

# USO DE MATERIAL RECICLADO DE LA INDUSTRIA DEL COBRE EN LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO

Carlos Andrés Aparicio López<sup>1</sup>. Pontificia Universidad Javeriana de Cali.  
Recibido septiembre 6 de 2014 – Aceptado septiembre 17 de 2014  
<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v8n2.a01>

## I. INTRODUCCIÓN

**Resumen**— Se realizó un estudio para evaluar la posibilidad de implementar escoria de cobre en la fabricación de concretos. Para esto se realizó una caracterización de los agregados y de la escoria de cobre. Se combinaron escoria de cobre y agregados convencionales con el objetivo de encontrar las proporciones de agregados, que generaran menor cantidad de vacíos. Con estas proporciones se realizó un diseño de mezclas de concreto, con las cuales se fabricó una cantidad determinada de cilindros de concreto, a los cuales se les realizó pruebas de resistencia a la compresión y velocidad de pulso. Los concretos fabricados obtuvieron las resistencias esperadas, y se demostró que la escoria de cobre puede reemplazar al agregado fino convencional en un 20%. También se generaron ecuaciones a partir de los datos experimentales, donde se pudo relacionar velocidad de pulso, módulo de elasticidad y resistencia a la compresión.

**Palabras claves**— Escoria de cobre, agregados para concreto, cantidad de vacíos, velocidad de pulso a través del concreto, resistencia a la compresión.

**Abstract**— A study was conducted to evaluate the possibility of implementing copper slag in the manufacture of concrete. For this characterization of the aggregates and copper slag was performed. Conventional copper slag aggregates were combined in order to find the proportion of aggregates, which generate fewer gaps. With these proportions design concrete mixtures with which a given amount of concrete cylinders, to which I will be testing performed compressive strength and pulse velocity was made was made. The obtained manufactured expected specific resistance, and demonstrated that copper slag can replace conventional fine aggregate 20%. Equations are also generated from experimental data, where speed may relate pulse, modulus and compressive strength.

**Key words**— Copper slag, concrete aggregates, void ratio, Pulse velocity through concrete, compressive strength.

<sup>1</sup> Carlos Andrés Aparicio López. Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. E-mail: [capariciol@javerianacali.edu.co](mailto:capariciol@javerianacali.edu.co)

Históricamente la producción de cobre en Colombia ha sido muy baja, en comparación con países como Chile y Perú, los cuales durante el año 2011 fueron los principales productores de cobre en todo el mundo. Para ese mismo año, Colombia alcanzó una producción de 4.041 toneladas de cobre en las diferentes minas. Sin embargo, en los últimos años en Colombia se han desarrollado grandes proyectos de exploración, gracias a los cuales se han inscrito importantes proyectos mineros en departamentos como el Chocó, Antioquia y Nariño [1]. El proceso de refinación de cobre para la fabricación de productos, deja anualmente alrededor de 24.6 millones de toneladas de escoria en todo el mundo. Según estudios, para producir una tonelada de cobre, se generan alrededor de 2,2 toneladas de escoria de cobre [2].

Este trabajo fue desarrollado buscando relacionar problemáticas como la necesidad de infraestructura sostenible, la escasez de fuentes de agregados naturales y la evidente contaminación por residuos sólidos. Debido a esto, el presente trabajo contiene una propuesta respaldada a partir de pruebas de laboratorio, en donde los desechos sólidos de la industria de la producción de cobre, puedan ser implementados como agregado fino no convencional, y que al interactuar con los agregados convencionales se pueda conformar un material compuesto y alternativo, con características mecánicas deseadas que permita ser implementado en la fabricación de concreto, con un buen desempeño en cuanto a resistencia a la compresión.

La metodología está fundamentada en que menos vacíos en una combinación de agregados, repercuten en una mezcla de concreto más resistente [3]. Según esto, la escoria de cobre podría desempeñarse como material de llenante, pudiendo dar una mejor adherencia entre la pasta y el agregado grueso. Se produjeron diferentes mezclas de concreto compuestas por diferentes combinaciones de agregados gruesos, finos y la escoria de cobre. Se construyeron cilindros de concreto con las mezclas diseñadas, para hacer pruebas de resistencia y velocidad de pulso. Con esto se logró discutir las conclusiones más importantes, y realizar algunas

recomendaciones sobre el desarrollo de nuevos estudios, sustentadas a partir de la experiencia adquirida durante la fase experimental de este estudio.

