

# EFECTO DE LA ESCORIA DE NÍQUEL COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO EN LA DURABILIDAD DE MORTEROS EXPUESTOS A AMBIENTES MARINOS

Yolanda Hernández, Oladis de Rincón, William Campos, Mariana Montiel, Liliana Linares  
yhdezlopez@yahoo.com, yolandahernandez@fing.luz.edu.ve

## RESUMEN

La escoria del níquel evaluada en este trabajo es un desecho industrial de la minera Lomas de Níquel que se produce durante la explotación y el procesamiento del mismo. Es un contaminante tanto para el medio ambiente, como para las personas que viven en las cercanías de la minera. La fabricación de concreto armado con sustitución parcial de cemento por escoria, disminuiría tanto el desecho industrial del medio, como el contenido de cemento en las mezclas, disminuyendo costos, siempre que se obtengan mezclas con propiedades físicas, mecánicas y electroquímicas durables.

El objetivo de este estudio es elaborar morteros, sustituyendo parte del cemento de su diseño de mezcla por distintos contenidos de escoria de níquel (20, 30 y 40 %p/p) con el fin de determinar sus propiedades durables y con estos resultados poder realizar concreto armado para ser utilizado en la construcción y/o reparación de estructuras expuestas a ambientes agresivos con cloruros.

Para el estudio se realizaron morteros con diferentes relaciones agua/cemento (0,4 y 0,6) y se evaluaron por medio de diferentes ensayos: físicos (absorción capilar y porosidad efectiva), mecánicos (resistencia a la compresión) y electroquímicos (medidas de potencial y velocidad de corrosión en el tiempo).

Los resultados obtenidos hasta el momento, forman parte de un proyecto de investigación que está actualmente en ejecución, indican que las mezclas de mortero con relación a/c de 0,4 y sustitución de cemento por escoria de níquel de 20 %p/p, producen propiedades durables favorables.

**PALABRAS CLAVES:** *Escoria de níquel, morteros con sustitución parcial de cemento, durabilidad de mezclas de morteros, concreto armado.*

Recibido: Julio 2013 - Aceptado: Octubre 2013

# EFFECT OF NICKEL SLAG AS PARTIAL SUBSTITUTE FOR CEMENT ON THE DURABILITY OF MORTARS EXPOSED TO MARINE ENVIRONMENTS

Yolanda Hernández, Oladis de Rincón, William Campos, Mariana Montiel, Liliana Linares  
yhdezlopez@yahoo.com, yolandahernandez@fing.luz.edu.ve

## ABSTRACT

Nickel slag under evaluation in the present study is an industrial waste, produced during mining and processing nickel ore at Lomas de Nickel mining company site. The slag and its accumulation is a hazard, not only for the environment, but for the population in the nearby. The manufacture of reinforced concrete with partial replacement of cement with nickel slag could be advantageous; decreasing both, industrial waste going into the environment and cement content in the new concrete mix designs; this can be cost effective as long as the new mix designs prove to meet durability standards en terms of physical, mechanical and electrochemical properties.

The objective of this study is to design mortar admixtures, partially replacing cement with different amount of nickel slag (20, 30 and 40 wt. %), and the study their properties towards durability, in order to determine, for future work, better concrete mix designs, for their use in construction and/or repair of structures exposed to aggressive environments with chlorides.

For the present study, mortars with different water-cement ratio (i.e. W/C 0.4 and 0.6) were designed and evaluated throughout different test: physical (i.e. capillary absorption and effective porosity), mechanical (i.e. compressive strength at 28 days) and electrochemical (open circuit potential OCP and corrosion rate).

The results obtained so far (which are part of an ongoing research project) indicate, that mortar design with W/C ratio of 0.4 and 20 wt. % nickel slag replacement of cement, show properties favorable to durability.

