



Análisis por SEM de concretos simples con sustitución parcial de escoria como agregado fino

SEM analysis of simple concrete with partial substitution of slag as fine aggregate

Camilo. A. Rojas – García¹, Sandra C. Díaz –Bello² y Karent D. Pinzón – Pardo³

¹Facultad de Ingeniería Civil - Universidad Santo Tomás – Tunja, Boyacá, Colombia, Campus
Avenida Universitaria - Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 – 202.

Correo electrónico de contacto [1camilo.rojasg@usantoto.edu.co](mailto:camilo.rojasg@usantoto.edu.co)

Recibido: dd mes aaaa. Aceptado: dd mes aaaa. Versión final: dd mes aaaa

Resumen

La presente investigación tiene como principal enfoque la evaluación por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM) de parámetros a nivel de microestructura de concretos en este caso simples, con sustitución parcial de escoria como agregado fino. Este enfoque podría ser útil en la generación de concretos con mayores resistencias ya que se observó la porosidad generada en el material y evaluó la relación que se genera entre la escoria empleada y los demás materiales usados para la elaboración del concreto.

Se implementó escoria de ferromniquel como agregado fino, remplazando arena convencional por una dosificación del 5% de escoria, lo cual permita establecer la influencia por medio de la SEM del nuevo agregado en el concreto y en la resistencia a la compresión del mismo.

En el análisis de los concretos y su comportamiento al ser sometido a una carga o esfuerzo, en su mayoría se centran en evaluar parámetros mecánicos como lo puede ser la resistencia a la compresión y se deja a un lado factores como la microestructura del material que pueden llegar afectar dicho parámetro. Por lo cual, es importante analizar con mayor detenimiento la parte micro de los concretos ya que se puede determinar que tanto influye la presencia de vacíos o porosidad con respecto a la resistencia a la compresión del concreto, de igual manera, este estudio mostrará algunas formas en las cuales se puede conocer y analizar esta porosidad con el fin de que se aplique en nuevos estudios.

Finalmente, se obtuvieron resultados de la resistencia a la compresión de concretos convencionales y con dosificación de escoria, los cuales permitieron analizar en primer lugar la influencia de este nuevo material en la resistencia del concreto y en segundo lugar analizar y comparar por medio de SEM la porosidad presente en los dos concretos. Lo

cual permitió evidenciar que el concreto simple con dosificación del 5% de escoria de ferroníquel, puede ser implementado, ya que alcanza la resistencia de diseño.

Palabras clave: ITZ (zona de transición interfacial), Concreto, Escoria de ferroníquel, Microscopia electrónica de barrido, Microestructura, Resistencia a la compresión.

Abstract

The focus of this research is the evaluation by means of scanning electron microscopy (SEM) of parameters at the microstructure level of concretes in this case simple, with partial substitution of slag as fine aggregate. This approach could be useful in the generation of concretes with higher strengths since the porosity generated in the material was observed and the relationship generated between the slag used and the other materials used for the preparation of the concrete was evaluated.

Ferronickel slag was implemented as fine aggregate, replacing conventional sand with a dosage of 5% slag, which allows establishing the influence through the SEM of the new aggregate on the concrete and on its compressive strength.

In the analysis of concrete and its behavior when subjected to a load or stress, most of them focus on evaluating mechanical parameters such as compressive strength and leave aside factors such as the microstructure of the material that can reach affect that parameter. Bearing this in mind, it is important to analyze the micro part of the concrete in greater detail since it can be determined how much the presence of voids or porosity influences the compressive strength of concrete, in the same way, this study will show some ways in which this porosity can be known and analyzed in order to be applied in new studies.

Finally, results were obtained on the compressive strength of conventional concretes and with slag dosing, which made it possible to analyze first the influence of this new material on the strength of concrete and secondly analyze and compare by means of SEM the porosity present in the two concretes. This made it possible to show that simple concrete with a dosage of 5% ferronickel slag can be implemented, since it reaches the design resistance.

Keywords: ITZ (interfacial transition zone), Concrete, Ferronickel slag, Scanning electron microscopy, Microstructure, Compressive strength.

1. Introducción

La investigación se desarrolla con el fin de darle uso a un material considerado residuo y que por lo mismo viene siendo acumulado ocupando grandes cantidades de espacios y generando contaminación debido a que su disposición es a la intemperie generando en el producto su desgaste o degradación. El material evaluado o estudiado es la escoria de ferroníquel (FeNi), material generado por la industria siderúrgica en la producción de minerales tipo lateríticos, los que 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. [1]

Se busca implementar la escoria de ferroníquel como agregado fino en la elaboración de concreto, ya que su

composición como material vítreo compuesto por silicatos del grupo de los olivinos (forsterita) [1] los cuales se forman a partir de la unión de estos con magnesio y otros elementos del mismo grupo y por el enfriamiento lento al que está sometido el material. Al tener esta composición, puede generar buena interacción con la pasta de cemento y por lo mismo un material que puede ser utilizado en la industria de la construcción.

Teniendo en cuenta lo anterior, la investigación busca analizar el comportamiento que tiene la escoria de FeNi como agregado fino y su interacción con el agregado grueso en el concreto.

