

# Caracterización física y química de escorias de ferróniquel obtenidas a partir de minerales lateríticos de bajo tenor y sus posibles usos industriales

## Physical and chemical characterization of ferronickel slags obtained from low grade lateritic ores and your possible industrial uses

Edison H. López - Pulido<sup>1</sup>, Álvaro H. Forero - Pinilla<sup>2</sup>, Sandra C. Díaz - Bello<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Metalúrgico. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

<sup>2</sup>Especialista en Ensayos no Destructivos. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación en Materiales Siderúrgicos, Tunja, Colombia

<sup>3\*</sup> Ph.D. en Ingeniería Ciencia y Tecnología de los Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Grupo de Investigación ACBI, Tunja, Colombia  
Email: sandra.diazb@usantoto.edu.co

Recibido: 15/11/2018  
Aceptado: 07/01/2019

Cite this article as: E. H. López-Pulido, A. H. Forero-Pinilla, S. C. Díaz-Bello "Physical and chemical characterization of ferronickel slags obtained from low grade lateritic ores and your possible industrial uses", *Prospectiva*, Vol 17, N° 1, 42-49, 2019.

### RESUMEN

La caracterización de las escorias de ferróniquel obtenidas a partir del procesamiento de minerales lateríticos de bajo tenor por medio de la determinación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas es importante para darle un buen uso y valor agregado al residuo siderúrgico y una aplicación en la industria de la construcción, mitigando los efectos negativos que ésta causa a nivel ambiental y económico. Las escorias fueron caracterizadas por medio de técnicas como la fluorescencia de rayos X (FRX), absorción atómica (AA) para la determinación de su composición química. Así mismo, se realizó petrografía para identificar las fases microestructurales presentes, microscopía electrónica de barrido (MEB) para analizar su morfología superficial y difracción de rayos X (DRX) para identificar las posibles especies químicas mineralógicas presentes. Adicionalmente se obtuvo el peso unitario, densidad real, densidad real del agregado superficialmente seco y densidad real aparente y porcentaje de absorción. Se encontró que su composición química promedio es 12% MgO, 4,55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 44,9% SiO<sub>2</sub>, CaO 0,77%, CrO<sub>2</sub> 1,96%, MnO 1,17%, FeO 25,9%, NiO 0,29% y CuO 0,1%. Igualmente se encontró que alcanzaron a cristalizar algunas especies mineralógicas como la Pigeonita en un 63%, Enstatita en un 32,3%, y 4% de cuarzo.

**Palabras clave:** Aplicaciones; Caracterización; Escoria de ferróniquel; Residuos siderúrgico.

### ABSTRACT

Characterization of ferronickel slags obtained from low grade nickel ores was done. Chemical and physical properties were determinate to give it a use and aggregate value at slag. Use suggest is in construction materials to minimize negatives effects to environment and economic level. Slags were characterized by diffraction ray - X, fluorescence ray-X, atomic absorption, scanning electron microscopy to analyze its chemical composition, mineralogical composition and its superficial morphology. Unitary weight, real density, apparent real density and absorption percentage were obtained. Average chemical composition founded was 12% MgO, 4,55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 44,9% SiO<sub>2</sub>, CaO 0,77%, CrO<sub>2</sub> 1,96%, MnO 1,17%, FeO 25,9%, NiO 0,29% y CuO 0,1%. Is very important to know that some mineralogical species were founded such as Pigeonite with 63%, Enstantite with 32,3% and quartz with 4%.

**Key words:** Applications; Characterization; Ferronickel slag; Iron and steel waste.

## 1. INTRODUCCIÓN

Colombia es el décimo productor de ferróníquel a nivel mundial y abastece a los mercados de Suecia, Alemania, Finlandia, Italia, España y Corea, que utilizan la materia prima para la fabricación de productos de acero inoxidable[1]. El proceso de producción de ferróníquel se basa en el tratamiento de minerales tipo lateríticos, los cuales son llevados a un proceso de calcinación y reducción en un horno rotatorio a temperaturas cercanas a los 1100 °C, el producto calcinado es llevado a un horno eléctrico de arco, en donde a temperaturas cercanas a los 1600 °C se obtiene la ferroaleación (metal) y la escoria (óxidos), como residuo del proceso de fusión.

La escoria es un material vítreo compuesto por silicatos del grupo de los olivinos (forsterita) y espinelas de hierro, presentando adicionalmente una fase metálica de Fe y Ni principalmente [2]. En los últimos tiempos se ha generado la necesidad de dar uso a la escoria de ferróníquel, debido a la alta producción de ésta, ocasionando problemas ambientales considerables, debido a que su disposición es totalmente a la intemperie, generando grandes cantidades de este residuo.

Por lo anterior a través del tiempo se han desarrollado varios trabajos intentando dar un valor agregado al residuo del proceso de fusión de minerales de níquel. Por ejemplo, Lemonis y col. [3], estudiaron la evolución de la hidratación de los cementos ternarios mezclados compuestos por puzolana natural (NP) y escoria de ferróníquel (FNS), producida durante el tratamiento pirometalúrgico de lateritas para la producción de ferróníquel. Con la escoria y la puzolana hicieron doce mezclas de cemento diferentes que contenían hasta un 20% de sustitución del cemento Portland con los materiales cementosos antes mencionados [3].

