



XXV CONGRESO DE LA SOCIEDAD MEXICANA DE ELECTROQUÍMICA

3RD MEETING OF THE MEXICAN SECTION ECS



## PROPIEDADES DIELECTRICAS Y ELECTROQUÍMICAS DE CONCRETOS SUSTENTABLES

R. Corral-Higuera<sup>1,2,\*</sup>, S. P. Arredondo-Rea<sup>1,2</sup>, M. A. Neri-Flores<sup>1</sup>, V. Orozco-Carmona<sup>1</sup>, J. M. Gómez-Soberón<sup>3</sup>, F. Almeraya-Calderón<sup>1</sup>, J. L. Almaral-Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Ave. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, C.P. 31109, Chihuahua, Chihuahua, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis,

Fuente de Poseidón y Ángel Flores s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 81223, Sinaloa, México.

<sup>3</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona, Gregorio Marañón 44-50, C.P. 08020, Barcelona, España.

\*Tel: (614)439-4850, ramon.corral@cimav.edu.mx

### RESUMEN

Como estrategias para contribuir en la sustentabilidad de la industria del concreto se está proyectando mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado y el reemplazo parcial o total de sus ingredientes por materiales reciclables. En este estudio se evaluó la resistividad eléctrica y su relación con la microestructura y resistencia a la corrosión electroquímica de concretos reforzados fabricados con características de sustentabilidad, es decir, con agregados reciclados y materiales cementantes suplementarios. La resistividad eléctrica del concreto está íntimamente relacionada con la microestructura de la matriz cementante y con la estructura y distribución de poros. Por la naturaleza de sus ingredientes, es de suponerse que los concretos sustentables propuestos presentan diferente microestructura y porosidad que el concreto convencional, motivo por el cual se analizó la respuesta eléctrica y electroquímica de dichos sistemas mediante la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.

**Palabras Clave:** Corrosión, Resistividad eléctrica, Espectroscopía de impedancia, electroquímica, Concreto reciclado, Sustentabilidad.



CTS032  
269 – 280

31 DE MAYO – 4 DE JUNIO, 2010  
ZACATECAS, MÉXICO



## 1. INTRODUCCIÓN

Debido al severo impacto ambiental que causa el proceso de manufactura del concreto y como contribución en la sustentabilidad de dicha industria, actualmente se está proyectando mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado y el reemplazo parcial o total de sus ingredientes por materiales reciclables. Entre los materiales alternativos más utilizados en la fabricación de concreto están los que reemplazan parcialmente al cemento Portland (Materiales Cementantes Suplementarios [MCS]) como el humo de sílice (HS), la ceniza volante (CV) y la escoria de alto horno, y los agregados de concreto reciclado como reemplazo parcial o total de los agregados naturales. El número de investigaciones sobre el comportamiento de concretos fabricados con agregados reciclados es amplio [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10], sobre todo en lo que a desempeño mecánico se refiere; en cuanto a este tipo de concreto con la adición de MCS, en los últimos años se han llevado a cabo importantes investigaciones [11,12,13,14,15] en las que se resalta el impacto positivo de los MCS en el desempeño del concreto y en el medio ambiente.

Por la naturaleza de sus ingredientes, los concretos fabricados con materiales reciclados presentan diferente microestructura y mayor porosidad que el concreto convencional [16,17,18,19] y se sabe que la resistividad eléctrica del concreto, que está íntimamente relacionada con la microestructura de la matriz cementante y con la estructura y distribución de poros [20,21,22], es un parámetro importante para evaluar aspectos de durabilidad. En ese sentido, el objetivo de este trabajo fue analizar la respuesta eléctrica y electroquímica de concretos reforzados fabricados con agregados reciclados y con MCS mediante la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE) que ha sido probada como una técnica eficiente en evaluación de propiedades dieléctricas y electroquímicas de sistemas resistivos como el caso del concreto reforzado.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se fabricaron cuatro series de probetas, todas con relación agua-material cementante de 0.48. La serie de referencia se fabricó con agregado natural (AN) y 100% Cemento Portland Compuesto (CPC) [23], la segunda serie fue hecha con agregado grueso reciclado (AR) y 100%

CPC, una tercer serie se hizo con AR, y 30% CV como reemplazo parcial del CPC y la cuarta serie se fabricó con AR, y 10% HS como reemplazo parcial del CPC.