## II. METODOLOGÍA

La metodología para el diseño de las mezclas de concreto que se utilizó en esta investigación, se basa exclusivamente en utilizar agua, cemento y una mezcla de agregados que al combinarlos obtengan la menor cantidad de vacíos, dado que los agregados en una mezcla de concreto ocupan alrededor de tres cuartas partes de la mezcla, estos representan la parte más importante de la mezcla y se debe tener mucho cuidado en su caracterización y proporción para obtener una mezcla de concreto eficiente.

### A. Caracterización de Agregados

La escoria de cobre utilizada en esta investigación para el análisis y la fabricación de las mezclas de concreto, es un sub-producto generado en la refinación del cobre de la empresa Cobres de Colombia S.A.S, ubicada en el sector industrial de Acopi Yumbo; Valle del Cauca.

El agregado natural utilizado en este estudio, corresponde a un material de cantera de roca triturada, localizada en la vereda “Campo Alegre” al noroccidente de la ciudad de Santiago de Cali. La cantera es explotada por la organización Triturados el Chocho &

Cía. Ltda.; esta organización cuenta con los permisos necesarios para realizar dichas actividades de explotación y comercialización, y es una de las empresas más reconocidas en la ciudad por la calidad de sus agregados pues el material proviene de una roca de diabasa o basalto.

Se realizaron pruebas de laboratorio para conocer las densidades, absorción, granulometría, desgaste y contenido de materia orgánica. Siguiendo las normas y procedimientos vigentes, para estos ensayos de laboratorio. Luego de la fase de caracterización de los agregados realizada en este estudio, se pudo destacar que la escoria de cobre resulto ser más pesada, en comparación al agregado convencional. Como también que es un material más fino, más absorbente lo que significa que los concretos que implementen escoria de cobre como agregado fino, necesitarán una mayor cantidad de agua.

La granulometría de los agregados convencionales no entraron en los límites recomendados por la norma NTC-174, pero en los demás parámetros se obtuvieron valores típicos de agregados que serán usados en la fabricación de concreto [4].

La TABLA I presenta un resumen de la información obtenida luego de la fase caracterización de los agregados, donde se incluye además los parámetros y especificaciones requeridos para ser usados en concreto hidráulico.

TABLA I  
RESUMEN DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS NATURALES

Caracterización del Material	Agregado Grueso	Agregado Fino	Escoria de Cobre	Especificaciones requeridas para concreto hidráulico
Tamaño Máximo Nominal [mm]	19.05	9.5	4.75	9.5 a 37.5
Módulo de Finura	N/A	3.43	3.57	2.3 a 3.1
Contenido de Materia Orgánica	N/A	1	-	< Nivel 3
Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	2900.69	2968.05	3426.69	2400 a 2900
Gravedad Especifica	2.91	2.98	3.44	2.9 a 2.3
% Absorción	1.2%	1.79%	2.44%	0.2% a 2%, fino 0.2% a 4%. grueso
Resistencia a la abrasión	12.7%	N/A	N/A	<50%

### B. Diseño de Mezclas de Concreto

Se adoptó parcialmente el diseño de mezclas de concreto recomendado por el American Concrete Institute (ACI), en 4 puntos básicos [5]:

- Selección de la resistencia de diseño.
- Selección del asentamiento
- Relación de agua-cemento
- Contenido de agua y Cemento.

Posteriormente se calculó el contenido de agregados, sustrayendo la cantidad de cemento y agua de un volumen unitario de concreto.

### C. Resistencia de Diseño

De acuerdo a las recomendaciones del ACI se seleccionó una resistencia de diseño de 28MPa, que corresponde a concretos con un nivel de exposición bajo.

#### D. Asentamiento-(Slump)

Se utilizó un asentamiento típico de 50mm, recomendado por el método del ACI para la construcción de zapatas, columnas, y demás elementos estructurales.

#### E. Relación agua-cemento

Se utilizó una relación agua-cemento inicial de 0.45, recomendada para una resistencia de 28MPa, para mezclas con aire incluido.

#### F. Contenido de agua y cemento.

El método de diseño del ACI, recomienda para un tamaño máximo nominal del agregado de 19 mm, y un asentamiento de la mezcla de 50mm, que la cantidad de agua por cada 1 m<sup>3</sup> de concreto, sea de 190kg de agua. La cantidad de cemento según la relación agua-cemento de 0.45 es de 422.2kg.