Saha y col. [4], en el 2016 desarrollaron un trabajo donde se menciona que alrededor de 14 toneladas de escoria de ferróníquel granulado (FNS) son producidas y sugieren que sus propiedades físicas son adecuadas para el uso como agregados finos en el hormigón.

Aquino en el 2012 [5], da una opción de la utilización de la escoria producida en hornos eléctricos de arco como materia prima para mezclas de agregados en la fabricación de concretos para pavimentos dándole un uso adecuado al residuo de la industria siderúrgica.

Park y col. [6], en Corea del sur desarrollaron un trabajo donde usan las escorias para mejorar la eliminación de fósforo (P) al tiempo que se alcanzó un pH casi neutro en solución acuosa utilizando escorias de acero (escorias de alto horno, BFS; enfriamiento, BOFS-R) y escorias de ferróníquel (FNS) para aplicación a humedales construidos (CWs), alcanzando una elevada eficiencia de eliminación de P y un pH casi neutro para cumplir con el estándar de descarga de calidad del agua potable aceptable.

En el 2013, Ibrahimy y col. [7], describen las consideraciones ambientales del uso de estos residuos para producir nuevos

materiales, lo que constituye una manera eficiente de lograr un procesamiento sostenible de los desechos. El desarrollo de procesos tecnológicos para la producción de cristales cerámicos de alto rendimiento a través de la mezcla de residuos de vidrio, cenizas volantes y escoria de ferróníquel se ha llevado a cabo en cooperación con la empresa canadiense FLOGEN.

Cheol y Choi en el 2015 [8] estudiaron, la reactividad alcalino-silíce de los materiales cementosos utilizando escoria de ferro-níquel (FNS), los agregados finos se evaluaron experimentalmente para su uso potencial en el hormigón. Los resultados revelaron que la reactividad de los morteros de cemento utilizando los agregados variaba con la velocidad de enfriamiento y el tamaño de partícula del FNS.

En Guatemala la escoria proveniente de la planta de la Compañía Guatemalteca del Níquel (CGN) en el Estor, Izabal, posee características físicas similares a las de un agregado fino pétreo. En éste trabajo, debido a su similitud a la arena de río, el material fue tratado y ensayado como un agregado fino pétreo [9].

La compañía Guatemalteca del Níquel (CGN) tomó la iniciativa de avocarse al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala para realizar un estudio sobre la reutilización de la escoria de ferróníquel, que desecha dicha planta. La escoria de níquel fue analizada física, química y mecánicamente, como agregado fino en el mortero, por medio de pruebas de laboratorio realizadas en el Centro de Investigaciones de Ingeniería [10].

En Colombia se han desarrollado trabajos como el de Cruz y col. [11], donde se propone el uso de la escoria producida en un horno de cubilote para la fabricación de concreto aligerado. Se evaluaron las propiedades de un concreto con sustitución del 30% de arena por escoria triturada de horno de cubilote (EHC) y agregado grueso por escoria granulada en diferentes proporciones (0%, 50%, 75% y 100%).

En Santander en la Universidad Industrial de Santander (UIS) en el año 2012 se desarrolló un proyecto donde se crea la necesidad de eliminar ese tipo de residuos que generan gastos en su transporte, transformación, almacenaje, disposición final y un alto costo ambiental a largo plazo [12].

Parra y col. [13], hacen un estudio para establecer la viabilidad técnica de las escorias negras como agregado para concreto, se determinaron las propiedades físicas a partir de ensayos de laboratorio para evaluar su uso potencial como agregado fino o grueso.

En la Universidad Nacional de Colombia se estudiaron tres tipos de escoria (EHE, ERE y ERF) de una empresa metalúrgica de Córdoba. Se desarrollaron ensayos tendientes a determinar las principales características de las escorias provenientes de la mencionada industria metalúrgica para evaluar su posible uso como adición en el cemento Portland desde la perspectiva puzolánica e hidráulica latente [14].

Los estudios muestran que las escorias de ferróníquel son residuos de la industria extractiva del níquel que pueden ser usadas en diversas aplicaciones. El objetivo de este trabajo es identificar las características químicas de las escorias de ferróníquel obtenidas a partir del procesamiento de minerales lateríticos de níquel, que permitan obtener nuevos materiales para la construcción y sugerir diferentes usos en la industria. Se puede concluir que las escorias de ferróníquel deben ser estudiadas con mayor profundidad para su aplicación en la sustitución parcial en la fabricación de otros materiales especialmente concretos. Los estudios anteriores permiten hacer un acercamiento al valor agregado que se le puede dar a este residuo producto de la industria del níquel.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Muestras de escorias de ferróníquel

Las muestras de escorias caracterizadas utilizadas para este estudio son resultado del proceso de fusión en horno eléctrico de arco obtenidas a partir de minerales lateríticos de bajo tenor previamente calcinados en horno rotatorio, obtenidos en el departamento de Córdoba.

Se realizó la caracterización química, física y mineralógica de las escorias de ferróníquel, con el fin de determinar sus propiedades principales, analizarlas, y en función de estas poder sugerir posibles usos industriales. El procedimiento de caracterización se realizó con base en la figura 1.

Figura 1. Procedimiento experimental realizado a las escorias de ferróníquel.  
Figure 1. Experimental procedure made for ferronickel slags.



