactivos de grado analítico y agua de alta pureza (18 MΩ.cm). Los potenciales de los electrodos fueron medidos frente a un electrodo de calomel saturado durante 45 días, a temperatura ambiente y expuestas al aire.

Para estudiar el efecto del grado de oxigenación sobre los potenciales medidos, en una solución de pH 13,5 se sumergieron los electrodos en una celda de polietileno y se burbujeó a través de ella, en forma alternada, nitrógeno de alta pureza y aire, por periodos de 24 horas hasta totalizar 100 horas de exposición, durante las cuales se midió la evolución del potencial de los electrodos frente a un electrodo de calomel saturado. También se determinó el efecto de la presencia de

electrodos, y se trazaron sus curvas de polarización en los medios mencionados determinándose, además, por medio de ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica su impedancia. Estos electrodos también fueron embebidos en cilindros de morteros fabricados con cemento Portland normal y posteriormente expuestos al ambiente de laboratorio y a solución acuosa de NaCl 3,5%, midiendo su potencial frente a un electrodo de calomel saturado apoyado sobre el exterior de los cilindros.

La Tabla 1 muestra los resultados de los potenciales de los electrodos MOM en función del pH de la solución. Si bien los valores fueron determinados frente a un electrodo de calomel saturado, en la tabla se muestran convertidos al potencial del electrodo estándar de hidrógeno. En todos los casos, los potenciales se estabilizan luego de una semana de inmersión. Cuando se determina la sensibilidad de estos electrodos a las variaciones en la presión parcial de oxígeno, se observa que no se detectan cambios en el potencial medido cuando se pasa de burbujeo de aire a nitrógeno, en solución de pH 13,5. Esta es una clara indicación de la independencia del potencial con el contenido de oxígeno. Este fenómeno es de fundamental importancia para la utilización de este material como electrodo de referencia para embeber en el hormigón, ya que la concentración de oxígeno puede variar significativamente durante la vida útil de la estructura [1,5]. Finalmente, se destaca que estos electrodos modifican su potencial en menos de 170 mV luego de 600 días de estar embebidos en un mortero, valor aceptable para este tipo de aplicaciones [7].

Cuando los valores de la Tabla 1 son incluidos en un diagrama de Pourbaix Ir-H₂O (Figura 1) [8], se observa que los resultados caen sobre la línea correspondiente a la reacción:



Luego, se puede concluir que el potencial del electrodo está determinado por dicho equilibrio. El oxígeno no está implicado en tal reacción y ese es el motivo por el cual el potencial de electrodo es independiente de la presión parcial de oxígeno, tal como se explicó en el párrafo anterior.

Tabla 1. Potencial del electrodo MOM vs. Electrodo Estándar de Hidrógeno luego de 40 días de exposición a varios pH (numero de electrodos ensayados 5)

	pH 7,4	pH 9,2	pH 10	pH 12,5	pH 13,5
Mínimo	0,400	0,330	0,306	0,167	0,073
Máximo	0,420	0,359	0,312	0,184	0,120
Promedio	0,413 ± 0,007	0,345 ± 0,010	0,310 ± 0,001	0,174 ± 0,014	0,108 ± 0,017

El electrodo específico de cloruro fue fabricado mediante el anodizado de alambres de plata 99,99% en soluciones que contienen KCl y HCl, luego de un tratamiento de activación de la superficie. El potencial de estos electrodos fue medido frente a un electrodo de calomel saturado en soluciones de KCl en un ámbito de concentraciones comprendido entre 10⁻⁵ y 1 M, a efectos de determinar la recta de calibración. Los resultados obtenidos muestran una muy buena correlación (r²= 0,92) entre el potencial del electrodo específico y el logaritmo de la concentración de iones cloruro, con una pendiente cercana a la predicha por la ecuación de Nerst para este sistema (-0,063±0,003).

La disponibilidad de oxígeno es obtenida a partir de la corriente circulante entre dos electrodos inertes, cuando uno de ellos es polarizado catódicamente en la zona correspondiente a la corriente límite de oxígeno. La densidad de corriente I que circula luego de determinado tiempo es convertida en flujo de oxígeno con la ley de Faraday [9, 10]:

$$\frac{\text{moles } O_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = \frac{I}{4 \cdot F}$$

donde F es la constante de Faraday (96500 coul/equiv).

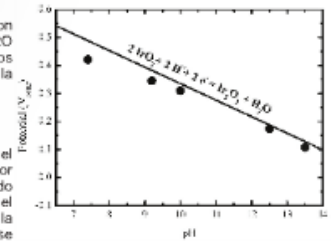


Figura 1. Diagrama de Pourbaix Ir-H₂O donde se han incluido los potenciales promedio mostrados en la Tabla 1.

La resistividad eléctrica del hormigón (p) es medida aplicando una señal sinusoidal de baja amplitud entre dos electrodos inertes

similares y calculando el valor de la resistencia entre ellos (R_s). La constante de la celda (k) es determinada midiendo las resistencias de soluciones de resistividad conocida (soluciones de para concentraciones comprendidas entre 10-5 y 1M) de manera que $\rho = k \cdot R_s$.

