

Análisis del potencial y velocidad de corrosión en concretos reforzados modificados con Microsilice

RESUMEN: En la presente investigación se evalúa el comportamiento electroquímico en especímenes de concreto reforzado, por lo que serán expuestos en agua con NaSO_4 , así se determinara progresivamente velocidades y potenciales de corrosión.

Se elaboraron vigas de concreto, en los cuales se colocaron barras de acero (AISI 1018) y acero galvanizado, dichas vigas se estudiarán mediante procesos de técnicas electroquímicas de corrosión. El diseño de la mezcla se elaboró con el método ACI 211.1. Antes se realizaron pruebas de los agregados para conseguir las características de acuerdo a su normativa ONNCCE (NMX-111-ONNCCE-2014). El proceso de curado de los especímenes de acuerdo a su estudio establecido con la normativa ONNCCE (NMX-C-159-ONNCCE-2004). Las 2 mezclas elaboradas de concreto con un diseño de $f'c$: 300 kg/cm^2 empleando un tipo de cemento CPC 30R, después de la etapa de curado fueron puestos en un recipiente con agua contaminada con 5% de NaSO_4 para poder ser evaluados.

La utilización de una puzolana artificial (Microsilice), se utilizara con el fin de contribuir en al concreto resistencia, y durabilidad a diferentes períodos, tomando en consideración 10 meses de estudio. Así se reduce la cantidad de cemento en la obra y se logra la reducción del mantenimiento en la estructura en su período de vida útil.

Palabras clave: concreto, termodinámica, corrosión, sulfato de sodio, acero, microsilice, acero, microsilice.



Colaboración

Viveros Soto Irving Edgardo, González Moreno Humberto Raymundo, Sandoval Herazo Luis Carlos; De la Cruz de la Cruz Janeth; González Sedano Ignacio, Instituto Tecnológico Misantla, Sandoval Herazo Luis Carlos, Colegio de Veracruz

ABSTRACT: In the present investigation evaluates the electrochemical behavior of reinforced concrete specimens, which will be exhibited in water with NaSO_4 , so gradually speeds and corrosion potential is determined.

Concrete beams, in which steel bars (AISI 1018) were placed and galvanized steel were prepared, said beams processes will be studied by electrochemical corrosion techniques. The mix design was developed with ACI 211.1 method. Before aggregate tests were conducted for the characteristics according to their rules ONNCCE (NMX-111-ONNCCE-2014). The curing process of the specimens according to their study established the rules ONNCCE (NMX-C-159-ONNCCE-2004). 2 mixtures made of concrete with a design $f'c$: 300 kg/cm^2 using a type of cement CPC 30R, after the curing step were placed in a container with water contaminated with 3% and 5% to NaSO_4 be evaluated.

Using an artificial pozzolan (microsilica), was used in order to contribute to concrete strength and durability to different periods, considering 10 months of study. So the amount of cement is reduced in the work and reducing maintenance in the structure is achieved in its useful life.

Keywords: concrete, thermodynamics, corrosion, Sodium Sulfate, steel, microsilica.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad y desde hace tiempo, el material de construcción más utilizado es el concreto, que junto con las varillas de acero, forman el sistema conocido como concreto reforzado. Las estructuras de este sistema, son definidas como estructuras muy duraderas y que requieren de muy poco mantenimiento. Sin embargo, uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad estructural de obras civiles como: puentes, túneles, carreteras, muelles, etc., de un país, es la corrosión del acero de refuerzo [1] [2].

Los costos económicos a causa del mantenimiento prematuro en estructuras de concreto reforzado debido a la corrosión del acero de refuerzo son cuantiosos para la economía de los países tanto industrializados como emergentes, costos que llegan a ser de miles de millones de dólares en reparaciones de puentes de concreto reforzado en E.E. U.U. sin contar el deterioro de otro tipo de infraestructura civil como son los muelles, los edificios, hospitales, nucleoelectricas, presas entre otras estructuras [3-6].

Con el incremento de la construcción y el propósito de suministrar estructuras más resistentes reduciendo la corrosión en las edificaciones, es de suma necesidad conocer la evaluación del acero desde el enfoque de corrosión, es un aspecto de vital importancia para determinar la vida útil de los aceros en la construcción.