Muchos estudios sobre concreto, se enfocan en analizar principalmente parámetros mecánicos del concreto como lo puede ser la resistencia a la compresión y no se detienen en analizar algunos factores que pueden llegar a tener influencia sobre estos parámetros. Teniendo en cuenta esto, el principal enfoque que se tiene en la investigación es analizar la influencia del espesor de la

ITZ sobre la resistencia a la compresión del concreto, dosificando escoria de FeNi como agregado fino.

La Zona de Transición Interfacial (ZTI) de la matriz de cemento en los agregados es comúnmente considerada como el elemento más débil del concreto. En esta fase, se inician las primeras grietas en el material y comienza el proceso de destrucción del material compuesto. [2]

Por lo anterior, es de suma importancia conocer las características, comportamiento y formación de esta zona, de igual manera, su intervención en el proceso de desarrollo del concreto. Debido a esto, es necesario determinar una metodología de análisis con la cual se pueda medir y evaluar las características de la ITZ, por lo que se implementó la microscopía electrónica de barrido (SEM) y con ella por medio de imágenes permitió observar y evaluar la ITZ y la porosidad presente en el concreto. Estas metodologías son indispensables en el transcurso de la investigación, ya que permite identificar químicamente la estructura del concreto obtenida, de igual manera brinda imágenes en las cuales se observa la porosidad que se presenta en la misma.

El análisis por SEM tiene como principal uso determinar las características morfológicas y químicas puntuales de los componentes de materiales y para este caso del concreto. [3].

De igual manera, como se menciona en otras investigaciones, la microscopía electrónica de barrido o microanálisis de espectroscopia de rayos x de energía dispersa (EDS por sus siglas en inglés) se utilizó recientemente como parte de la metodología de análisis, desarrollada en la caracterización de rocas arcillosas sellos en esa franja, la cual consistió en integrar la información morfológica y química de la roca. [4]

De igual forma, otra investigación estudia tanto la microestructura como el espesor de la zona de transición interfacial (ITZ) en los hormigones del cemento Portland y los agregados ligeros (LWA). Se ha establecido que la microestructura en la ITZ depende en gran medida de la naturaleza del agregado, específicamente de su porosidad y absorción de agua la cual puede ser evaluada por medio de SEM. [3]

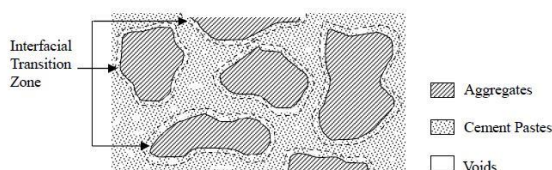


Figure 1 Interacción agregado – cemento Fuente: https://www.researchgate.net/profile/Amanda_Sepulved

a/publication/309398676/figure/fig1/AS:420805159735301@1477339176372/Microestructura-del-NSC-Concreto-de-Resistencia-normal-Fuente-High-Performance.png

Varios estudios han analizado la ITZ del concreto con la implementación de diferentes agregados gruesos y por medio de la incorporación de otros materiales en el cemento, de igual forma, se han usado aditivos en el concreto, entre otros componentes, procesos y metodologías.

Para el 2014, Se aplica una metodología experimental para determinar el comportamiento de deformación del ITZ en el concreto durante la congelación y descongelación. Se mostró que la ITZ tuvo mayor deformación debido a su porosidad con respecto a la demás matriz de cemento. [5].

En el año 2017, por medio de la nanoindentación se buscó evaluar la influencia de las cenizas industriales de la caña de azúcar en las propiedades mecánicas ligadas al ITZ. Los resultados mostraron variación en el espesor del ITZ, lo cual se cree es causado por la relación agua/aglomerante presente en el concreto. [6]

En 2019, con el fin de mejorar las propiedades de la ITZ, se implementan aditivos minerales que se agregan al compuesto con el fin de que funcionen como aglutinante. El aditivo usado es un desecho industrial conocido como cenizas volantes silíceas. [7]

En este mismo año, Se buscó relacionar la composición del hormigón con la resistencia compresiva uniaxial. Los modelos fueron validados por medio de la escala de hidrato a concreto, la magnitud de la resistencia se debe a la concentración de tensiones en el ITZ y la relación agua cemento como parámetro en el diseño de mezcla. [8]

Para el 2019, se investigó sobre el concreto con agregados reciclados (RAC) ha mostrado problemas para alcanzar la resistencia del concreto normal. Por lo cual se implementa el método de mezcla triple optimizada (OTM) para fortalecer el ITZ en el RAC. El OTM usando Materiales de cemento suplementarios (SCM) podría incrementar la resistencia a la compresión, al congelamiento y descongelamiento e impermeabilizar el concreto. [9]

La información más relevante que se extrajo permitió establecer la implementación de la SEM como un método de análisis para medir, analizar y observar las microestructuras presentes en el concreto las que pueden ser modificadas a partir de la implementación de diferentes materiales o aditivos. Teniendo en cuenta esto,

la investigación busca conocer a partir de la implementación de esta técnica la morfología y en especial la porosidad asociada con la zona de interfaz de pasta-agregado presente en el concreto y de tal manera, que esto permita evaluar que tanto influyen estos parámetros en la resistencia a la compresión de un concreto.