En la figura 1 se muestran los tipos de caracterización realizados a las escorias de ferróníquel utilizadas para el estudio.

### 2.2 Técnicas de caracterización

Para la caracterización química se utilizó el espectrómetro de absorción atómica, el espectrómetro de fluorescencia de rayos X y el microscopio de petrografía. Estos ensayos permitieron la determinación de los principales elementos químicos tales como: Si, Al, Ca, Ni, Fe y Mg.

### 2.2.1 Espectrometría de Absorción atómica

En química analítica, la espectrometría de absorción atómica es una técnica para determinar la concentración de un elemento metálico determinado en una muestra. Se determinaron la concentración de los seis elementos de interés, a saber: Al, Si, Ca, Ni, Fe y Mg. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de la UPTC y la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

### 2.2.2 Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos x es una buena herramienta para identificar compuestos relacionados con la naturaleza de los materiales arcillosos, Clinker y cemento. El proceso consistió someter tres muestras de escoria de ferróníquel al espectrómetro de fluorescencia de rayos X, y determinar su composición química de forma semicuantitativa. La figura 2 muestra el equipo de fluorescencia de rayos X del laboratorio de caracterización de la UPTC Tunja.

### 2.2.3 Petrografía

Es un campo de la petrología que se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o *láminas delgadas* derivadas de las rocas en estudio, en un microscopio petrográfico, clasificándolas según su textura y composición mineralógica. Para este estudio, se tomaron las muestras de escoria con el fin de observar el porcentaje de amorfos y especies mineralógicas que se formaron causados por el enfriamiento lento que tuvieron éstas, al momento de ser obtenidas en el proceso de fusión. El análisis en mención se llevó a cabo en la UPTC seccional Sogamoso.

Figura 2. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.  
Figure 2. XRF- Spectrometer.



### 2.3 Caracterización física

En la caracterización física se determinó la densidad promedio y la densidad relativa o gravedad específica y absorción. Estas propiedades son determinadas a los materiales gruesos y finos en calidad de materia prima, de pavimentos, asfaltos, cementos, concretos y adoquines, entre otros, para compararlos con la norma vigente ASTM, y sugerir la idoneidad o no de estas escorias en la industria de la construcción. En este ensayo se determinaron la densidad promedio de una cantidad de

partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino. Dependiendo del procedimiento utilizado, la densidad, en kg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>), se expresa como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS) o aparente. Además, la densidad relativa (gravedad específica), que es una cantidad adimensional, se expresa como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS) o aparente (gravedad específica aparente). La densidad seca al horno (SH) y la densidad relativa seca al horno (SH) se deben determinar luego del secado del agregado. La densidad SH, la densidad relativa SSS y la absorción se determinan luego de sumergir el agregado en agua durante un periodo especificado.

## 2.4 Caracterización mineralógica y morfológica

### 2.4.1 Microscopía electrónica de barrido

Es una de las técnicas más versátiles para la visualización y el análisis de las características micro estructurales de muestras sólidas, debido, principalmente, a su elevada resolución (alrededor de 20 Å) y a su gran profundidad de campo, lo que permite una visualización tridimensional. La morfología de las partículas tiene gran influencia en las propiedades de un mortero tanto en estado fresco como en estado endurecido, por lo tanto, el estudio morfológico se realizó con microscopía electrónica de barrido (SEM). Este análisis es representativo en la medida en que puedan ser determinadas algunas características como la dimensión o tamaño del grano, la redondez y esfericidad, la textura, el color y el brillo. En la figura 3 se observa el microscopio electrónico de barrido que se utilizó, este es un equipo Carl Zeiss, de fabricación alemana, de referencia EVOMA 10, el cual usa los tres tipos de rayos, dispersos, retro-dispersos y los secundarios.

Figura 3. Microscopio electrónico de barrido.  
Figure 3. Scanning electron microscopy.



### 2.4.2 Difracción de rayos X

Para este ensayo se utilizó un equipo equipo PANalytical de referencia X'pert, con fuente de Cu y K Alpha 1 con una longitud de onda de 1.5406 Å y una fuente de poder de 1.8 kW (45 kV -40 mA, ángulo de barrido de 0 -70°). La identificación de estas características mineralógicas permite determinar si un agregado es adecuado para un uso específico y complementa las técnicas químicas, corroborando los resultados.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

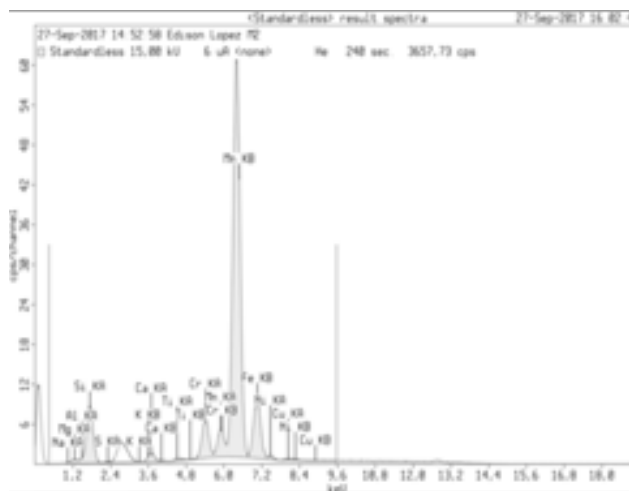
La caracterización realizada a las escorias de ferromniquel hace posible determinar sus diversas propiedades, las cuales permiten evaluar la factibilidad de uso en la industria.