**KEYWORDS:** *Nickel slag, cement replacement in mortars, mortar admixture durability, reinforced concrete*

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de los países experimentan anualmente tasas aceleradas de crecimiento poblacional, lo cual implica mayor demanda en la industria de la construcción, haciendo que se usen de forma desmedida los recursos naturales para el desarrollo de la infraestructura. El desarrollo sustentable de la construcción implica el uso de materiales de construcción no convencionales e innovadores, y los materiales reciclados y de desecho se emplean para compensar la falta de los recursos naturales y así encontrar alternativas para la conservación del medio ambiente. Entre los materiales de construcción, tanto de obras civiles como industriales, el concreto armado tiene gran importancia y uso, lo que lleva a que exista una gran demanda de todos aquellos componentes que lo conforman como tal. Entre ellos, el cemento es el componente que abarca mayores costos al momento de su producción, esto sin tomar en cuenta los daños ambientales que se generan por emisión de CO<sub>2</sub> en el proceso de su producción<sup>(1)</sup>.

En Venezuela, se genera gran cantidad de desechos de procesos de diferentes industrias, los cuales, con su respectivo estudio y evaluación, podrían llegar a utilizarse como materiales de construcción, considerándose entre las opciones, la sustitución parcial de aquellos materiales con mayor impacto económico y ambiental en el concreto armado, como lo es el cemento. Los desechos o escorias industriales han sido empleados como sustitutos del cemento o del agregado fino en la industria de la construcción<sup>(2)</sup>. Entre las más comunes están: la escoria de alto horno, escorias de producción de cobre, de cinc, entre otros. La escoria de níquel, es un residuo proveniente del proceso de producción del níquel, ferroníquel y otros metales de aleación siderúrgica, que son usados en la elaboración de aceros inoxidable<sup>(3)</sup>. Esta escoria se acumula como grandes cantidades de desechos en montañas cercanas a poblaciones venezolanas, trayendo consecuencias negativas entre sus habitantes y la contaminación del medio ambiente. La misma está compuesta principalmente por óxidos de Si y Mg,

con lo cual se esperaría que actuaran de forma similar a los materiales puzolánicos, los cuales presentan una composición rica en SiO<sub>2</sub> y se han utilizado como reemplazo parcial del cemento Pórtland. Dichos materiales son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento, principalmente Ca(OH)<sub>2</sub>, lo cual permite que el concreto mejore sus propiedades a edades superiores a los 28 días.

Por lo tanto en este trabajo, que es la primera fase de un proyecto de investigación, se evaluarán mezclas de mortero con diferentes porcentajes de escoria como sustituto del cemento, con dos relaciones a/c (0,4 y 0,6), con el fin de estudiar mezclas más durables desde el punto de vista físico, mecánico y electroquímica.

## PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo metodológico de esta investigación se dividió en varias fases:

### Caracterización de la Escoria de Níquel

Se realizaron ensayos de Dispersión de Energía por Rayos X (EDS) y Difracción de Rayos X (DRX) a dos diferentes muestras de escoria; una granulada tal como se obtiene del procesamiento del níquel, y otra molida mediante el uso de molinos industriales.

### Elaboración de las probetas de mortero

Se fabricaron probetas de mortero patrón con dos relaciones agua/cemento (0,4 y 0,6) y resistencia a la compresión de diseño igual a 420 y 250 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, siguiendo la Norma ACI 211.1<sup>(4)</sup>. Se utilizó la escoria de níquel como sustituto del cemento Pórtland en diferentes porcentajes: 20, 30 y 40% p/p en base al peso del cemento.

Para las diferentes pruebas a realizar, se elaboraron distintos tipos de probetas: 120 probetas cúbicas (5 x 5 x 5 cm) para la evaluación mecánica, 48 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro x 5 cm de altura para la evaluación física y 24 probetas prismáticas de 20 cm de longitud x 10 cm de ancho x 5 cm de

espesor, con una barra de acero como electrodo de trabajo y una barra de grafito como contraelectrodo para la evaluación electroquímica. Para obtener resultados representativos y confiables en las mediciones, los ensayos se realizaron por triplicado.