El potencial de corrosión (E_{corr}) es medido entre un electrodo de trabajo construido con una barra de acero de construcción y el electrodo de referencia, mientras que la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) se determina polarizando catódicamente al electrodo de trabajo, empleando como contraelectrodo a un material inerte, y midiendo el potencial del acero luego de cierto periodo de tiempo (E). La resistencia de polarización (R_p) es obtenida como:

$$R_p = -\frac{E - E_{corr}}{I} - R_s$$

donde R_s es la resistencia medida se acuerdo a lo detallado en el párrafo anterior. Finalmente, la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) se obtiene con la expresión [11]:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

siendo B una constante que vale 26 mV ó 52 mV dependiendo el estado del acero [11].

Finalmente, la temperatura es medida con un termómetro de resistencia de platino (Pt 100) protegido del medio que la rodea por medio de una vaina de un material protector.

Todos los electrodos mencionados, conjuntamente con el termómetro de platino son embebidos en una resina especial, resistente al medio alcalino del hormigón. La parte expuesta de los electrodos (y el termómetro envainado) son luego recubiertos con un mortero poroso (figura 2) y el conjunto es montado sobre las armaduras para el caso de una construcción nueva o embebido en una estructura ya existente por medio de la realización de una perforación y su posterior cobertura con mortero de reparación.

El sensor es luego conectado por medio de un cable a una caja de control que a su vez está conectada por medio de un puerto USB a una computadora portátil, la cual tiene cargado el software desarrollado (denominado Hornicor 400) que permite secuenciar las mediciones, guardar los datos en una base y generar un sistema de alarmas cuando alguno de los valores cruza umbrales preestablecidos. En cuanto a los métodos de

medición, la temperatura, el potencial de corrosión y el potencial del electrodo específico de cloruros se determinan en forma pasiva a partir de datos generados por el sensor; mientras que para las mediciones de la resistividad eléctrica del hormigón, el flujo de oxígeno y la densidad de corriente de corrosión es necesario generar una señal que perturbe al sensor y lo que se mide es la respuesta a esta perturbación.



Figura 2. Aspecto final del sensor preparado para ser embebido en una estructura.

Hasta el momento, estos sensores han sido embebidos en varias estructuras, prototipos y probetas preparadas al efecto. Por citar algunos ejemplos, fueron instalados en un prototipo de contenedor de residuos radioactivos fabricado en la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Rep. Argentina; en varios sectores de represas hidroeléctricas de la Argentina; en probetas armadas por el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMITE) y expuestas en ambiente marino en Mar del Plata y en probetas fabricadas en el Slovenian National Building and Civil Engineering Institute a través de un convenio de cooperación internacional. Los resultados obtenidos son promisorios y permiten el adecuado seguimiento del estado de una estructura de hormigón armado desde el punto de vista del proceso de corrosión.

3. CONCLUSIONES

A partir del presente trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se ha desarrollado un sensor embebible en estructuras de hormigón armado, de bajo costo y que permite el seguimiento de los procesos de corrosión en estructuras nuevas o preexistentes.

Este sensor provee información *on-line* del potencial y densidad de corriente de corrosión de las armaduras, la resistividad eléctrica del hormigón, la disponibilidad de oxígeno, el contenido de cloruro y la temperatura en el interior de la estructura.

REFERENCIAS

1. G.S. Duffó and S.B. Farina, "Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures", *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2009), p. 2746-2751.
2. S. Muralidharan, T.H. Ha, J. Bae, Y.C. Ha, H.G. Lee, K.W. Park, and D.K. Kim, "Electrochemical studies on the solid embeddable reference sensors for corrosion monitoring in concrete structure", *Mater. Lett.*, Vol. 60 (2006), p. 651-655.
3. J. McCarter and Ø. Vennesland, "Sensor systems for use in reinforced concrete structures", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 18 (2004), p. 351-358.
4. J.P. Broomfield, K. Davies and K. Hladky, "The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures", *Cement Concrete Comp.*, Vol. 24 (2002), p. 27-34.
5. P. Pedferri, R.B. Polder, L. Bertolini and B. Elsener, "Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair", 2004, Wiley-VCH, Weinheim.
6. G.S. Duffó, S.B. Farina and C.M. Giordano, "Characterization of solid embeddable reference electrodes for corrosion monitoring in reinforced concrete structures", *Electrochim. Acta*, Vol. 54 (2009), p. 2010-2020.
7. P. Castro, A.A. Sagüés, E.I. Moreno, L. Maldonado and J. Genescá, "Characterization of Activated Titanium Solid Reference Electrodes for Corrosion Testing of Steel in Concrete", *Corrosion*, Vol. 52 (1996), p. 609-617.
8. M. Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria", 1974, NACE, Houston, TX.
9. O.E. Gjør, Ø. Vennesland and A.H.S. El-Busaidy, "Diffusion of dissolved oxygen through concrete", *Mater. Performance*, Vol. 25 (1986), p. 39-44.
10. M.J. Correia, E.V. Pereira and M.M. Salta, "Sensor for oxygen evaluation in concrete", *Cement Concrete Comp.*, Vol. 28 (2006), p. 226-232.
11. C. Andrade and J.A. Gonzalez, "Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements", *Werkst. Korros.*, Vol. 29 (1978), p. 515-519.