### 3.1 Propiedades químicas

Por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) se hizo una caracterización semicuantitativa con el fin de determinar los posibles óxidos presentes. En la figura 4 se observa el espectrómetro obtenido por FRX de forma elemental.

La figura 4 muestra el espectrómetro de fluorescencia de rayos X obtenido para una muestra de escoria de ferromniquel. Se observan elementos tales como el silicio, aluminio, magnesio, níquel, magnesio, hierro, entre otros.

Figura 4. Espectrómetro obtenido por fluorescencia de rayos X para una muestra de escoria.  
Figure 4. Spectrometer obtained by FRX for a slag sample.



### 3.2 Composición química por espectroscopia de absorción atómica

En la espectroscopía de absorción atómica se obtuvo lectura de seis elementos químicos principales, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 1. Porcentajes de elementos obtenidos por AA.  
Table 1. Percentages of elements obtained by AA.

Muestra	%Al	%Ca	%Si	%Fe	%Mg	%Ni
1	0,84	0,03	60,1	0,69	37,6	0,06
2	0,86	0,04	59,7	0,78	36,4	0,09
3	0,85	0,03	58,6	0,87	35,9	0,07

La tabla 1 muestra la presencia de silicio y magnesio en mayor cantidad, y de pequeñas cantidades de aluminio, calcio, hierro y níquel. La mínima presencia de estos elementos se debe a que estas escorias son las obtenidas del horno eléctrico de arco, las cuales son anteriores al proceso de refinación en el horno cuchara. En el horno eléctrico de arco se elimina del baño metálico especialmente el magnesio.

### 3.3 Petrografía

La composición fue establecida mediante conteo de 500 puntos por microscopía óptica con luz transmitida con polarizadores paralelos y cruzados.

En esta petrografía se encontró:

- **Ortopiroxeno:** variedad Enstatita-Ferrosilita. Hábito tabular, astilloso, exfoliación en planos a 90°. Color pardo neutro, no presenta pleocroísmo. Relieve fuerte positivo, birrefringencia de segundo orden.
- **Clinopiroxeno:** variedad Augita. Hábito prismático, incoloro, neutro exfoliación en planos a 90° Extinción inclinada mayor de 20°. Birrefringencia fuerte de segundo orden.
- **Olivino:** hábito prismático. No presenta exfoliación. Birrefringencia fuerte de segundo orden. Incoloro a verde claro.

En la tabla 2 se tienen las especies mineralógicas encontradas en las muestras de escoria de ferroníquel:

**Tabla 2.** Especies mineralógicas encontradas en las muestras de escoria de ferroníquel.  
**Table 2.** Mineralogical species found in ferronickel slag samples.

Componentes	Volumen en %	Forma	Tamaño
Fase amorfa	Opacos	5,0	amorfa
	Vítrea	2,0	amorfa
Fase cristalina	Ortopiroxeno-Enstatita-Ferrosilita	62,0	subhedral
	Clinopiroxeno	17,0	anhedral
	Olivino	14,0	anhedral
<b>Total</b>	<b>100</b>		

Se tiene entonces que la fase mayoritaria, que es del 62%, corresponde a la familia de los ortopiroxenos, de hábito astilloso y tabular, representándolo la enstatite-ferrosilita, mientras que el 17% corresponde a los clinopiroxenos, de hábito prismático, representándolo la Pigeonita.

Los ortopiroxenos y los clinopiroxenos poseen un hábito prismático granular, pero los primeros son subhedral, es decir, algunas de las caras están bien formadas, mientras que los segundos son anhedral, es decir, granos con formas irregulares.

La Enstatita y la Ferrosilita se encuentran dentro del grupo de los ortopiroxenos, mientras que la Augita se encuentra dentro de grupo de los monoclinopiroxenos.

### 3.4 Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías obtenidas producto de la microscopía electrónica de barrido fueron realizadas a las muestras de escorias de ferroníquel 1, 2 y 3, respectivamente.

Estas escorias, tuvieron un proceso lento de enfriamiento, por lo que tuvieron tiempo de cristalizar algunas especies mineralógicas. A las tres muestras analizadas, se les tomó tres micro-

grafías. Estas micrografías fueron tomadas haciendo uso de los rayos secundarios y retrodispersados.

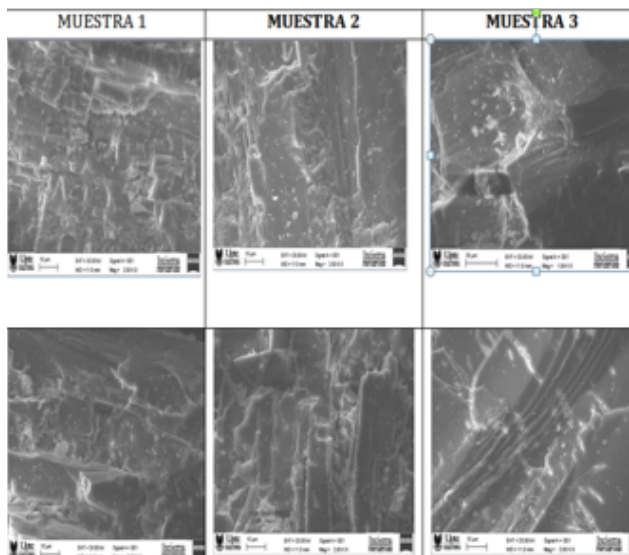
En la figura 5 se observan las micrografías de la microscopía electrónica de barrido. Cada micrografía tiene un ancho de aproximadamente 60 µm.