#### G. Selección del Agregado Compuesto

Se realizaron combinaciones de agregados convencionales fino y grueso, variando las

proporciones de ambos en 8 diferentes formas, determinando la cantidad de vacíos entre partículas en cada combinación. A estas 8 combinaciones se les llamó mezclas de agregado objetivo (OB), por contener únicamente agregado convencional.

En cada una de las ocho mezclas de agregados se reemplazó un 20% de la masa de agregado fino convencional por escoria de cobre, dando lugar a ocho mezclas denominadas “E-20”. También se reemplazó parcialmente el agregado fino de las mezclas objetivo por un 30% las cuales se llamaron mezclas “E-30”; así mismo también se reemplazó un 40% de material que corresponden a las mezclas “E-40”. Estas combinaciones se muestran en la TABLA II, donde las mezclas sombreadas, son aquellas mezclas que obtuvieron mayores cantidades de vacíos entre partículas.

Para determinar el porcentaje de vacíos de las combinaciones de agregados, este estudio se apoyó en los procedimientos y cálculos presentes en la norma ASTM C-29 [6].

TABLA II  
COMBINACIONES DE AGREGADOS.

Mezcla	Agregado	Mezclas según el porcentaje de Agregado [%]							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Objetivo	Fino	20	30	40	50	60	70	80	90
	Escoria	0	0	0	0	0	0	0	0
	Grueso	80	70	60	50	40	30	20	10
E20	Fino	0	10	20	30	40	50	60	70
	Escoria	20	20	20	20	20	20	20	20
	Grueso	80	70	60	50	40	30	20	10
E30	Fino		0	10	20	30	40	50	60
	Escoria		30	30	30	30	30	30	30
	Grueso		70	60	50	40	30	20	10
E40	Fino			0	10	20	30	40	50
	Escoria			40	40	40	40	40	40
	Grueso			60	50	40	30	20	10

En la Fig. 1., se presentan los resultados obtenidos al realizar la combinación de agregados. Los menores porcentajes de vacíos para todas las combinaciones de agregados, se presentan en las combinaciones de agregados 4, 5, y 6. Las combinaciones realizadas sólo con agregados naturales (mezclas Objetivo) obtuvieron mayores porcentajes de vacíos, en comparación con las demás combinaciones de agregados que contenían escoria de cobre. Esto, debido a que la escoria de cobre al ser un material más fino, rellenaba mejor los espacios entre las partículas más grandes.

En la Fig. 1. también se puede observar que las combinaciones N° 5 para todas las mezclas con escoria

(E20, E30 y E40), obtuvieron la menor cantidad de vacíos en cada mezcla. Sin embargo, la combinación de agregados naturales OB-6, obtuvo la menor cantidad de vacíos que las demás mezclas con agregados convencionales. Según esto, se espera que la mayor resistencia a la compresión en mezclas de concreto sin escoria de cobre, sea la combinación OB-6, así mismo, se espera que las mezclas E20-5, E30-5 y E40-5, obtengan los resultados de compresión más sobresalientes de las demás mezclas de concreto con escoria. De esta manera, este estudio consideró pertinente avanzar con el análisis de las 3 combinaciones de agregados (4, 5 y 6), por asegurar menores cantidades de vacíos entre partículas de agregados.

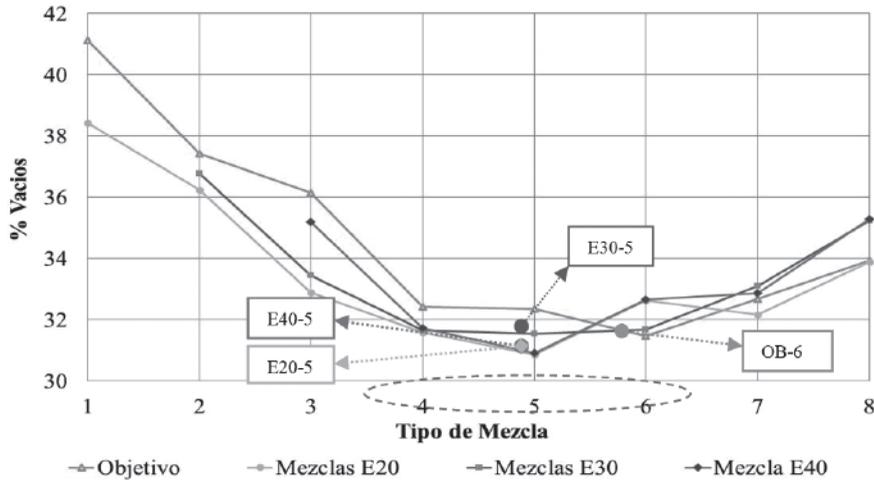


Fig. 1. Cantidad de vacíos en las mezclas.