## 2.1. Materiales

El AR procedió de la trituración de probetas de concreto fabricadas con agregados naturales, cemento Portland compuesto, relación agua/cemento de 0.50 y curadas durante 28 días a temperatura y humedad controladas de  $23 \pm 2$  °C y  $98 \pm 1\%$ , respectivamente. Los agregados naturales son roca triturada de banco (grueso) y arena de río (fino). Algunas de las propiedades físicas de los agregados se muestran en la Tabla I.

**Tabla I.** Propiedades físicas de los agregados usados en las mezclas de concreto.

Tipo de agregado	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Humedad (%)	Módulo de finura (%)	Tamaño máximo (mm)
Grueso reciclado	2.19	6.55	2.14	-	19
Grueso natural	2.50	0.44	0.28	-	19
Fino natural	2.43	4.08	6.66	2.73	4.76

Como MCS, subproductos de procesos industriales, se utilizó ceniza volante mexicana baja en calcio Clase F según norma ASTM C618 [24] y humo de sílice Norteamericano con los requerimientos que marca la norma ASTM C1240 [25]. En la Tabla II se muestran las propiedades físico-químicas más importantes de los materiales cementantes.

**Tabla II.** Propiedades físico-químicas de los materiales cementantes.

Material	Composición química (% en peso)							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
CPC	19.94	4.40	2.97	63.50	3.08	0.42	0.12	-
CV	58.84	16.72	3.52	7.35	0.13	0.79	0.94	1.76
HS	95.22	0.08	2.37	0.26	0.11	0.56	0.30	0.24

<b>Propiedades físicas</b>			
	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Superficie específica, BET (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Tamaño promedio (μm)</b>
CPC	3.15	1400	15-25
CV	2.35	1200	5 - 15
HS	2.27	19600	0.1 - 0.2

## 2.2. Propiedades Dieléctricas y Electroquímicas

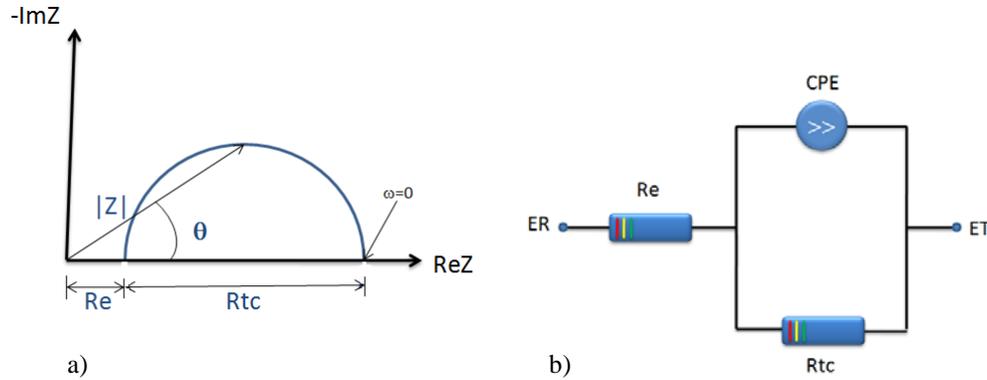
Para evaluar la resistividad eléctrica y la resistencia a la corrosión de los sistemas de concreto reforzado, dos probetas cilíndricas ( $l=30$  cm,  $\Phi=15$  cm) de cada mezcla fueron fabricadas con las características y proporciones presentadas en la Tabla III. Las probetas fueron curadas durante 28 días en una cámara con temperatura de  $23 \pm 2$  °C y  $98 \pm 1\%$  de humedad relativa.