2. Materiales y métodos

2.1 Metodología

La metodología implementada en el proyecto tuvo dos fases importantes. La primera consistió en la recolección teórica de información en bases de datos institucionales, en las cuales se obtuvo información de métodos de implementación de la escoria de ferroníquel, evaluación de la ITZ en concretos de diferentes tipos, caracterización y comportamiento de agregados finos y gruesos con la pasta de cemento y análisis de muestras por medio de microscopia electrónica de barrido SEM.

Por otra parte, a nivel experimental, se determinó la implementación de la escoria de ferroníquel como agregado fino en concreto convencional. Por lo cual, se realizó el estudio granulométrico del agregado y se llevó a cabo el diseño de mezcla para la realización de

de falla y sus dimensiones, tanto en las muestras convencional y las que cuentan con la dosificación y por último la morfología del agregado en interacción con la pasta cementante.

Todo con el fin de determinar la viabilidad de la implementación de escoria de ferroníquel como agregado fino en el concreto convencional, sin que este pierda sus propiedades y por el contrario se presente un mejor comportamiento y una disminución en la generación de porosidad en la zona de interacción del agregado con la pasta cementante.

2.2 Diseño de mezcla

Se realizó la caracterización del material a implementar en la realización de muestras cilíndricas de concreto en las cuales, por medio de análisis granulométrico en especial, se pudo establecer un diseño de mezcla pertinente para la realización de dichas muestras.

El agregado fino y grueso es proveniente de canteras cercanas a la ciudad de Tunja, este, por sus características, tamaño y cuyo uso es la elaboración de muestras cilíndricas de concreto, se determinó un tamaño máximo nominal de partícula del agregado entre 3/4" o 1/2". (Tabla 1)

Tabla 1. Tamaño máximo nominal en mm (pulgadas)

Dimensión mínima del elemento (cm)	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzos	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 – 15	12(1/2")- 19(3/4")	19(3/4")	19(3/4") - 25	19(3/4") - 38(1 1/2")
19 – 29	19(3/4") - 38(1 1/2")	38(1 1/2")	38(1 1/2")- 76(3")	
30 – 74	38(1 1/2")- 76(3")	76(3")	38(1 1/2")- 76(3")	76(3")
75 o más	38(1 1/2")- 76(3")	152(6")	38(1 1/2")- 76(3")	76(3")- 152(6")

muestras cilíndricas.

Tabla 1 Dimensión máxima del agregado Fuente: [10]

Dichas muestras contaban con una dosificación de 5% de escoria (FeNi) como agregado fino.

Las muestras fueron sometidas al ensayo de compresión simple tanto a los 7, 14 y 28 días. Se realizó la respectiva comparación de resistencia de cilindros convencionales, con respecto a los cilindros con la dosificación del 5% de escoria de ferroníquel.

Posteriormente se extraen muestras rectangulares de los cilindros, con las cuales se realizó la microscopia electrónica de barrido SEM con la cual se observó la porosidad generada en el concreto, las principales zonas

De igual manera, la mezcla deberá cumplir con un asentamiento promedio entre 3,5cm y 5 cm, una consistencia semi-seca y un grado de trabajabilidad pequeño.

El diseño de mezcla realizado busca generar un concreto con dosificación de escoria de ferroníquel del 5% como agregado fino, de la misma forma, se espera obtener un concreto con una resistencia a la compresión de 3000 PSI es decir 21Mpa.

Se tiene una relación agua/cemento de 0,58 obtenido del contenido de agua en concreto sin aire incluido de 200 kg/m³ según el TMN (tamaño máximo nominal) del agregado determinado.

Las cantidades de material de mezcla implementado se encuentra especificado en (Tabla 2).

	AGUA	CEMENTO	AG. FINO	AG. GRUESO	Σ
Masa material (kg/m³)	200	345	621,34	932,02	2098,36
Vol. Abs. Materiales (dm³/m³)	200	109,52	287,66	401,73	998,91
Proporciones en masa seca	0,57	1	1,80	2,70	

Tabla 2 Cantidades de material Fuente: [10]

Se realizó un total de 36 muestras cilíndricas que corresponden a: 18 cilindros convencionales, 9 cilindros con una dosificación del 5% de escoria de ferroníquel el cual reemplaza la arena en este porcentaje y 9 cilindros con una dosificación del 10% de escoria de ferroníquel reemplazando en esta proporción a la arena.

En este caso, se realizó el análisis específico de las muestras cilíndricas con dosificación del 5% de escoria de ferroníquel.



Figure 2 Muestras realizadas de concreto Fuente: Autor

2.3 Materiales

Cemento Portland tipo 1

El cemento, aglomerante hidráulico (aglomerante: cuerpo que sirve para reunir varios elementos en una masa compacta), es un material inorgánico, no metálico, compuesto de cal, alúmina, fierro y sílice, finamente

molido. Mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece, manteniendo su resistencia y estabilidad incluso dentro del agua. Las sustancias componentes del cemento reaccionan con el agua de la mezcla, formando silicatos de calcio hidratados. [12]

Agregados arena – grava

Los agregados son materiales granulares inertes, de tamaño comprendido entre 0 y 100 mm, de naturaleza inorgánica y de procedencia natural o artificial que contribuyen a la estabilidad de volumen, resistencias y economía de los morteros y hormigones. [11] Se implementó arena y grava lavada, proveniente de canteras de la provincia centro de Boyacá.