La gran problemática es el aceleramiento de la corrosión en el concreto armado que es el más usado en la construcción, provocando severos daños en la estructura.

En los últimos años, numerosas estructuras de hormigón armado en todo el mundo han sufrido un rápido deterioro. Por lo tanto, la durabilidad de las estructuras de hormigón, especialmente los expuestos a ambientes agresivos, es motivo de gran preocupación [7].

Por ello la implementación de nuevas tecnologías en el ámbito de la construcción en las estructuras de concreto armado ayudan a poder reducir el gran problema de la corrosión, como es el caso de las puzolanas con la implementación de humo de sílice en las estructuras de concreto reforzado ofreciendo una vida útil mayor a la que se tiene sin la implementación de esta puzolana.

La utilización de humo de sílice como reemplazo del cemento se reduce la permeabilidad del concreto y la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo, particularmente en presencia de cloruros (Khan y Siddique, 2011) [8].

Para alcanzar altas resistencias a compresión y bajos coeficientes de difusión de cloruros se sugiere el uso de porcentajes entre 5% y 10% de la masa del cemento [9-10].

Por lo tanto mediante el potencial de corrosión que contiene el metal se puede relacionar la cantidad de cloruros, y a su vez determinar un proceso electroquímico [11].

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero además del contacto con metales menos activos así como

también de las heterogeneidades en el medio químico o físico que rodea a la estructura[11]. La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es una de las principales causas a las que se debe la reducción de la vida de servicio de las estructuras[12-13] además de que genera incertidumbre en la población que usa dichas estructuras, como pueden ser puentes, carreteras o edificaciones. Sin embargo el costo de mantenimiento de una estructura de concreto reforzado se elevaría por la pérdida de resistencia y estabilidad dentro de la estructura como consecuencia poniendo en riesgo la seguridad de las personas dentro de la edificación.

La evaluación de la corrosión es una de las medidas para poder conocer el daño del acero en el concreto armado de la edificación, así como para prever la corrosión dentro de las estructuras. Los factores que la corrosión son la dosificación; la compactación y la homogeneidad del concreto: el espesor del recubrimiento de concreto; el estado superficial de la varilla y humedad ambiental. Es por ello que el concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, para garantizar la protección de la varilla de refuerzo contra las acciones agresivas de los agentes externos [14].

Hoy en día la influencia de la sustentabilidad es de suma importancia, y con ello el incremento de puzolanas artificiales o naturales, incrementan la seguridad y confianza de la sociedad en el mundo. Además se ha demostrado que estos materiales puzolánicos también benefician al concreto para aumentar sus propiedades como protección contra la corrosión en el acero de refuerzo [15].

El concreto sustentable en la actualidad es de suma importancia debido a que las grandes construcciones desde edificios, puentes y demás obras civiles se realizan con este material, por lo tanto en este proyecto se hace mención mediante una puzolana artificial la cual es el humo de sílice (Microsilice).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los principales parámetros a considerar para la realización de la presente investigación son:

Mezcla de concreto con $f'c=300\text{kg/cm}^2$

Cemento portland 30 R y la adición de humo de sílice al 20% al cemento

Acero 1018 y acero galvanizado con un diámetro 3/8"

2 medios de exposición (agua convencional y 5% de NaSO_4)

Monitoreo de potenciales e interpretación de acuerdo a Norma ASMT C876-09 [16].

MATERIALES Y METODOS

Para la presente investigación se elaboraron 12 especímenes de concreto reforzado, utilizando en la ela-

boración de la mezclas el CPC 30R, ambas mezclas fueron diseñadas por el método ACI 211.1 para poder obtener una resistencia a la compresión a los 28 días de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, como material de refuerzo se utilizaron 2 tipos de aceros, acero al carbono AISI 1018 y un acero galvanizado los cuales se colocaron en el concreto.

La investigación tiene como finalidad analizar los términos de evaluación de varillas de acero 3/8" AISI 1018 y galvanizada. Con respecto a esto se realizaron especímenes con un $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ y expuestos en un ambiente corrosivo de NaSO_4 en sol. 5%.