En las 3 micrografías de la muestra 1 y 2, resultan ser de morfología astillosa, tabular, lo que indica que se trata de la morfología típica de los ortopiroxenos, familia en la cual se encuentran las enstatites-ferrosilites. Este hecho es congruente con los datos obtenidos de esta fase mineralógica, la cual corresponde al 17%, según la petrografía practicada. En cambio, la muestra 3 muestra algo diferente: la primera micrografía de esta muestra expone lo que parece ser una fractura concoidea, la segunda micrografía muestra laminillas superpuestas, y la tercera evidencia una pequeña macla, propia de los cristales prismáticos. Estas tres particularidades encontradas, la fractura concoidea, las laminillas y la macla encontrada son propias de los clinopiroxenos, familia que comprende a la Pigeonita, la cual se encuentra en un 62%. La Pigeonita suele confundirse a veces con la Augita, ya que la Augita es un aluminio-silicato de Ca, Mg y Fe, mientras que la Pigeonita es un silicato de Ca, Mg y Fe.

Estas micrografías tienen la particularidad de estar en forma cristalina, permitiendo una mayor resolución de lectura y apreciando superficialmente el tipo de cristalización que presentó durante el enfriamiento lento.

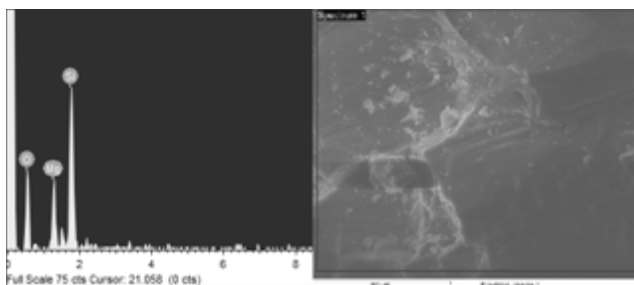
Adicionalmente, con el EDS acoplado al microscopio electrónico de barrido, se hizo un análisis químico a las tres muestras de escorias de ferroníquel, en donde se evidencia la presencia de los elementos químicos como lo son el Si y el Mg. Con el EDS se puede identificar la composición química puntual de la muestra de escoria, la cual se puede contrastar con la composición química determinada en el ensayo de espectroscopía de absorción atómica.

**Figura 5.** Micrografías SEM para tres muestras de escoria.  
**Figure 5.** Micrographics SEM for three slag samples.



**Figura 6.** Micrografía, espectro y resultados cuantitativos de cada una de las muestras de escoria de ferroníquel.

**Figure 6.** Micrographic, spectrum and quantitative results for each ferronickel slag sample.



Elemento	% Peso	% Peso	%Atómico
O K	55,99	5,09	68,23
Mg K	11,34	2,17	9,09
Si K	32,67	4,10	22,68
Total	100,00		100,00

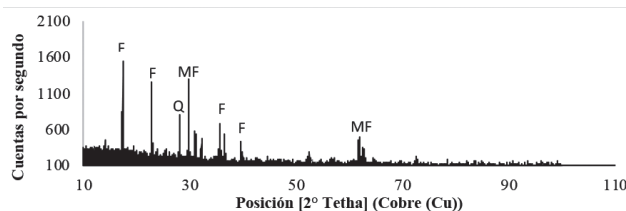
En la figura 6 se muestran las micrografías, uno de los espectros obtenidos y el porcentaje en peso de los elementos químicos constituyentes, para posterior contraste con la composición química del espectrómetro de absorción atómica.

### 3.4 Difracción de rayos X

La Difracción de rayos X fue practicada a las tres muestras, respectivamente, obteniéndose los siguientes difractogramas, tal como se muestra en la figura 7.

**Figura 7.** Difractograma de rayos X para una muestra de escoria de ferroníquel. F: Forsterita, Q: cuarzo, MF: Magnesio ferrita.

**Figure 7.** Difractogram ray-X for a ferronickel slag sample. F: Forsterite, Q: Quartz, MF: Magnesium ferrite.

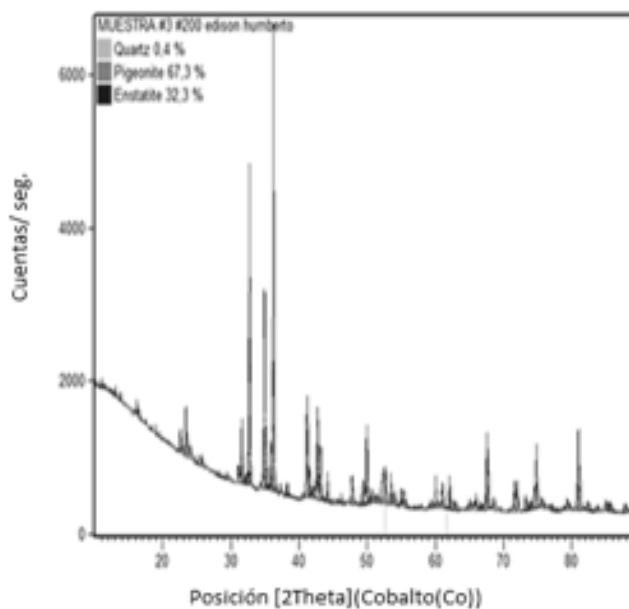


En la figura 8 Se tiene que más de las dos terceras partes pertenece a la Pigeonita, cuya fórmula química es  $(\text{Mg, Fe, Ca})\text{SiO}_3$ , y que el restante tercio corresponde a la Enstatita,  $(\text{Mg})\text{SiO}_3$ . Estas especies se pueden observar en la figura 8.