Escoria de ferroníquel

La escoria de ferroníquel es un desecho y/o residuo industrial impuro, conformado por serpentina, magnetita y goethita de hierro, magnesio, silicio, aluminio y magnesio, que aparece en el proceso de producción de la combinación de hierro y níquel y que al fundirse como metal desecha una escoria granulada.

La escoria es un subproducto residual de mineral fundido para purificar metales. A altas temperaturas, las impurezas del mineral se separan del metal fundido y se remueve para formar una mezcla inerte de óxidos de metal. Las propiedades químicas y físicas de la escoria dependen de la mineralogía ultramáfica de mineral alimentado y del proceso de fundición. [13]



Figure 3 Escoria de ferroníquel Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Microestructura-del-NSC-Concreto-de-Resistencia-normal-Fuente-High-Performance_fig1_309398676

2.4 Caracterización

La caracterización de las muestras extraídas de concreto, se realizó en la Universidad UPTC de la ciudad de Tunja,

en el Instituto para la Investigación y la Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Las muestras extraídas de cada uno de los cilindros de concreto fueron sometidas a un proceso de recubrimiento por bombeo rotatorio esto con el fin de evitar la acumulación de cargas eléctricas ya que genera alteraciones en la trayectoria de los electrones y por lo cual genera imágenes distorsionadas y de baja resolución cuando se realiza la SEM.

Ya con las muestras recubiertas, se realizó la SEM en el área de laboratorios de caracterización de materiales, dando como resultado imágenes con alto grado de detalle de las muestras cilíndricas de concreto.

Por medio de la SEM se determinó la morfología y porosidad en las muestras analizadas, las cuales contaban con dosificación del 5% de escoria de ferroníquel (FeNi) en forma de agregado fino y concreto convencional con agregados de la región.

Se parte del principio que la escoria de ferroníquel (FeNi) tiene principalmente una composición como material vítreo el cual se compone por silicatos del grupo de los olivinos (forsterita).

De igual manera, la SEM permite observar la morfología del agregado y su comportamiento e interacción con la pasta cementante. También, una detallada imagen de la porosidad y del agrietamiento que se genera en el mismo después de ser sometido a carga vertical.

Equipo de análisis SEM



Figure 4 Equipo para realizar SEM Fuente: <https://3.imimg.com/data3/EW/UM/MY.4844569/scanning-electron-microscope-sem-500x500.jpg>

Equipo de compresión siempre



Figure 5 Maquina universal de ensayos Fuente: http://www.proetisa.com/fotos/productos/1f_848c.jpg

2.5 Especímenes mineralógicos de la escoria

Por medio del análisis de difracción de rayos x, se identificaron los principales especímenes mineralógicos que componen la escoria de ferroníquel los cuales se muestran en el grafico 1.

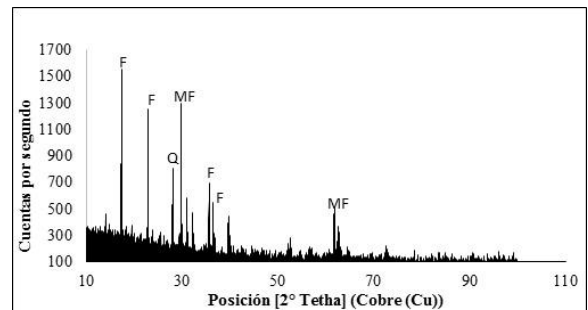


Grafico 1 Difractograma de rayos x aplicado a la escoria de ferroníquel: F: Forsterita, Q: cuarzo, MF: Magnesio ferrita. [14]

El difractograma de rayos X revela F: Forsterita (Mg_2SiO_4), Q: cuarzo (SiO_2), MF: Magnesio ferrita ($Mg(Fe^{3+})_2O_4$). [14] La muestra en su mayoría está compuesta por algunas series mineralógicas de silicatos y óxidos, lo cual puede ser a causa del tipo de enfriamiento, de carácter lento, al cual está expuesta la escoria de ferroníquel.

3. Análisis de resultados

El proyecto tiene como objetivo generar dos tipos de resultados, el primero generado a partir del ensayo a la compresión simple aplicado a las muestras de cilindros de concreto convencional y concreto con dosificación del

5% de escoria de ferroníquel. En este se evaluó y analizó la capacidad de los dos concretos para resistir cargas verticales de compresión. Por otra parte, el segundo busca analizar visualmente los resultados obtenidos a partir de la microscopia electrónica de barrido, por medio de las imágenes que esta suministra. Este resultado se destaca sobre el primero, ya que por medio de las imágenes se puede determinar visualmente la porosidad generada en el concreto realizado y la presencia de fisuras en la muestra a causa del ensayo de compresión simple.