La matriz de experimentación se realizó mediante las variables que presentaron los materiales en su caracterización como puede ser: $f'c$ del concreto, mezclas del control y la adicción de humo de sílice al CPO 30R.

A continuación se mencionan las variables en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Matriz Experimental

Concreto $f'c$	Cemento	Acero	Medios de exposición	Nº Esp.
300kg/cm ²	CPC 30R CPC 30R (80%) Y Humo de Sílice de (20%)	AISI 1018 (3/8) Galvanizado (3/8)	Agua	
300kg/cm ²	CPC 30R CPC 30R (80%) Y Humo de Sílice de (20%)	AISI 1018 (3/8) Galvanizada (3/8)	Sol. Al 3% de NaSO_4	
			Sol. Al 5% de NaSO_4	
1	2	2	3	12

Caracterización de materiales

Los materiales seleccionados fueron caracterizados, para poder obtener las propiedades de cada una de los agregados con base a la normativa ONNCCE (NMX-C-077-1997-ONNCCE).

Para su realización de la dosificación por el método del ACI 211.1, así poder determinar las cantidades de material para elaborar una viga de control y una mezcla de Microsilice en sustitución al cemento de 20%; la siguiente tabla muestra las cantidades establecidas:

Tabla 2.2 Dosificación de la mezcla de concreto por m³.

Contenido(kg/m ³)	$F'c = 300\text{kg/m}^3$
Cemento	355
Agua	185
Agregado Grueso	936
Agregado Fino	994

Las varillas de acero normal y galvanizado fueron limpiadas y tratadas para retirar cualquier impureza que en ellas estuviese presente, posteriormente se delimito el área con la que se evaluaría y al resto de la varilla se le coloco un thermofit de 1/2" de diámetro, con 4 cm de largo para poder aislar y saber cómo fue el avance de la corrosión en la varilla.

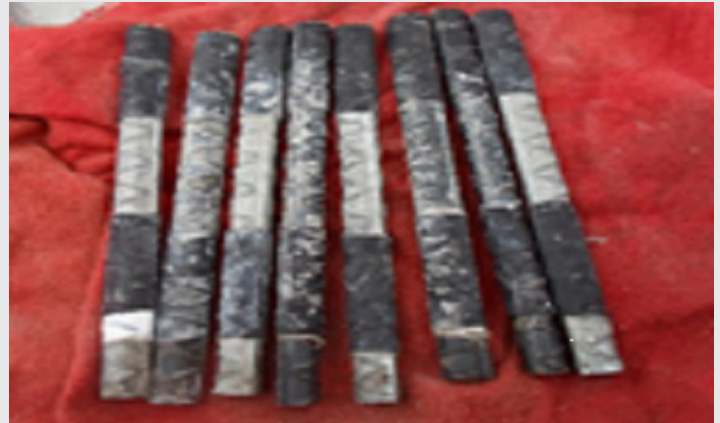


Figura 2.1. Tratamiento de Varillas con Thermofit.

La realización del proyecto por dos tipos de varillas se consideró de acuerdo a la serie galvánica típica, donde el proceso de corrosión es basada en la pureza de cada acero. No obstante, las varillas AISI 1018 y galvanizada estarán sometidas a las mismas acciones, tratamiento e incluidas en las vigas que se someterán en los medios anteriormente descritos.

Tabla 2.3 Serie Galvánica típica. [9]

Noble	Acero inoxidable 18/8	Pasivo
	Cu	“
	Bronce	“
	Aluminio	“
	Ni	Activo
	Latón	“
	Naval	“
	Sn	“
	Acero inoxidable 18/8	“
	Hierro colado	“
	Hierro forjado	“
	Acero al Carbono	“
	Al	“
	Zn	“
Base	Mg	“

Características y Especificaciones de los especímenes de estudio

Utilizando vigas de metal con un largo de 50 cm y un ancho 15 cm, se introdujeron a ellas un separador en la mitad, el cual fue elaborado de por material de Triplay.

Con el cual se fabricaron 8 tablas de 7 cm de ancho por 12 cm de largo para poder introducir las varillas en el molde y esta funcionaron como separador en cada espécimen.