LATINCORR®

proporcionando la posibilidad de mejorar la seguridad de los pozos y priorizar acciones de mitigación y recursos.

BIBLIOGRAFIA

1. NORSOK Standard D-010, "Well integrity in drilling and well operations", Rev 3, August 2004.
2. JAMAL Al- Ashhab, "Well Integrity Management System (WIMS)", ZAKUM DEVELOPMENT COMPANY (ZADCO), ABU DHABI, UNITED ARAB EMIRATES, 2004.
3. ECP-VPR-M-001. Manual del modelo de gestión de integridad de activos estáticos - GIAE de la VPR Ecopetrol S.A., 2007.
4. ECP-DRI-I-007, Uso de la Matriz de Valoración de Riesgos - RAM, Ecopetrol S.A. 31 de Marzo de 2008.
5. NACE MR 0176 "Standard Material Requirements Metallic Materials for Sucker-Rod Pumps for Corrosive Oilfield Environments". 2006
6. API RP-580. "Risk Based Inspection". First Edition, 2002
7. LOPEZ L., MATEUS M., CASTELLANOS D.E., ESTEVEZ J.A. Desarrollo de un Modelo para la Valoración del Riesgo de Pérdida de la Integridad Mecánica de Pozos en Producción Onshore. Latincorr 2010
8. LOPEZ L., MATEUS M., CASTELLANOS D.E., ESTEVEZ J.A. Manual del Usuario para la Aplicación de la Metodología de Integridad de Pozos y su Modelo de Evaluación de Riesgos ECOSMIP v1.0. Instituto Colombiano del Petróleo. 2009.



EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA CORROSIÓN



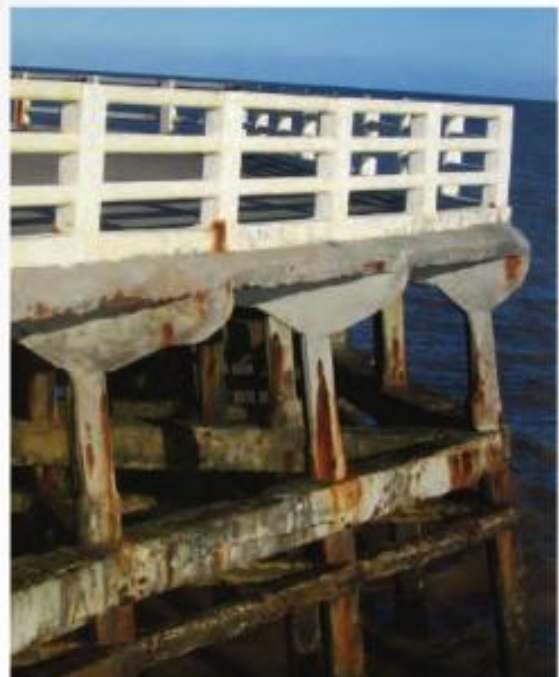
- Las estructuras civiles tales como puentes, represas hidroeléctricas y edificios son vitales para la población y su rotura prematura y/o inesperada suele ser catastrófica en términos de tiempo, dinero y, en algunos casos, vidas
- Un diagnóstico adecuado es de fundamental importancia para que los especialistas puedan conocer el estado de la estructura, decidir qué nivel de degradación es aceptable y tomar decisiones respecto a la necesidad de aplicar estrategias de remediación
- Este diagnóstico está basado en la realización de una inspección detallada que incluye, además de la observación directa, la determinación de ciertos parámetros físicos-químicos de la estructura

La División Corrosión de Depto. de Materiales de la Comisión Nacional de Energía Atómica de la República Argentina dispone de:



► EQUIPAMIENTO adecuado para la medición desde el exterior de la estructura de los parámetros necesarios para realizar un diagnóstico

► SENSORES que embebidos en una estructura de hormigón armado nueva o preexistente, permiten la determinación de dichos parámetros desde el interior de la misma y su procesamiento directo



Contacto: Dr. Gustavo S. Duffó
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA - Depto. Materiales
Av. Gral. Paz 1499 - (B 1650 KNA) San Martín Buenos Aires - Argentina
Tel. +54-11-6772-7403 Fax. +54-11-6772-7388 e-mail duffo@cnea.gov.ar



LATINCORR

**METODOLOGÍA PARA EL MANEJO INTEGRAL
DE LA CORROSIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE ALTO VOLTAJE**

**EVALUACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN
DE SULFUROS DE HIERRO GENERADOS
POR BACTERIAS SULFATO-REDUCTORA**

**ANÁLISIS DE INTEGRIDAD MECÁNICA DE POZOS EN
PRODUCCIÓN**

**CELEBRANDO LATINCORR 2010
EN QUITO, ECUADOR**

EDICIÓN DE NACE CORROSION 2011



NCC
The National Corrosion Center
at Rice University



NACE
INTERNATIONAL