3.1 Resultados laboratorio

Realizadas las muestras cilíndricas de concreto tanto convencional y con la dosificación del 5% de agregado fino por escoria de ferroníquel, se realizaron ensayos a la compresión simple de estos cilindros, los cuales se realizaron en tres etapas: la primera es realizada a los 7 días posteriores a la elaboración de los concretos, la segunda etapa es realizada a los 14 días posteriores y por último la tercera etapa es realizada a los 28 días posteriores a la elaboración de los concretos, estas tres etapas constan de 3 muestras cilíndricas de concreto convencional y 3 muestras cilíndricas de concreto con sustitución del 5% de agregado fino por escoria de ferroníquel. Los concreto fueron realizados con el propósito de alcanzar un F'c (resistencia a la compresión del concreto) de 21Mpa o 3000 PSI.

Los resultados obtenidos en las tres etapas anteriormente señaladas, fueron analizados, tabulados y posteriormente promediados con el fin de generar una sola tabla de resultados y una gráfica que la describa.

Tabla de resultados del ensayo a la compresión simple en tres edades dispuestas:

EDAD DEL CILINDRO (días)	PROMEDIO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (PSI)
CONCRETO CONVENCIONAL	
7	2423,8071
14	2852,3781
28	3166,6635
CONCRETO DOSIFICACION 5%	
7	2238,093
14	2380,95
28	2899,9971

Tabla 3 Comparación de resultados de resistencia a la compresión Fuente: Autor

Grafica general de resultado ensayo a la compresión simple:

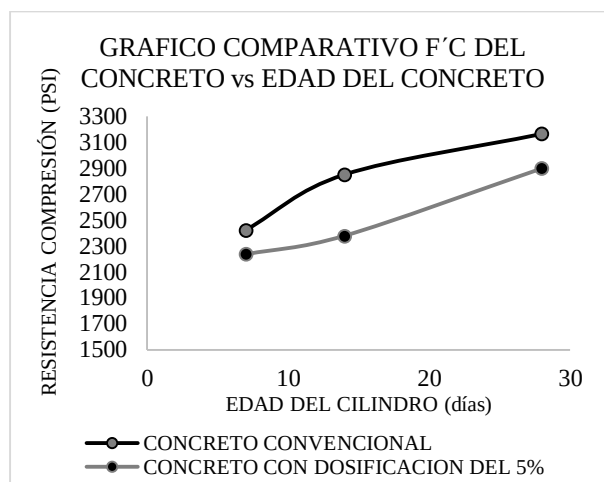


Gráfico 2 Comparación ensayo de compresión simple del concreto convencional y el concreto dosificado Fuente: Autor

Los resultados tabulados en la tabla 3 y representados en la gráfica 2, hacen una comparación de la resistencia a la compresión de concreto convencional y concreto con dosificación del 5% de escoria de ferroníquel en muestras con edades de 7,14 y 28 días. Dichos resultados muestran un aumentan de manera gradual en la resistencia y presentan características similares a una mezcla de concreto convencional. Con respecto a la resistencia, alcanzó valores esperados de 21 Mpa o 3000 PSI con una edad de 28 días, por lo cual se sugiere que sea utilizado en elementos estructurales que requieran un concreto simple, debido a que alcanza la resistencia mínima según el diseño de mezcla planteado.

3.2 Resultado comparativo

Por medio de la realización de la microscopia electrónica de barrido (SEM), se obtuvieron imágenes detalladas de la interacción del agregado con la pasta cementante la cual genera porosidad y fallas en el concreto, de igual forma se observó la morfología del agregado tanto en concreto convencional, como en concreto con dosificación del 5% de escoria de ferroníquel. Las imágenes tienen un grado de detalle que varía de los 4µm a los 20µm.

Partiendo de esto, en las siguientes imágenes (figura 6 a la figura 17) se observa dos tipos de muestra, la primera de un concreto con agregado convencional de canteras

de la región, y el segundo de un concreto con una dosificación del 5% de escoria de ferroníquel.