Cabe destacar que las vigas de experimentación no se encuentran sumergidas al 100%, ya que el acero de refuerzo en la parte superior no tiene contacto con el agua.

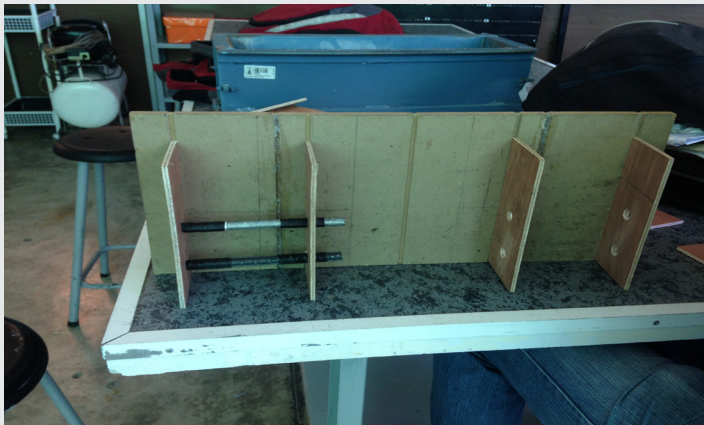


Figura 2.2. Preparación de material utilizado en la fabricación de vigas.

Se diseñaron vigas con las siguientes dimensiones: 7cm de ancho * 14cm de largo y 12cm de altura, con 2 agujeros a una equidistantes de 4cm para la colocación de las varillas de 3/8" (AISI 1018) y galvanizada.



Figura 2.3. Elaboración de vigas de concreto reforzado.

Los concretos reforzados con acero AISI 1018 y otra de Galvanizado. Las vigas se colocaron en los medios descritos en la tabla 2.1

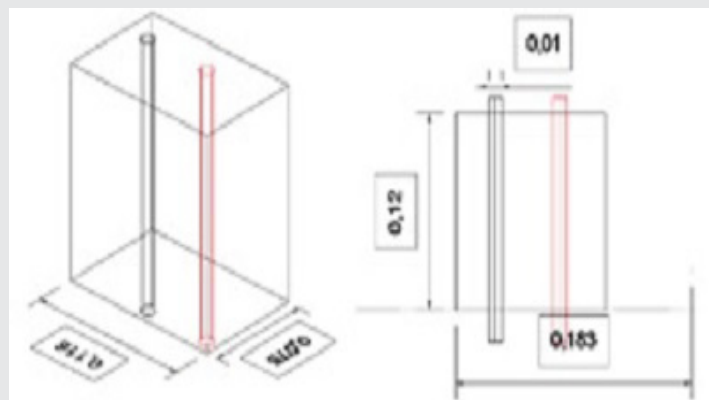


Figura 2.3. Isométrico de dimensiones de vigas.

Después de la preparación del material se procedió a la elaboración de las mezclas de concreto, la mezclas se elaboraron en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, se realizaron las respectivas pruebas establecidas en la Normativa ONNCCE (NMX-C-159-ONNCCE-2004) para la elaboración de especímenes de concreto, además se elaboró la prueba de temperatura obteniendo 26°C, además de un revenimiento de 2.5 cm., que cumple con la elaboración de la mezcla.



Figura 2.3.1. Descimbrado y colocación de curado de los especímenes de concreto.

Técnicas electroquímicas de corrosión

Se realizaran las pruebas técnicas de corrosión para poder medir parámetros de corrosión en el acero de refuerzo.

Las vigas realizadas se descimbraron a las 24 horas después de su fabricación para poder colocarlas en curado en donde se sumergieron durante 28 horas de acuerdo a su normativa (NMX-C-403-ONNCCE-1999) la cual recomienda colocar en curado de forma inmediata después de su descimbrado.



Figura 2.4. Vigas de concreto en experimentación y curado.

Potencial de corrosión (E_{corr})

Es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito cerrado.

La importancia de los potenciales de corrosión es notable, ya se puede predecir la vida útil de la estructura. Para el procesamiento de dicha técnica de corrosión antes de ser colocados los conductores eléctricos se deberán limpiar con una lija la zona invadida por el Oxido Ferroso, para evitar alteraciones en la medición.



Figura 2.5. Medición de potenciales de corrosión.