Los resultados obtenidos por petrografía y difracción de rayos X son precisos y confiables. Sin embargo, se observa que las cantidades de enstatita-ferrosilita y Pigeonita difieren teniendo en cuenta que las muestras de escoria de ferroníquel se caracterizaron petrográficamente en función de la forma cristalina, es decir, en función de la forma de sus caras cristalinas, mientras que en el ensayo de difracción de rayos X se caracterizaron en función de su sistema cristalino. Estas escorias, fueron enfriadas a temperatura ambiente, teniendo tiempo de presentar desarrollo cristalino, obteniéndose entonces formaciones de caras cristalinas parciales y nulas, es decir, subhaciales y anhedrales, respectivamente. Entonces,

**Figura 8.** Difractograma de una muestra de escoria de ferroníquel.

**Figure 8.** Difractogram of ferronickel slag sample.



el olivino, que es el mineral que conforma en mayor parte la escoria, presenta desarrollo cristalino parcial, sin cambiar de estructura cristalina. Es este cambio isomorfo lo que explica las diferencias presentadas en los porcentajes composicionales, en donde se mantiene la estructura cristalina, presentando variación estequiometría, simultáneamente.

El olivino, que es la especie mineralógica que está presente en la escoria casi en su totalidad de su masa, llega a transformarse solo parcialmente, por lo que alcanza a presentar desarrollo parcial de algunas caras, es decir, adquiere hábito subhedral, transformándose entonces parte del olivino, serie isomorfa que va desde la Fayalita hasta la Forsterita, en Enstatita- Ferrosilita. Su diferencia radica, en la petrografía, solo en el desarrollo cristalino parcial, y en una ligera variación estequiométrica, manteniendo el mismo sistema cristalino.

Entonces, el 14% del olivino de la petrografía corresponde al olivino que no alcanza a transformarse, por lo que permaneció indiferente al enfriamiento, mientras que el 62% si se llegó a transformar en Enstatita-Ferrosilita, mientras que el 17% se transformó en un clinopiroxeno, sistema cristalino propio de la Pigeonita.

Teniendo en cuenta la caracterización anterior se procede al análisis de los resultados obtenidos comparado con el estado del arte, para poder sugerir los usos que pudieran tener estas escorias.

En las formas cristalinas más comunes de la sílice, en promedio, los 4 puntos (o átomos de oxígeno) de la estructura de  $\text{SiO}_4$  (que está en forma de tetraedro) se comparten con otros tetraedros de  $\text{SiO}_4$ , por lo que a pesar de que se puede ver un  $\text{SiO}_4$  tetraedro en el cristal, no está aislado sino conectado a otros tetraedros  $\text{SiO}_4$  compartiendo átomos de oxígeno. Las cantidades relativas resultantes de silicio y oxígeno en la

estructura cristalina conducen a la fórmula química neta:  $\text{SiO}_2$ . Es por lo que, a pesar de que el silicio se encuentre en las escorias bajo la forma de los iones  $\text{SiO}_4$  y  $\text{SiO}_3$ , el análisis considera la presencia de la molécula  $\text{SiO}_2$ .

### 3.5 Peso unitario, peso específico saturado superficialmente y peso específico seco

Para la determinación de estos coeficientes ya se ha mencionado el procedimiento, y una vez realizado se obtienen los siguientes resultados, consignados en la siguiente tabla 3.

**Tabla 3.** Variación propiedades físicas de agregados para muestras de escoria.  
**Table 3.** Physical properties variation of aggregates for slag samples.

Material	Peso unitario (g)	Peso específico saturado superficialmente (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico seco (g/cm <sup>3</sup> )	% Absorción
Muestra 1	1,36	2,63	2,77a	1,37
Muestra 2	1,39	2,81	2,81	1,4
Muestra 3	1,27	2,84	3,05	1,37
Promedio	1,34	2,76	2,9	1,38

Para este ensayo se hizo uso de las tres muestras de escorias molidas a malla #100, o sea, a 75  $\mu\text{m}$ . para estos valores se aceptan una desviación de máximo 0,82, según la norma INVIAS, por lo que estos resultados obtenidos son aceptables.

### 3.6 Evaluación de usos de la escoria de ferróniquel en la industria de la construcción

Para la sugerencia de los posibles usos que pudieran tener las escorias de ferróniquel evaluadas, se tuvieron en cuenta solo las caracterizaciones de tipo químico y físico, ya que, para este caso, la mineralogía estudiada se empleó para correlacionar datos de los resultados obtenidos por los otros métodos que se usaron, con el fin de corroborarlos. La utilización de estos “desechos” industriales depende casi que exclusivamente de estas propiedades.