Muestras de concreto con 7 días de edad

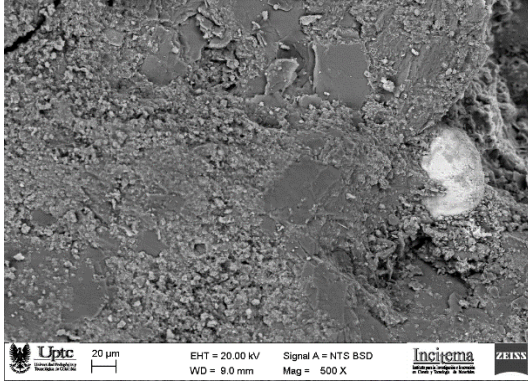


Figure 6 Concreto convencional a los 7 días

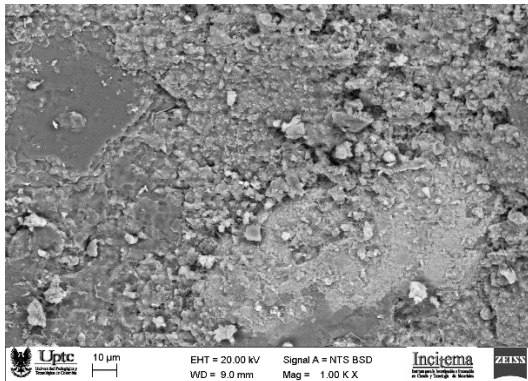


Figure 7 Concreto convencional a los 7 días

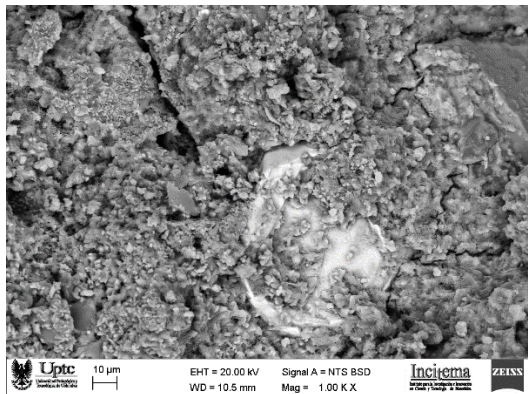


Figure 8 Concreto con dosificación del 5% a los 7 días

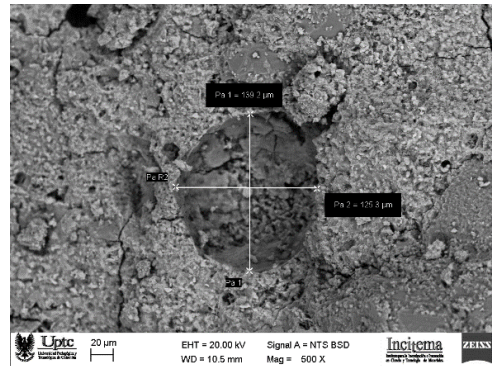


Figure 9 Concreto con dosificación del 5% a los 7 días

Las figuras 6 y 7 corresponden a muestras convencionales las cuales fueron sometidas al ensayo de compresión simple a los 7 días. Estas muestras permiten observar la homogeneidad de la pasta cementante y su buena interacción con respecto al agregado convencional utilizado, si bien, se denota un agregado no muy rugoso en su superficie.

Por otra parte, En las figuras 8 y 9 las cuales corresponden a una muestra con dosificación y de igual forma sometida al ensayo de compresión simple a los 7 días, presenta un grado de fracturación considerado en su pasta cementante y en algunos sectores alrededor del agregado. Por otra parte, se denota una relación cemento agregado correcta debido a la rugosidad observada en la escoria. También se observa la presencia de un material esférico Zr L (Zirconio) el cual por su condición y composición química no se compacta de forma adecuada con el componente cementante generando desprendimiento de este. El zirconio identificado se debe a la presencia de este en el territorio cundiboyacense y por ende en algunas canteras del departamento. Por lo cual, se explica el contenido de zirconio en la composición química de las arenas principalmente. [15]

Muestras de concreto con 14 días de edad

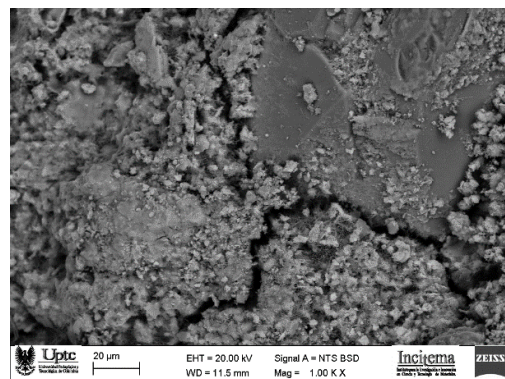


Figure 10 Concreto convencional a los 14 días

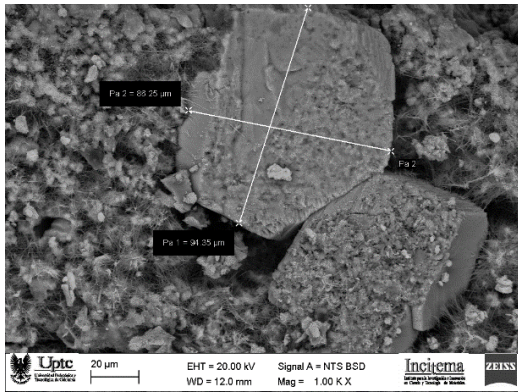


Figure 11 Concreto con dosificación del 5% a los 14 días

La figura 10 corresponde a una muestra convencional la cual fue sometida al ensayo de compresión simple a los 14 días. Se puede evidenciar un incremento significativo de fisuras, tanto en la pasta cementante, como alrededor del agregado convencional. De esta manera, la generación de estas fisuras en el espacio de interacción agregado cemento, por ende, la disminución de capacidad de soportar cargas del mismo. Esto sugiere que se debe a la deshidratación del concreto.

En la figura 11 la cual corresponde a una muestra con dosificación y de igual forma sometida al ensayo de compresión simple a los 14 días. Se observa poca cantidad de fisuras en la pasta cementante, pero un desprendimiento casi total del agregado, de esta manera, se puede inferir poca interacción entre el agregado y la pasta cementante. Cabe decir que, aunque no se denotan grandes fisuras, si se observa falta de homogeneidad en el concreto por la presencia de escoria como agregado fino.