A cada probeta se le embebieron dos barras de acero al carbono 1018 de 9.5 mm de diámetro con un área expuesta de  $64$  cm<sup>2</sup> y con 4.5 cm de recubrimiento. Las barras de acero fueron decapadas antes de su habilitación para que el proceso de corrosión en los primeros meses estuviera activo y poder observar tendencias de corrosión en un periodo de exposición relativamente corto. Las probetas fueron expuestas en solución acuosa al 3.5% de NaCl y se evaluó tanto la variación de la Resistencia electrolítica ( $R_e$ ), que se relaciona con la resistividad del concreto, como la variación de la Resistencia de transferencia de carga ( $R_{tc}$ ), relacionada con la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) del refuerzo.

**Tabla III.** Características y proporciones de las mezclas de prueba (relativo a 1m<sup>3</sup> de concreto).

<b>Materiales (Kg)</b>	<b>Identificación de las mezclas</b>			
	<b>Agregado grueso y fino natural</b>	<b>Agregado grueso reciclado, arena natural y MCS</b>		
	<b>AN 100% CPC</b>	<b>AR 100% CPC</b>	<b>AR 30% CV</b>	<b>AR 10% HS</b>
Agua	213.31	213.31	213.31	213.31
Grava	994.55	870.58	870.58	870.58
Arena	766.17	915.35	915.35	915.35
Cemento	444.44	444.44	311.11	400.00
MCS	0.000	0.000	133.33	44.44





**Figura 2.** a) Diagrama de Nyquist ideal, b) CEE utilizado para simular resultados experimentales de EIE.

La  $R_{tc}$  resultante de la simulación del CEE y la  $R_e$  obtenida de la intersección a altas frecuencias de los diagramas de Nyquist se usaron para calcular  $i_{corr}$  y la resistividad eléctrica del concreto ( $\rho$ ), respectivamente. Mediante la Ecuación 1 [26] se calculó  $i_{corr}$ , donde  $B$  es una constante que toma el valor de 0.052 V para corrosión pasiva [27,28,29,30], mientras que  $\rho$  fue determinada a partir de la Ecuación 2, donde  $C_c$  es una constante de celda que depende de la geometría del cuerpo conductor [31].

$$i_{corr} = \frac{B}{R_{tc}} \quad (1)$$

$$R_e = \rho \cdot C_c \quad (2)$$

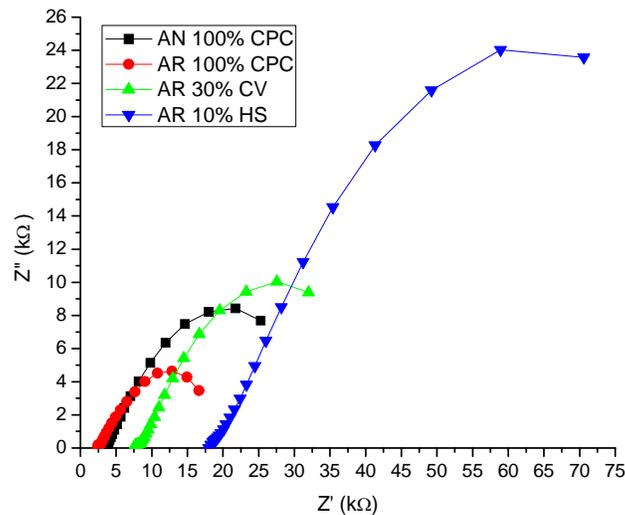
Donde,  $C_c$  es una constante de celda (58.47 cm),  $L$  la longitud sumergida de la probeta de concreto reforzado (20 cm),  $D$  el diámetro de la probeta de concreto (15 cm),  $d$  = diámetro del acero de refuerzo (0.95 cm) y  $z$  la distancia centro a centro entre la probeta de concreto y el refuerzo (5.05 cm).

La constante de celda  $C_c$  fue determinada analíticamente (Ecuación 3) aplicando los principios de conducción de calor a través de cuerpos, propuestos por Sunderland y Johnson [32]. La ecuación de Laplace fue resuelta considerando como condiciones de frontera la temperatura del cuerpo de acero (refuerzo),  $T_1$  y la temperatura del cuerpo de concreto,  $T_2$ ;  $T_1 = T_2 =$  constante.