En este orden de ideas, se realizaron 12 diferentes mezclas de concreto; la TABLA III presenta las combinaciones de agregados usadas para la elaboración de las mezclas de concreto.

 TABLA III  
 COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Mezclas según la proporción de agregados [%]				
Mezcla	Agregado	4	5	6
Objetivo	Fino	50	60	70
	Escoria	0	0	0
	Grueso	50	40	30
E20	Fino	30	40	50
	Escoria	20	20	20
	Grueso	50	40	30
E30	Fino	20	30	40
	Escoria	30	30	30
	Grueso	50	40	30
E40	Fino	10	20	30
	Escoria	40	40	40
	Grueso	50	40	30

Se fabricaron los cilindros de concreto siguiendo los procedimientos descritos en la norma NTC-1377 [7]. Se utilizaron moldes de 100x200mm debido puesto que se permite que el diámetro del molde sea de por lo menos 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado.

Se fabricaron 12 cilindros para cada una de las mezclas de concreto, los cuales se utilizaron para estimar la resistencia a la compresión y velocidad de pulso a los 7, 14 y 28 días de fraguado, lo que quiere decir que en total se fabricó un total de 144 cilindros de concreto.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El factor más importante en el desarrollo de este estudio, es la resistencia a la compresión de los concretos fabricados. Pues desde este punto de vista se puede justificar preliminarmente si la escoria de cobre puede ser realmente implementada en la elaboración de mezclas de concreto como agregado fino no convencional. La Fig. 2, presenta los resultados obtenidos de resistencia a la compresión a diferentes edades, de las diferentes mezclas de concreto fabricadas. Se presentan las mezclas realizadas con agregado convencional, seguido de los diferentes reemplazos parciales de escoria de Cobre.

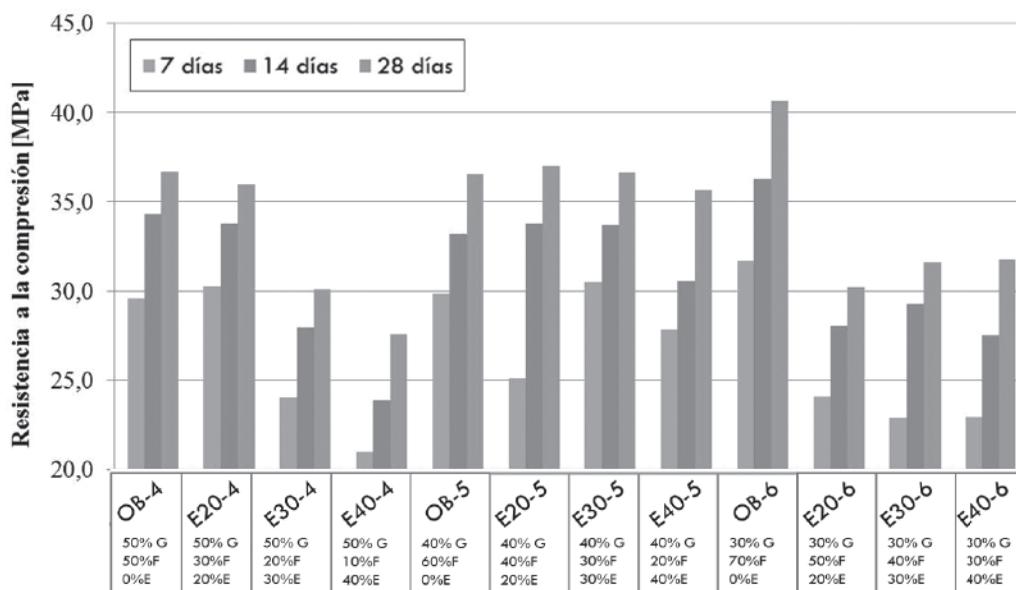


Fig. 2 Resistencia a la compresión de los concretos fabricados

La información presentada en la Fig. 2, expresa claramente la tendencia en la cual a medida en que se aumenta la proporción de escoria de cobre, la resistencia a la compresión a los 28 días disminuye.

No obstante, se puede observar que para la mezcla objetivo OB-4, el reemplazo de un 20% de agregado fino convencional por escoria de cobre (E20-4), no representa una disminución considerable de la resistencia a la compresión, que resultó ser de un 2% para una edad de 28 días.