Muestras de concreto con 28 días de edad

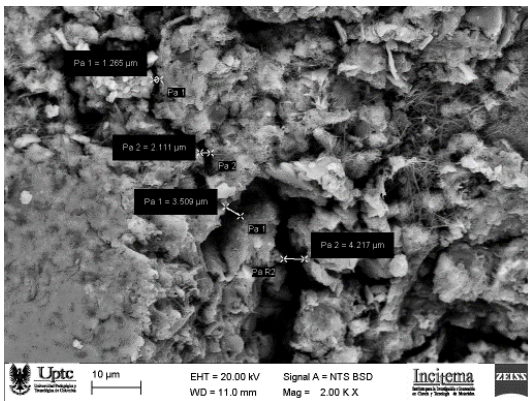


Figura 14 Concreto convencional a los 28 días

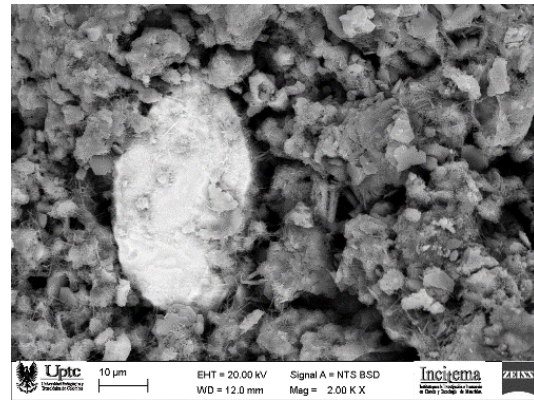


Figure 15 Concreto convencional a los 28 días

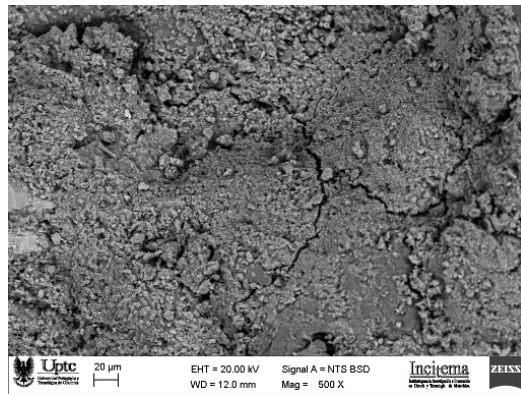


Figure 16 Concreto con dosificación del 5% a los 28 días

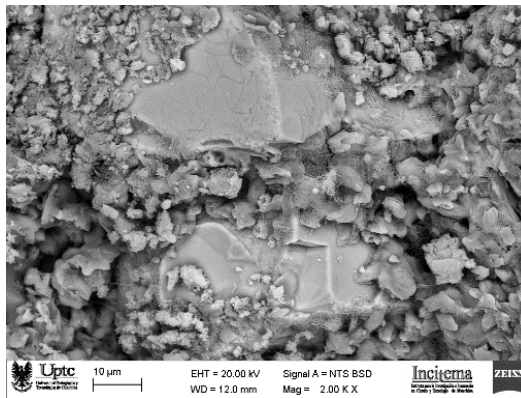


Figure 17 Concreto con dosificación del 5% a los 28 días

Las figuras 14 y 15 corresponde a una muestra convencional la cual fue sometida al ensayo de compresión simple a los 28 días, donde se espera alcance su mayor resistencia. Se puede observar fisuramiento en la pasta cementante, las fisuras están entre los 1,265µm y los 4,217µm. Estas fisuras no solo se presentan en la pasta cementante sino alrededor del agregado, en una zona de interacción agregado – pasta cementante, lo que

se sugiere que puede ser por deshidratación del concreto. Se observa nuevamente la presencia de un componente esférico denotado como Zr L (circonio).

Las figuras 16 y 17 corresponden a una muestra con dosificación del 5% y de igual forma sometida al ensayo de compresión simple a los 28 días, donde se espera que alcancen su mayor resistencia. Se observa la generación de fisuras principalmente en la pasta cementante, aunque también se generan alrededor del agregado. De igual manera, se evidencia una interacción alta entre la pasta cementante y el agregado, lo cual generaría un aumento en la capacidad de carga de este concreto.

4. Discusión de los resultados

El agotamiento y sobre explotación de materiales pétreos implementados en procesos constructivos han generado nuevos estudios enfocados en la búsqueda de materiales a base de productos de desecho, reciclaje, entre otro.

Partiendo de lo anterior, la escoria de ferroníquel como materia de desecho, con componente químico rico en Sílice (SiO_2) y Magnesia (MgO) y en busca de un aprovechamiento, se implementó en dosificación del 5% en forma de agregado fino al concreto simple.

Los resultados a nivel de resistencia del material mostraron un comportamiento ascendente, incluso llegando a la resistencia de diseño de 21 Mpa. Lo cual para un concreto simple es adecuado, ya que este permite incluso resistencias más bajas a las diseñadas en la mezcla. Por lo cual, el material puede tener variedad de usos que requieran un concreto de estas características de resistencia.