#### **Evaluación de la Mezcla Fresca**

Se evaluó el porcentaje de expansión del diámetro del mortero fresco, según la Norma ASTM C 230<sup>(5)</sup>. Este ensayo fue realizado para cada una de las mezclas, antes y después de realizar el vaciado del mortero en los moldes, para la elaboración de las probetas.

#### **Evaluación Mecánica**

Se elaboraron 120 probetas cúbicas, con dimensiones de 5 x 5 x 5 cm, para realizar el ensayo de resistencia a la compresión, según la Norma ASTM C 109<sup>(6)</sup>. Las probetas fueron ensayadas a las edades de 3, 7, 28 y 90 días de curado.

#### **Evaluación Física**

Se elaboraron 24 probetas cilíndricas, con una dimensión de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor. Se evaluó la absorción capilar y porosidad efectiva según la Norma Sueca de Fagerlund<sup>(7)</sup>.

#### **Evaluación Electroquímica**

Se realizaron 24 probetas prismáticas de 20 cm de longitud x 10 cm de ancho x 5 cm de espesor, con dos electrodos de trabajo (barras de acero) y un electrodo auxiliar (barra de grafito). Estas probetas fueron expuestas a un ambiente simulando condiciones agresivas de un medio marino, siguiendo la Norma ISO 11474<sup>(8)</sup> modificada, rociadas diariamente con solución al 3,5 %p/p de cloruro de sodio, para obtener resultados a corto plazo.

Se evaluaron electroquímicamente por medio de medidas de potencial de corrosión vs. electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado, para determinar la potencialidad corrosiva de la armadura, según la norma ASTM C 876<sup>(9)</sup>. Y por medio de medidas de velocidad de corrosión utilizando un equipo potencios-

tato/galvanostato GAMRY, para determinar la probabilidad de corrosión de las barras de refuerzo, aplicando pruebas de resistencia a la polarización.

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **Caracterización de la Escoria de Níquel**

En el EDS los elementos encontrados en mayor proporción fueron el oxígeno, magnesio, hierro y silicio. El DRX dio como resultado, compuestos de silicato de magnesio, silicato de hierro, dióxido de silicio, óxido de cobre y óxido de hierro. La presencia de dióxido de silicio podría indicar que la escoria de níquel podría comportarse como material puzolánico, que al interactuar con los productos de hidratación del cemento, podría mejorar sus propiedades mecánicas a largo plazo.

#### **Evaluación de la Mezcla Fresca**

Por medio de este ensayo se observó que a medida que aumenta el porcentaje de escoria como sustituto parcial del cemento, la trabajabilidad inicial y final son similares, indicando que la escoria no está actuando como material cementante, lo cual se esperaba dado ya que no se observó la presencia de calcio en su composición química.

#### **Evaluación Mecánica: Resistencia a la Compresión**

Los valores de resistencia a la compresión medidos, siguiendo la Norma ASTM C 109<sup>(6)</sup>, a los 28 días de curado de las probetas de 0, 20 y 30% de sustitución de cemento por escoria con relaciones a/c 0,4 y 0,6; fueron mayores que el estipulado en el diseño de mezcla inicial ( $\leq 420$  y  $250$  kg/cm<sup>2</sup> respectivamente). Por el contrario, las mezclas con sustitución de cemento del 40%, indistintamente de la relación a/c utilizada, no alcanzaron la resistencia de diseño a los 28 días. A los 90 días de realizadas las probetas, alcanzaron un valor aproximadamente igual al de diseño.

### Evaluación Física: Absorción Capilar y Porosidad Efectiva

Las mezclas con relación a/c igual a 0,4 y con sustitución de cemento por escoria (20, 30 y 40 % p/p), presentaron valores de porosidad efectiva de 10,3, 10,8 y 12,4% respectivamente, indicando esto propiedades de morteros de moderada calidad, comparadas con su patrón, el cual presentó porosidad efectiva de 8,2%, representando un mortero de buena calidad y compacidad.