En la Fig. 2, también se observa que para la mezcla objetivo OB-5 el reemplazo parcial de agregado fino convencional por escoria de cobre, no afecta la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, pues en el peor de los casos, un reemplazo del 40% en esta mezcla disminuye la resistencia en un 2,7%.

También se observa que la mezcla objetivo OB-6 obtuvo la mayor resistencia a la compresión, en comparación demás mezclas de concreto restantes fabricadas por este estudio.

Los resultados obtenidos fueron consecuentes con la hipótesis de diseño, pues las mezclas que obtuvieron resistencias más altas, fueron fabricadas con las combinaciones de agregados, que obtuvieron menores cantidades de vacíos.

La velocidad de pulso ultrasónico es un ensayo no destructivo que se le hace al concreto endurecido, donde se puede determinar la calidad y la homogeneidad del concreto. La TABLA IV muestra los valores establecidos para catalogar la calidad de los concretos, a los cuales se les realiza la prueba de velocidad de pulso [8].

TABLA IV  
CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO SEGÚN SU VELOCIDAD DE PULSO.

Velocidad de pulso, V (m/s)	Clasificación del concreto
$V > 4\ 575$	Excelente
$4\ 575 > V > 3\ 660$	Bueno
$3\ 660 > V > 3\ 050$	Cuestionable
$3\ 050 > V > 2\ 135$	Pobre
$V < 2\ 135$	Muy pobre

Fuente: Solís, R., et.al. (2004)

La TABLA V presenta un resumen de la información obtenida luego de la fase experimental, para las diferentes mezclas de concreto pasados 28 días de fabricación de los cilindros.

Se puede observar según la clasificación sobre la calidad de los concretos descrita en la TABLA IV, que los concretos fabricados por este estudio lograron una clasificación excelente y buena. Además, para todas las mezclas de concreto, la resistencia a la compresión pasados 28 días, sobrepasó la resistencia de diseño de 28MPa.

TABLA V  
CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO SEGÚN SU  
VELOCIDAD DE PULSO

Mezcla	Velocidad de Pulso [m/s]	Resistencia a la compresión $f'c$ [MPa]
OB-4	4786	36,7
E20-4	4672	35,9
E30-4	4375	30,1
E40-4	4294	27,6
OB-5	4589	36,5
E20-5	4618	37,0
E30-5	4568	36,6
E40-5	4328	35,6
OB-6	4653	40,7
E20-6	4398	30,2
E30-6	4430	31,6
E40-6	4363	31,7

Se realizaron ensayos de velocidad de pulso a todos los cilindros fabricados de las diferentes mezclas de concreto. Los datos obtenidos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso se presentan en la Fig. 3, en la cual se puede observar la relación entre la velocidad de pulso y resistencia a la compresión.

Tanto la resistencia a la compresión como la velocidad de pulso dependen del tipo de agregado, tamaño y gradación, edad del concreto. Las grietas o vacíos que pueden presentar internamente los elementos de concreto, hacen que el pulso se desvíe y demore más tiempo en viajar, y por lo tanto se disminuya la velocidad entre los transductores, esto significa una mala calidad que en condiciones desfavorables de humedad, hielo deshielo, fuego o ataques ácidos reducirán la capacidad estructural de los elementos. Se espera para velocidades altas, el concreto endurecido sea homogéneo y con pocos vacíos, lo que significa el agregado aportara toda su calidad para resistir mayores cargas axiales [9].

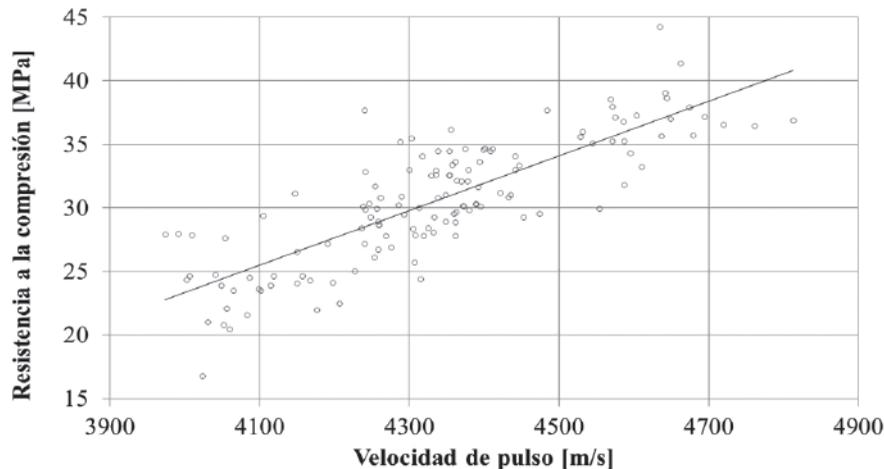


Fig. 3. Velocidad de pulso y resistencia a compresión.