Por otra parte, los resultados obtenidos a partir de la microscopia electrónica de barrido SEM, mostraron generación de fisuras internas en el concreto, presencia de materiales como el Zr L (circonio) generalmente no presentes en las mezclas de concreto ni en la composición química de la escoria y pasta cementante poco compacta alrededor del agregado.

De lo anterior, se concluye que la presencia de fisuras en el concreto se debe a un manejo no adecuado en el curado del concreto, lo cual generó una deshidratación de este y por ende la presencia de fisuras tanto en la pasta cementante como alrededor del agregado.

En el caso de la presencia de compuestos como el Zr L, se debe a la contaminación o presencia no conocida del compuesto en el agregado fino implementado en la elaboración del concreto.

La no compactación entre la pasta cementante y el agregado se debe a la falta de rugosidad que puede generarse en la superficie del agregado lo cual no permite que se genere una mezcla homogénea alrededor de este y por el contrario se genera separación y/o desprendimiento del agregado.

Por último, se recomienda para nuevas investigaciones, conocer más a fondo el lugar de procedencia del agregado a implementar y su composición mineralógica.

De igual manera, ser cuidadoso en cada uno de los procesos de elaboración y posterior manipulación de las muestras de concreto, esto con el fin de evitar alteraciones externas que generen variaciones o cambios en el concreto. Y finalmente, se debe llevar a cabo un correcto proceso de curado del concreto lo cual evite el incremento de fisuras internas en el concreto, lo cual nos genera un material que cumpla la resistencia planificada.

5. Conclusiones

Se identificó la necesidad de dar un uso y/o aprovechamiento a la escoria de ferroníquel siendo este material de desecho. Buscando implementarla en materiales de construcción como el concreto simple.

La escoria de ferroníquel fue caracterizada dando como resultado la presencia de componentes ricos en silicio y oxígeno (silicatos) y de magnesio y oxígeno (magnesia). De igual forma, por medio de la difracción de rayos X se identificaron especies mineralógicas presentes en la escoria como óxidos y silicatos.

Se pudo establecer que el concreto simple con dosificación del 5% de escoria de ferroníquel, puede ser implementado, ya que alcanza a la resistencia esperada.

Se puede dar un valor agregado a la escoria de ferroníquel generando ingresos a la industria que la produce, esto adicionándola en materiales de construcción, ya sean morteros, concretos ciclópeos, entre otros.

6. Referencias Bibliográficas

- [1] E. H. L. Pulido, Á. H. F. Pinilla, and S. C. D. Bello, "Caracterización física y química de escorias de ferroníquel obtenidas a partir de minerales lateríticos de bajo tenor y sus posibles usos industriales Physical and chemical characterization of ferronickel slags obtained," no. April, 2019.

- [2] G. L. Golewski, "Evaluation of morphology and size of cracks of the Interfacial Transition Zone (ITZ) in concrete containing fly ash (FA)," *J. Hazard. Mater.*, vol. 357, pp. 298–304, 2018.
- [3] P. Vargas, O. Restrepo-Baena, and J. I. Tobón, "Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 381–389, 2017.
- [4] C. M.- Echevarría et al., "Caracterización de rocas arcillosas sello por microscopía electrónica de barrido y microanálisis de rayos x," *Rev. CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 46, pp. 9–15, 2015.
- [5] E. Sicat, F. Gong, T. Ueda, and D. Zhang, "Experimental investigation of the deformational behavior of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete during freezing and thawing cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 122–131, 2014.
- [6] J. A. Rossignolo, M. S. Rodrigues, M. Frias, S. F. Santos, and H. S. Junior, "Improved interfacial transition zone between aggregate-cementitious matrix by addition sugarcane industrial ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 80, pp. 157–167, 2017.
- [7] V. Nežerka, P. Bílý, V. Hrbek, and J. Fládr, "Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 103, no. May, pp. 252–262, 2019.
- [8] M. Königsberger, M. Hlobil, B. Delsaute, S. Staquet, C. Hellmich, and B. Pichler, "Hydrate failure in ITZ governs concrete strength: A micro-to-macro validated engineering mechanics model," *Cem. Concr. Res.*, vol. 103, no. October, pp. 77–94, 2018.
- [9] W. Zhang, S. Wang, P. Zhao, L. Lu, and X. Cheng, "Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 601–607, 2019.
- [10] "COMPORTAMIENTO DE LA ADICIÓN DE ESCORIA DE FERRONÍQUEL formato uis."
- [11] J. Antonio, P. Madrazo, S. Diego, C. Carlos, and T. García, "Lección 10a. Morteros y hormigones Materiales de Construcción DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES Este tema se publica bajo Licencia: CreaCve Commons BY---NC---ND 4.0."
- [12] S. J. Navarro, "Procesos para la Elaboración de Cemento," pp. 1–49, 2008.
- [13] "Escoria de Ferroníquel."
- [14] 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.
- [15] S. Manosalva et al., "Zonas Potenciales Para Diatomitas En Un Sector Del Altiplano Cundiboyacense," p. 134, 2010.