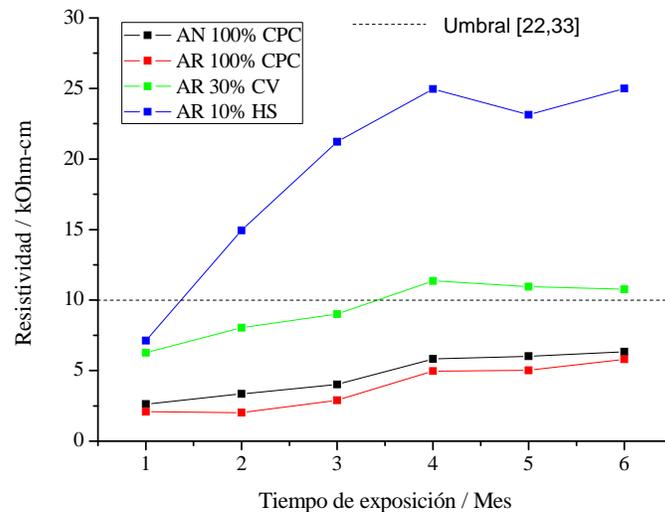
$$C_c = \left( \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{D^2 + d^2 - 4z^2}{2Dd}\right)} \right) \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades dieléctricas y electroquímicas de los sistemas concreto-acero a los 90 días de exposición se representan en el diagrama de Nyquist de la Figura 3, donde se puede observar que en el sistema AR 100% CPC presenta la menor  $R_{tc}$  y  $R_e$ , mientras que el sistema AR 10% HS es el de mayor  $R_e$  y  $R_{tc}$ . La  $\rho$  en función del tiempo de exposición se muestra en la Figura 4 donde puede observarse que el reemplazo de AR por AN aumenta ligeramente la conductividad del concreto y que la  $\rho$  de ambos sistemas (AN 100% CPC y AR 100% CPC) no supera el umbral de los 10 k $\Omega$ -cm lo que significa que no es el parámetro controlante de la velocidad de corrosión y por lo tanto hay un alto riesgo de que el fenómeno inicie [22,33]. En cuanto a los sistemas con MCS, se puede resaltar el efecto positivo de estos en la  $\rho$  del concreto; la  $\rho$  el sistema AR 30% CV rebasa ligeramente el valor umbral, mientras que el sistema AR 10% HS lo supera ampliamente dejando entrever que la potencialidad de que inicie la corrosión es de moderada a baja. El aumento de la  $\rho$  de los sistemas con MCS se atribuye a la densificación del sistema poroso ocasionada por la generación de mayor cantidad de hidratos de silicato de calcio y menor cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  producto de la reacción puzolánica entre este último con el  $\text{SiO}_2$  contenido en los MCS. Puede observarse en la Tabla II que el HS es aproximadamente 100 veces más fino que el cemento y la CV y contiene mayor cantidad de  $\text{SiO}_2$ ; sabiendo que las reacciones de hidratación y puzolánica son fenómenos superficiales, puede deducirse que la microestructura del concreto con HS es más densa que el resto de los sistemas y por ello presenta mayor resistividad eléctrica. Además, dentro de los primeros tres meses la  $\rho$  de los sistemas con MCS aumenta rápidamente, mientras que después de tal periodo, el aumento es a una velocidad más lenta, lo cual da indicios de que tales reacciones se acercan al equilibrio transcurridos los 90 días aproximadamente.



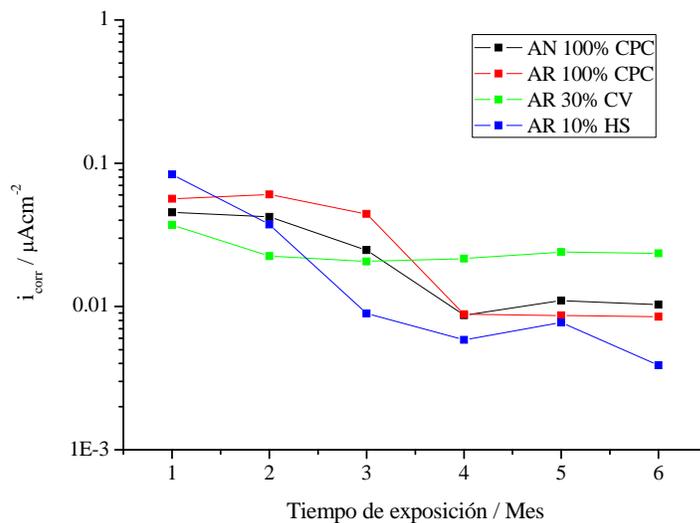
**Figura 3.** Diagrama de Nyquist para los sistemas concreto-acero a los 90 días de exposición