Tabla 2.4 Criterios de evaluación

Potencial de corrosión (mV)	Probabilidad de corrosión
E _{corr} > -200mV	10% de probabilidad de corrosión
200 mV > E _{corr} > -350	Incertidumbre
E _{corr} > -350 mV	90% de probabilidad de corrosión

Velocidad de corrosión (I_{corr})

Una vez implementada la técnica de potenciales (E_{corr}), se procede a relacionar la probabilidad de corrosion en las distintas vigas de experimentación, así como los dos tipos de varillas de forma mensual.

Se llama velocidad o intensidad de corrosión (I_{corr}) a la perdida de metal por unidad de superficie y tiempo.

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

En base a las técnicas de corrosión propuestas en esta presente investigación, se puede proponer una vida útil de la estructura de acuerdo a un medio de

agua (H₂O) y un medio agresivo NaSO₄ al 5%. Para evaluar la densidad de corrosión en las mezclas de control y Microsilice al 20% se tomara en cuenta el criterio que propone el manual de inspección y rehabilitación de estructura de hormigón, donde se utilizan cuatro rangos de Evaluación.

Tabla 2.5 Criterios de evaluación de I_{corr} (Red durar, 1997)

I _{corr} (μA/cm ²)	Nivel de corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
>1	Muy elevada

Las pruebas de velocidad de corrosión se realizarán mediante el aparato Potenciostato/galvanostato, conectado a una computadora con el software de procesamiento.



Figura 2.6. Potenciostato/Galvanostato y computadora de procesamiento de datos.

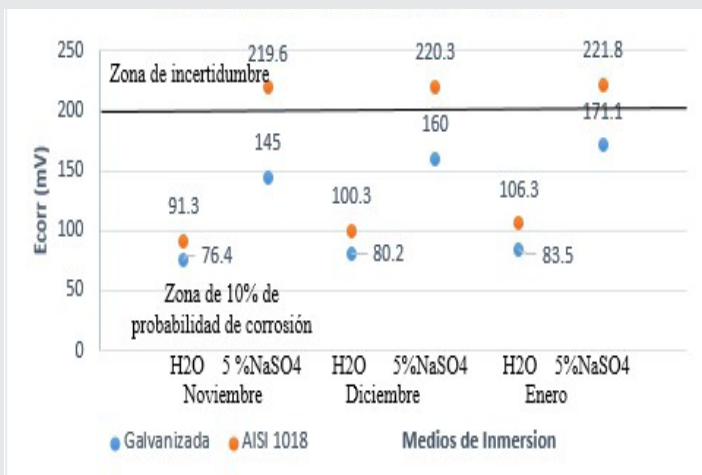
Para determinar de forma gráfica la existencia de la corrosión en las vigas que se sumergirán en distintos medios, se realizara gráficas de potencial y velocidad de corrosión, así como frecuencia acumulada.

Resultados y conclusión

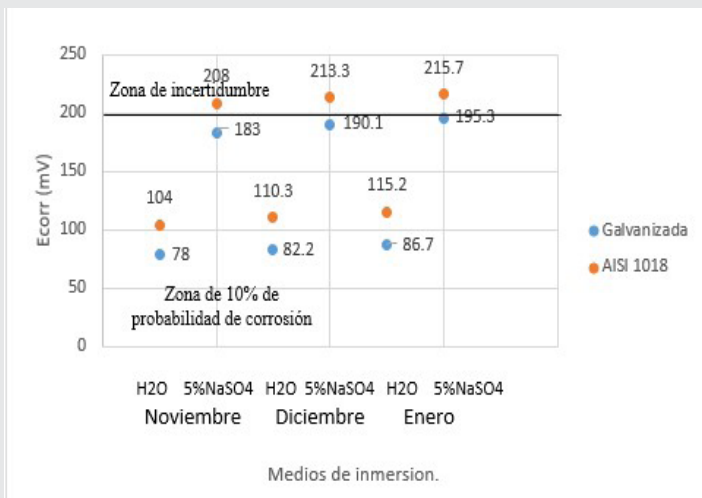
Los especímenes fabricados con materiales convencionales y modificados con un 20% de humo de silice se encuentran desarrollando su día N° 22 de la etapa de curado, hasta el momento se observa una capa de óxido ferroso en las barras AISI 1018 Y galvanizadas que cambian cuando a través de ellas penetran sustancias agresivas que destruye la capa pasivante del acero

El estudio de los resultados se obtuvieron mediante graficas de potencial de corrosión (E_{corr}) y velocidad de corrosión (I_{corr}) de forma mensual, en una duración aproximada a 300 días de inmersión.