En cuanto a la mezcla de relación a/c igual a 0,6, se observó que para porcentaje de sustitución de cemento por escoria de 30 y 40%, los morteros presentaron porosidades efectivas promedio de 17,1% y 17,7% respectivamente, lo cual demuestra que son de durabilidad inadecuada, mientras que para el porcentaje de escoria de 20% se observó un valor promedio de 14,8% indicando morteros de moderada calidad, comparados con su patrón que presentó un valor promedio de 11,3%, siendo también de moderada calidad.

En cuanto a los valores de absorción capilar se observó que los morteros con relaciones a/c igual a 0,4 y 20% de escoria se midieron valores de  $4,8 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ , indicando que pueden ser usados en ambientes severos. Mientras que los morteros con 30 y 40% de escoria mostraron valores de  $6,8$  y  $6,9 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$  respectivamente, e indican morteros que pueden ser usados en ambientes menos severos, según el criterio de evaluación de Fagerlund<sup>(6)</sup>.

Por otro lado, morteros con relaciones a/c 0,6 y sustitución de cemento por escoria de 20, 30 y 40% presentaron valores de  $1,1$ ,  $1,2$  y  $1,4 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ , respectivamente, que pueden ser usados en ambientes menos severos, cumpliendo con el criterio de espesor de recubrimiento de 30 mm. A probeta patrón presentó valores promedios de  $9 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ .

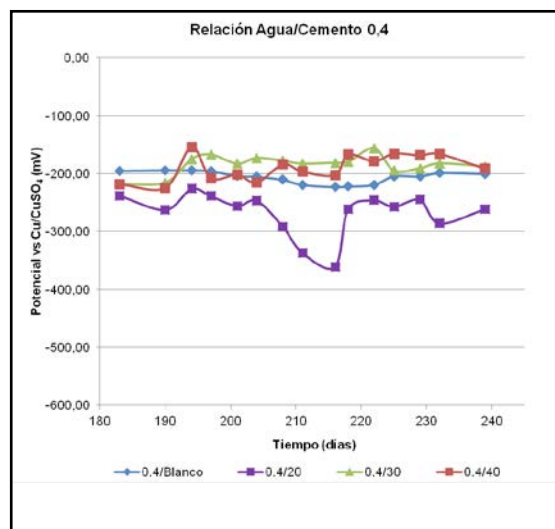
Dependiendo del medio de exposición final, morteros de relación a/c 0,4 y 20% de escoria, servirán para desempeñarse en ambientes severos, mien-

tras que el resto de las mezclas evaluadas pueden desempeñarse en ambientes menos severos.

### Evaluación Electroquímica

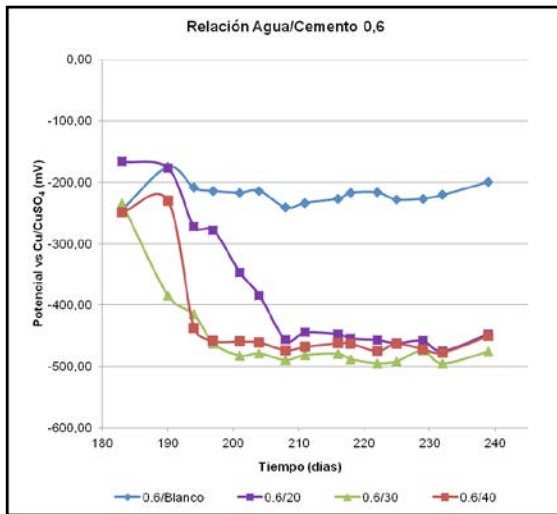
**Potencial de Corrosión:** En las probetas con relación a/c de 0,4 el acero permanece con baja potencialidad corrosiva durante el tiempo de evaluación evaluado, a excepción de la probeta con 20% de escoria, como se observa en la Figura 1, ya que sus potenciales varían en valores más negativos a -200 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, a los 137 días de rociado salino<sup>(8,9)</sup>.