**Figura 4.** Evolución de la resistividad eléctrica en función del tiempo de exposición.

Los resultados de  $i_{\text{CORR}}$  determinados a partir de los valores obtenidos de  $R_{\text{tc}}$  se presentan en la Figura 5 de donde puede deducirse la resistencia a la corrosión de los sistemas acero-concreto en estudio. En general, puede observarse que el mes tres es el punto de inflexión entre dos estados de corrosión con diferente actividad, lo cual se atribuye a que a partir de este punto las reacciones de hidratación y puzolánicas del cemento y MCS, respectivamente alcanzan el equilibrio y su velocidad se estabiliza. Se puede observar además que el sistema que presenta

mayor resistencia a la corrosión es el AR 10% HS, pues a pesar de que su actividad corrosiva fue la mayor en el primer mes, disminuyó significativamente en el transcurso de los meses subsiguientes hasta llegar al menor nivel de corrosión ( $0.004 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) en el mes seis y con un promedio de  $0.025 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  en todo el periodo. Por otro lado, el sistema AR 100% CPC presentó los niveles de corrosión mayores (de  $0.044$  a  $0.060 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) hasta el mes tres; y aunque en los últimos tres meses su actividad corrosiva disminuyó considerablemente su promedio de  $i_{\text{corr}}$  en el periodo fue el mayor ( $0.031 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), lo que significa que es el sistema con menor resistencia a la corrosión. El sistema AR 30% CV presentó los menores niveles de corrosión hasta el mes dos (de  $0.022$  a  $0.037 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) y su actividad se mantuvo en ese nivel en los meses subsiguientes alcanzando una  $i_{\text{corr}}$  promedio de  $0.025 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  que se compara con la del sistema AR 10% HS. Lo anterior demuestra que aunque haya una diferencia significativa en cuanto a  $\rho$  de los sistemas con MCS, la resistencia a la corrosión puede ser muy similar. Esto se atribuye al alto contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\cong 17\%$ ) de la CV con respecto al HS ( $\cong 0.1\%$ ) y el cemento ( $\cong 4\%$ ). En un estudio por rayos-X, Koulombi et al. [34] demostraron que la adición de CV genera un contenido más alto de cloroaluminato (sal de Friedel), y consecuentemente niveles más bajos de cloruros libres, los cuales contribuyen en la conducción iónica y son responsables de la corrosión localizada del acero de refuerzo.



**Figura 5.** Variación de la densidad de corriente de corrosión en función del tiempo de exposición.

#### 4. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones experimentales de este estudio, se puede concluir lo siguiente:

- El reemplazo del 100% de agregado reciclado por el natural disminuye la resistividad eléctrica del concreto y por tanto aumenta la cinética de corrosión del refuerzo.
- La ceniza volante y el humo de sílice contribuyen de manera importante en el aumento en la resistividad eléctrica del concreto, por densificación de la matriz cementante y refinamiento de poros.
- Aunque la magnitud de la resistividad eléctrica del concreto con humo de sílice es dos veces más grande que la del concreto con ceniza volante, la resistencia a la corrosión de ambos es muy similar, debido al alto contenido de  $Al_2O_3$  de la ceniza volante con respecto al humo de sílice.
- Es posible dilucidar grado y mecanismo de hidratación de la pasta cementante del concreto mediante la determinación de la resistividad eléctrica por espectroscopía de impedancia electroquímica.
- El uso de cenizas volantes y humo de sílice, subproductos de procesos industriales, aumentan la durabilidad del concreto con 100% de agregado grueso reciclado y este puede ser usado en estructuras expuestas a ambientes agresivos contribuyendo en la sustentabilidad de la industria del concreto.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Sinaloa y al Centro de Investigación en Materiales avanzados, S.C. por las facilidades otorgadas y al CONACYT por el apoyo a través de una beca doctoral.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, *Cement and Concrete Composites*, **24**, 269 (2002).  
[2] H. Chen, T. Yen, K. Chen, *Cement and Concrete Research*, **33**, 125 (2003).