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los agregados convencionales no obtuvieron la granulometría que recomiendan las actuales normas técnicas para la elaboración de mezclas de concreto. Sin embargo, las resistencias a la compresión obtenidas en la fase experimental de este estudio, fueron muy superiores a la resistencia esperada de 28MPa. Por lo tanto se puede concluir que si el material disponible para la fabricación de concreto no cuenta con una granulometría que se ajuste a las actuales normas, se puede obtener buenas resistencias

a la compresión, combinando los agregados en las proporciones correctas que puedan lograr menos cantidad de vacíos entre partículas.

Con base en los resultados de resistencia a la compresión se establece que la escoria de cobre puede ser usada eficazmente para la fabricación de mezclas de concreto, si se utiliza como reemplazo no mayor de un 20% del agregado fino convencional. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las mezclas de concreto diseñadas con mayor cantidad de material fino, aunque muestran menor resistencia, su

reducción fue menor al 25% de la resistencia de máxima obtenida con agregado convencionales (40 MPa). Desde el punto de vista de resistencia a la compresión, este material alternativo podría usarse en la elaboración de andenes, bordillos, mobiliario urbano convencional, y elementos estructurales como columnas, zapatas, vigas.

Este estudio recomienda ampliar diferentes análisis que discutan el efecto que tiene el hollín presente en la escoria de cobre, con la interacción al mezclarse con el cemento y el agua, puesto que las mezclas de concreto que contenían escoria de cobre, necesitaron de una mayor cantidad de agua para obtener un asentamiento cercano a los 50mm. El hollín presente en el material reciclado podría haber sido causa de una pérdida de adherencia entre la pasta y el agregado grueso.

En este estudio, el uso de material recalcado de la industria del cobre para la fabricación de concretos, fue analizado con exitosos resultados de resistencia a la compresión. Sin embargo, es recomendable estudiar otras propiedades del material que garanticen órdenes de discusión y análisis, en temas como la durabilidad, la resistencia a la flexo-tracción, entre otros aspectos para dar realmente bases teóricas y prácticas defendibles, sobre la verdadera implementación de este tipo de material en la fabricación de concreto.

## V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por el apoyo técnico y operativo de los equipos del Laboratorio de Ingeniería Civil. Especial agradecimiento al ingeniero Diego Darío Pérez Ruiz, por su impecable labor como director del trabajo de grado, y a la empresa Cobres de Colombia S.A.S, por suministrar el material necesario para realizar el presente estudio.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Peña, C. Se vuelve a hablar de cobre. En: Mundo Minero [online], Enero 4 de 2013, [citado 15, junio, 2014]. Disponible en: <http://mundominero.com.co/se-vuelve-a-hablar-de-cobre/>
- [2] Nazer, A., Pavez O., Rojas, F., Aguilar C. Una revisión de los usos de las escorias de cobre. En: Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (XI: 2-5, noviembre: Viña del Mar, Chile). Viña del Mar, 2010.
- [3] Perez, D., y Serrano, M. (2011). Use of recycled materials to build paver blocks for low-volume roads in developing

countries. Transportation Research Record, vol:3 fasc: N/A págs: 138 – 146

- [4] Instituto Colombiano de Normalización y Certificación. NTC-174 Concretos, Especificaciones de los agregados para concreto. Bogotá D.C.: El instituto, 2006. 20 p
- [5] Kosmatka, H., Kerkhoff, B., Panarese, W., Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Skokie, Illinois, EE.UU. Portland Cement Association PCA.
- [6] American Society for Testing and Materials, ASTM C 29. Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate. Philadelphia. 1997, 6p. 2 il.
- [7] NTC-1377. Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayos en el Laboratorio. Bogotá D.C.: El instituto, 2010. 15 p.
- [8] Solis, R., Moreno, E., Castillo W (2004) Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Ingeniería Revista Académica, 8, 41-52. Universidad Autónoma de Yucatán, Mexico. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780204>
- [9] Céspedes Marco. Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonido. Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil. Piura, Perú: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 2003. 112p.

## BIOGRAFÍA



Carlos Andrés Aparicio López. Es Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Joven investigador cuyas áreas de interés son producción limpia, concretos modificados, diseño estructural.