Para el análisis químico se practicaron a las escorias ensayos de absorción atómica y fluorescencia de rayos X. Estos dos ensayos se complementan entre sí, teniéndose en cuenta que permiten ver de forma cuantitativa y semi-cuantitativa cada una de las especies mineralógicas y los compuestos presentes. Las muestras de escoria son ricas en  $\text{SiO}_2$ , y con contenidos mínimos de óxidos de hierro. Los demás compuestos químicos mantienen sus porcentajes entre muestras. Sin embargo, en ambas muestras analizadas se observa que existe en mayor cantidad  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{MgO}$ , principalmente, seguido del  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

El peso unitario, densidad real, densidad real aparente, y densidad real como agregado saturado superficialmente seco, y porcentaje de absorción se tuvieron en cuenta para la sugerencia de los usos a nivel industrial.

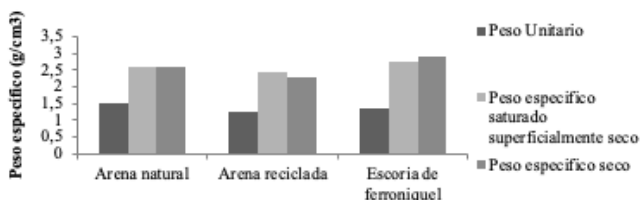
Las densidades halladas bajo norma internacional ASTM quedan registradas para análisis posteriores, ya que son propiedades elementales de las escorias y en general de los agregados para la construcción, las cuales podrían sugerirse para su uso en la fabricación de cementos y concretos, principalmente.

En la tabla 4 se tienen algunas propiedades físicas tipificadas como fundamentales al momento de clasificarlas el árido o la arena como apto para ser utilizada para fabricar cementos.

**Tabla 4.** Variación propiedades físicas de diferentes agregados y la escoria de ferróniquel.  
**Table 4.** Physical properties variation of different aggregates and ferronickel slag.

Parámetro	Arena natural	Arena reciclada	Escoria de FeNi
Peso unitario (g)	1,51	1,28	1,34
Peso específico saturado superficialmente (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,43	2,76
Peso específico seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,59	2,27	2,9
% Absorción	1,21	6,84	1,38

**Figura 9.** Variación de propiedades físicas de agregados comparados con las propiedades físicas de las escorias de ferróniquel.  
**Figure 9.** Physical properties variation of aggregates compared with physical properties of ferronickel slags.



En la figura 9 se observa la similitud de las propiedades físicas de una arena natural, una arena reciclada y la escoria de ferróniquel en estudio. Se observa que las escorias de ferróniquel analizadas pueden ser utilizadas como sustituto parcial de los agregados finos en el concreto, ya que su peso unitario, el peso específico saturado, el peso específico seco y la absorción presentan una variación despreciable, presentando en cambio una gran ventaja con la relación a la arena reciclada, ya que esta última presenta un elevado porcentaje de absorción, lo que la hace poco atractiva, debido a que esto implica un mayor costo por tener que emplearse mucho más agua para llevar a cabo eficientemente el proceso de hidratación del concreto, teniendo mayores gastos y mayor impacto ambiental. Adicionalmente, se debe decir que el patrón de fractura de las arenas recicladas es muy anguloso e irregular con respecto a las naturales, mientras que el patrón de fractura de las arenas naturales es redondeado.

La esfericidad relaciona la forma del grano con una esfera de igual volumen sirve para clasificar los granos angulosos y redondeados en alto y bajo grado de esfericidad [15]. La forma y textura superficial de las partículas influyen considerablemente en las propiedades del mortero, dependiendo

do de ello se requiere más cemento y agua para obtener un mortero trabajable [16].

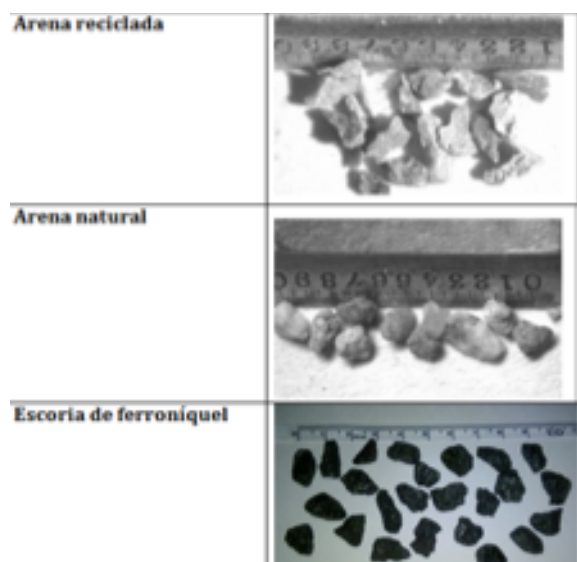
Las escorias de ferróniquel no tienen una fractología semejante a la de la arena natural la cual es redondeada, tiene lados muy angulosos. Es posible que ese patrón se deba al tipo de trituradora y el tiempo suministrado en la misma. Sin embargo, al lograrse agregados gruesos y finos con ambos tipos de fractología, eventualmente se podría diseñar una mezcla de ambos optimizando la densidad específica y la resistencia del mortero fabricado, mediante una mezcla de arena natural con escoria de ferróniquel.