Figura 1. Variación del potencial durante el tiempo de exposición de las probetas de relación a/c 0,4



Por otra parte, en las probetas con relación a/c de 0,6 y sin sustitución de cemento, el acero permaneció con baja potencialidad corrosiva, como se observa en la Figura 2, ya que sus potenciales permanecen estables, alrededor de los -200 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>, a los 137 días de rociado salino<sup>(8,9)</sup>, indicando resistencia a la penetración de iones cloruros durante el período de tiempo evaluado. Sin embargo, las mezclas con sustitución de cemento por escoria aumentaron su potencialidad corrosiva durante este período de tiempo, presentando valores más negativos a los -400 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> a los 195 días de fabricación.

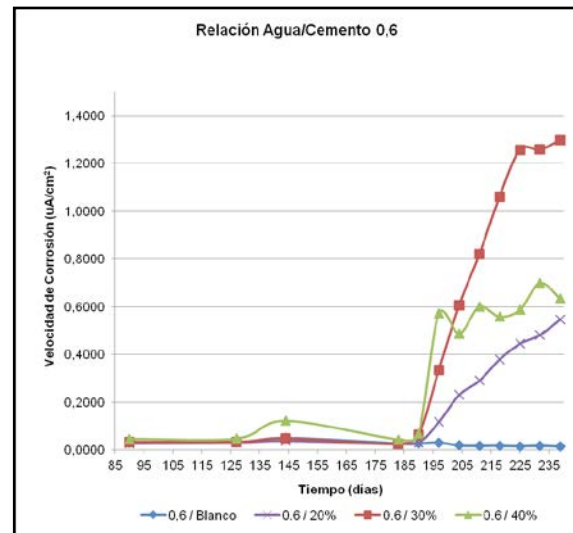
**Figura 2.** Variación del potencial durante el tiempo de exposición de las probetas de relación a/c 0,6



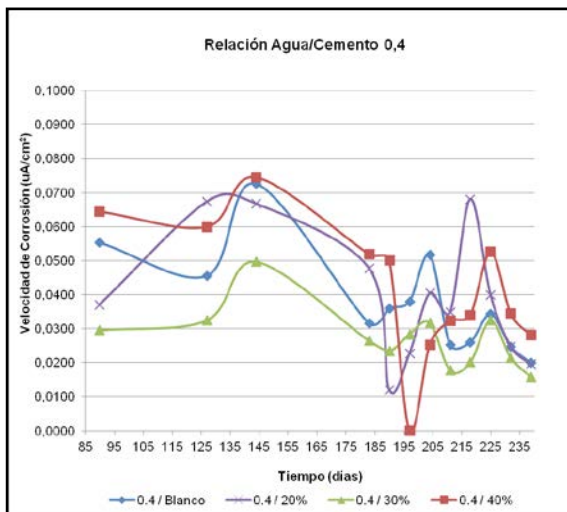
En la Figura 4, se observa como la variación de la velocidad de corrosión en el período de evaluación para todas las mezclas de relación a/c de 0,6 es constante hasta aproximadamente los 190 días de fabricadas, manteniéndose hasta esta fecha valores inferiores a  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , considerándose baja corrosión del acero. Sin embargo, a partir de esta fecha los valores de velocidad de corrosión para las mezclas con sustitución de cemento por escoria de 20, 30 y 40% p/p, empezaron a aumentar hasta llegar a valores de velocidad de corrosión moderado, alcanzando valores promedio entre  $0,1$  y  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Posteriormente, las mezclas de 30 y 40% p/p de escoria alcanzaron niveles de corrosión elevadas (mayores a  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Estos resultados coinciden con la evaluación del potencial de corrosión<sup>(9)</sup> (Figura 2).