Los resultados posteriores determinaran y condicionaran estructuras de concretos que se sitúen en medios de NaSO₄, así como el daño que se ocasione en el acero de refuerzo y concreto.



Gráfica N.1.- Potencial de Corrosión Ecorr - Control (Noviembre - Enero).



Gráfica N. 2.- Potencial de Corrosión Ecorr - Microsilíce (Noviembre - Enero)

A su vez se obtuvieron resultados de potenciales de corrosión de acuerdo a las técnicas antes mencionados, donde generaron los siguientes resultados:

La presente investigación se encuentra en el tercer mes de estar curado en el medio Sulfatado.

Se tendrán resultados cada mes para determinar gráficas de Potencial de corrosión (Ecorr), Velocidad de corrosión (Icorr) y carbonatación, evaluando así la pasivación por la puzolana artificial que sustituye al cemento.

BIBLIOGRAFÍA:

[1] M.A. Baltazar-Zamora y et al. "Evaluation of the Corrosion at Early Age in Reinforced Concrete Exposed to Sulfates", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol.7, Pág. 588-600, Rep. de Serbia, 2011.

[2] M.A. Baltazar-Zamora y et al. "Corrosion Behavior of Steel Embedded in Ternary Concrete

Mixtures" *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 6, Pág.1892-1905, Rep. de Serbia, 2011.

[3] M. Maslehuddin y et al. "Effect of chloride concentration in soil on reinforcement corrosion" *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Pag. 1825-1832. (2007) .

[4] Dimitri V. Val y et al. "Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments" *Structural Safety*, Vol. 25, Pag. 343-362. (2003).

[5] M.A. Baltazar-Zamora y et al. "Efficiency of Galvanized Steel Embedded in Concrete Previously Contaminated with 2, 3 and 4% of NaCl", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol.7, Pág. 2997-3007, (2012).

[6] C.P. Barrios Durstewitz y et al. "Cement Based Anode in the Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol.7, Pág. 3178-3190, (2012).

[7] Ji Y, Zhao W, Zhou M, Ma H, Zeng P. Corrosion current distribution of macrocell and microcell of steel bar in concrete exposed to chloride environments. *Construction and Building Materials*. 2013;47:104-10.

[8] Siddique, R. (2011), Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, Resources, Conservation and Recycling, 55(11), 923-932. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>

[9] Zhang, W-M., Ba, H-J. (2013) Effect of silica fume addition and repeated loading on chloride diffusion coefficient of concrete, *Materials and Structures*, 46(7), 1183-1191. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9963-6>.

[10] Farahani, A., Taghaddos, H., Shekarchi, M. (2015) Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment, *Cement and Concrete Composites*, 59, 10-17. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.03.006.

[11] Adamec1 K., Palmer. N., Polebitski A. et al. Climate Change Evaluation of Climate Change Impacts to Reservoir Operations within the Connecticut River Basin [C]. *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*: 92-100.

[12] Wilbanks, T.J., Fernandez, S., 2003. *Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and*

Vulnerabilities e Technical Report for the U.S. Department of Energy in Support of the National Climate Assessment.

[13] Wilbanks, T.J., Fernandez, S., 2003. *Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities e Technical Report for the U.S. Department of Energy in Support of the National Climate Assessment.*

[14] Horvath A, Matthews HS. *Advancing sustainable development of infrastructure systems. J Inf Syst* 2004; 10(3):77-8.

[15] 7. *Trends and developments in green cement and concrete technology* Mohammed S. Imbabi ☒, Collette Carrigan, Sean McKenna School of Engineering, King's College, The University of Aberdeen, AB24 3UE Scotland, February 2013.

[16] *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete*, ASTM C 876-09, ASTM Volume 03.02, (2009).