Una de las ventajas más significativa en el uso de escoria de ferróniquel como sustituto parcial de los agregados para concreto, sería el bajo porcentaje de absorción, ya que esto significa en ahorro de agua en el proceso de hidratación del cemento, y en un ahorro económico, minimizando el impacto ambiental. Estas propiedades físicas son las que hacen interesantes a las escorias de ferróniquel en la fabricación de concretos simples.

En la tabla 5 se tiene el tipo de fractura del agregado reciclado, agregado natural (arena) y escoria de ferróniquel.

**Tabla 5.** Tipo de fractura de arena reciclada, arena natural y escoria de ferróniquel.

**Table 5.** Type of fracture of recycled sand, natural sand and ferronickel slag.



## CONCLUSIONES

Las escorias de ferróniquel analizadas son de naturaleza poli-mineral donde predomina la presencia de silicatos tipo piroxeno, relacionados a rocas ígneas ricos en hierro y magnesio, como es el caso de la Enstatita y Pigeonita.

La composición química de las escorias colombianas de ferróniquel, expresada en forma de óxidos fundamentales, está compuesta por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{FeO}$ , los cuales representan el 86% del total de la muestra. Adicionalmente, están compuestas en menor contenido por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

Las escorias de ferróniquel están conformadas principalmente por 67,3% de Pigeonita, la cual es un silicato de magnesio, hierro y calcio y en un 32,3% de Enstatita, que es un silicato de magnesio. Esta composición puede ser conducente al uso de las escorias de ferróniquel en materiales de construcción.

El peso unitario, el peso específico saturado superficialmente seco, y el peso específico seco son muy similares a los de las arenas naturales y artificiales utilizadas en la fabricación de concretos, lo que lleva a sugerir su uso en materiales de construcción.

El porcentaje de absorción de las escorias de ferróniquel es muy similar al de las arenas naturales, a diferencia de las arenas artificiales, cuya absorción es de 6,84% casi cinco veces más que las arenas naturales. Esto se convierte en una ventaja técnica, económica y ambiental, pues esto hace que no sea necesario el empleo de mayor cantidad de agua a la mezcla, y evita incurrir en mayores gastos económicos, ofrece más practicidad y se evita el desperdicio de agua.

Las escorias de ferróniquel presentan propiedades químicas y físicas que la podrían hacer adecuada para el aprovechamiento de estas en ladrillos, tejas, adoquines, refractarios, y para la fabricación de materiales abrasivos.

## REFERENCIAS

- [1] J. G. Londoño, Ferróniquel se paga a precio de oro, *El tiempo*, Bogotá, p. 1, 21-Jul-2000.
- [2] C. E. Neret González, (2004). Caracterización de las escorias de fusión del proceso de producción de ferróniquel. Tesis de Pregrado, Universidad Simon Bolívar.
- [3] N. Lemonis, P. E. Tsakiridis, N. S. Katsiotis, S. Antiohos, D. Papageorgiou, M. S. Katsiotis, M. Beazi-katsioti, "Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan", *Construction and Building Materials*, 81, 130–139, 2015.
- [4] A. K. Saha, P. K. Sarker, "Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars", *Construction and Building Materials*, 123, 135–142, 2016.
- [5] E. Aquino, A. Fuentes, (2012). Aplicación de escoria siderúrgica como agregado en las mezclas de concreto para pavimento rígido. Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [6] J. Park, S. Kim, R. D. Delaune, B. Kang, S. Kang, J. Cho, Y. Sik, D. Seo, "Enhancement of phosphorus removal with near-neutral pH utilizing steel and ferronickel slags for application of constructed wetlands", *Ecological Engineering*, 95, 612–621, 2016.
- [7] I. Ibrahim, M. Rizaj, J. Pula, F. Kongoli, I. A. N. MCBOW, "Basic control principles for producing a high performing new ceramic glass by mixing fly ash, ferronickel slag and waste glass", *IFAC Proceedings Volumes*, 46(16), 470–477, 2013.
- [8] Y. Cheol, S. Choi, "Alkali – silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions", *Construction and Building Materials*, 99, 279–287, 2015.
- [9] L. M. Alvarez, (2009). Evaluación de la escoria de ferróniquel como agregado fino para concreto. Tesis de Pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [10] E. Samayoa, (2009). Evaluación de la escoria de ferróniquel como



agragado fino para morteros de albañilería y acabados. Tesis de Pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- [11] R. Cruz, L. Perez, D. Acosta, K. Castillo, “Propiedades del concreto con sustitución de escoria de horno de cubilote como agregado fino y escoria granulada”, *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 291–296, 2014.
- [12] Gobernación de Santander (Comisión Regional de Competitividad), *Escoria para agregados de concreto, una solución sólida*, 2012, pp. 45-50.
- [13] L. Parra, D. Sanchez, (2010). Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica diaco. Municipio Tuta Boyacá. Tesis de Pregrado, Universidad de La Salle.
- [14] J. F. Carvajal Vinasco, (2012). Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín).
- [15] A. González Moradas, M. Torres, M. Cedés, “Características Morfométricas de las Cenizas Volantes”, *Revista Ingeniería Civil*, 78, 31–34, 1991.
- [16] H. Gallegos, “Mortero”. En: *Simposio Internacional sobre Mampostería Estructural y Arquitectónica*, pp. 67–110.