**Velocidad de Corrosión:** En la Figura 3 se observa que la variación de la velocidad de corrosión en el período de evaluación para las mezclas de relación a/c de 0,4 se mantiene en ordenes inferiores a  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ <sup>(9)</sup>, indicando que durante el tiempo de evaluación el acero se mantuvo pasivo en esa mezcla. Estos resultados coinciden con la evaluación de potencial de corrosión (Figura 1).

**Figura 4.** Variación de la velocidad de corrosión con respecto al tiempo, para probetas con relación a/c igual a 0,6



**Figura 3.** Variación de la velocidad de corrosión con respecto al tiempo, para probetas con relación a/c igual a 0,4



## CONCLUSIONES

- 1) La escoria de níquel molida como sustituto parcial del cemento no aporta propiedades cementantes a la mezcla debido a la poca cantidad de calcio en su composición.
- 2) Aun cuando la resistencia a la compresión alcanzada para los diferentes porcentajes de escoria como sustituto del cemento, luego de 90 días de fabricadas, presentaron resistencias mayores que las de diseño, estas son inferiores a las de su respectivo patrón.
- 3) Las propiedades físicas de las mezclas con relación a/c igual a 0,4 mostraron que el 20% p/p de sustitución de cemento por escoria mantienen una buena calidad del mortero.
- 4) Las propiedades físicas de las mezclas con relación a/c igual a 0,6 mostraron que no son aptas para usar en morteros expuestos a ambientes marinos.

- 5) Los parámetros electroquímicos evaluados (Ecorr, icorr) en un período de 135 días de exposición y en un medio con alto contenido de cloruros, en las mezclas con relación a/c igual a 0,4, mostraron pasivación de la armadura.
- 6) Los parámetros electroquímicos evaluados (Ecorr, icorr) en un período de 135 días de exposición y en un medio con alto contenido de cloruros, en las mezclas con relación a/c igual a 0,6 y sustitución de cemento por escoria, mostraron activación de la armadura, mientras que la armadura en las probetas patrón permanecieron pasivas.
- 7) Desde el punto de vista de durabilidad, tomando en cuenta las propiedades físicas, mecánicas y electroquímicas, se puede sustituir el 20% p/p de escoria de níquel en relaciones a/c igual a 0,4; reduciendo de esta forma parte del desecho industrial existente en la zona y disminuyendo los costos por m<sup>3</sup> de mortero fabricado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) K. Metha, K. (2009). Society, Sustainability, and the Concrete Industry. Conferencia Plenaria presentada en el X Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción / XII Congreso de Control de Calidad en la Construcción.
- 2) Escalante, J. (2002). Materiales alternativos al cemento Portland. Unidad Saltillo del Cinvestav.
- 3) Minera Lomas de Níquel. (2012) [On-Line]. Disponible en: <http://www.mineralomadeniquel.com.ve/empresa/extraccion-refinacion-niquel-ferroniquel.html>.
- 4) Norma ACI 211.1 (2009). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete.
- 5) Norma ASTM C 230 (2008). Standard specification for flow table for use in test of hydraulic cement.
- 6) Norma ASTM C 109 (1990). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mor-

- tars (using 2-in or 50 mm cube specimens).
- 7) Fagerlund, G. (1986). On the capilarity of concrete. Nordic Concrete Research. No 1, Olso paper No. 6.
- 8) Norma ISO 11474 (1998). Corrosion of metals and alloys. Corrosion tests in artificial atmosphere. Accelerated outdoor test by intermittent spraying of a salt solution.
- 9) Trocónis de Rincón, O., y otros. CYTED. Programa ibero-americano de ciencia y tecnología para el desarrollo. Subprograma XV, corrosión/impacto ambiental en materiales. 1era edición.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al FONACIT por el financiamiento del proyecto estratégico No. 201100041, al CONDES por su apoyo económico para la realización de este proyecto y a la Empresa Lomas de Níquel por la donación de la arena industrial.