- [3] A. Katz, *Cement and Concrete Research*, **33**, 703 (2003).
- [4] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok, S.C. Kou, *Cement and Concrete Research*, **34**, 31 (2004).
- [5] I. Topçu, S. Sengel, *Cement and Concrete Research*, **34**, 1307 (2004).
- [6] T. Tu, Y. Chen, C. Hwang, *Cement and Concrete Research*, **36**, 943 (2006).
- [7] I. Martínez, C. Mendoza, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, **7**, 151 (2006).
- [8] K. Rahal, *Building and Environment*, **42**, 407 (2007).
- [9] M. Casuccio, M.C. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, *Construction and Buildings Materials*, **22**, 1500 (2008).
- [10] A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, *Construction and Buildings Materials*, **23**, 829 (2009).
- [11] K.Y. Ann, H.Y. Moon, Y.B. Kim, J. Ryou, *Waste Management*, **28**, 993 (2008).
- [12] B. González, F. Martínez, *Building and Environment*, **43**, 429 (2008).
- [13] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, *Materials and Structures*, **41**, 1191 (2008).
- [14] M.L. Berndt, *Construction and Buildings Materials*, **23**, 2606 (2009).
- [15] V. Corinaldesi, G. Moriconi, *Construction and Buildings Materials*, **23**, 2869 (2009).
- [16] J.M.V. Gómez, *Cement and Concrete Research*, **32**, 1301 (2002).
- [17] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, *Construction and Buildings Materials*, **18**, 461 (2004).
- [18] V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, *Cement and Concrete Research*, **35**, 1195 (2005).
- [19] M. Etxeberria, E. Vazquez, A. Mari, *Magazine of Concrete Research*, **58**, 683 (2006).
- [20] P.J. Tumidajski, A.S. Shumacher, S. Perron, P. Gu, J.J. Beaudoin, *Cement and Concrete Research*, **26**, 539 (1996).
- [21] P.J. Tumidajski, *Cement and Concrete Research*, **35**, 1262 (2005).
- [22] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, O.E. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, M. Raupach, *Materials and Structures*, **33**, 603 (2000).
- [23] ONNCCE, NMX-C-414-04, *Especificaciones y métodos de prueba del cemento hidráulico*, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto México, (2004).
- [24] ASTM International. ASTM C618-99, *Standard Specification for Coal Fly Ash for Use as a Mineral Admixture in Concrete*. ASTM International, 1999.
- [25] ASTM International, ASTM C1240-05, *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. ASTM International, 2005.

- [26] M. Stern, A. Geary, *Journal of the electrochemical society*, **104**, 56 (1957).
- [27] R.K. Dhir, M.R. Jones, M.J. McCarthy, *Cement and Concrete Research*, **23**, 1443 (1993).
- [28] J.A. González, E. Ramírez, A. Bautista, S. Feliú, *Cement and Concrete Research*, **26**, 501 (1996).
- [29] K.R. Gowers, S.G. Millard, *Corrosion Science*, **35**, 1593 (1993).
- [30] P.S. Mangat, B.T. Molloy, *Materials and Structures*, **25**, 404 (1992).
- [31] J.M. Torrents, J. Roncero, R. Gettu, *Cement and Concrete Research*, **28**, 1325 (1998).
- [32] J.E. Sunderland, K.R. Johnson, ASHRAE 71<sup>st</sup> Annual Meeting, Cleveland (1964).
- [33] C. Andrade, C. Alonso, *Construction and Building Materials*, **10**, 15 (1996).
- [34] N. Koulombi, G. Batis, C.H. Malami, *Progress in the understanding and prevention of corrosion*, Mercer AD editors, Institute of Materials, Spain, 619 (1993).