



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Valorización de escoria de cobre como puzolana y agregado fino en morteros**

**Yessica Dayana Diaz Rosero**

Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira

Facultad de Ingeniería y Administración

Maestría en Ingeniería Ambiental

Palmira

2020

# **Valorización de escoria de cobre como puzolana y agregado fino en morteros**

**Ing. Yessica Dayana Diaz Rosero**

Tesis de Maestría presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director:

Ph.D, Luis Octavio González Salcedo

Profesor Asociado

Línea de Investigación:

Aprovechamiento de residuos

Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira

Facultad de Ingeniería y Administración

Palmira, Colombia

2020

*Le dedico esta tesis a mi amigo Jaime que ya no está en cuerpo,  
“La casualidad favorece las mentes preparadas” ...*

# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Yessica Dayana Diaz Rosero

09/09/2020

# Agradecimientos

Agradezco a Dios por susurrarme al oído que eligiera este camino, a mi hija Martina por inspirar el amor y hacerme creer siempre que si puedo. Agradezco a mis padres por el apoyo incondicional y amor infinito, a mi hermano por siempre estar allí para mí sin importar las circunstancias. A mis abuelos por enviarme siempre la mejor energía, a toda mi familia que está siempre pendiente.

Agradezco a mi director de tesis por confiar en mí en cada paso que daba en el proceso y por estar allí siempre que lo necesitaba, no solo como director sino como amigo.

Agradezco a BRONALCO LTDA por permitirme buscar una solución y trabajar de la mano para culminar el estudio, especialmente a Orlando Sepúlveda, Nicole Rubio y Julio Delgado.

Agradezco a Dr. Diego Aponte y a la Dra. Marilda Barra por acogerme y guiarme en mi estancia en la Universitat Politècnica de Catalunya, por el apoyo y estudios realizados en sus laboratorios.

Agradezco a la Red Tecnoparque Sena Nodo Cali, por brindarme asesoría y uso de sus laboratorios, especialmente a mi gestor Augusto Arce. De Igual manera al SENA Centro de la Construcción Regional Valle por permitir el uso de los laboratorios.

Agradezco a todas las personas que hicieron parte de este proceso, a mis amigas y amigos que estuvieron dándome una voz de aliento.

## Resumen

### Valorización de escoria de cobre como puzolana y agregado fino en morteros

Las altas producciones de residuos sólidos generan la necesidad de la búsqueda de nuevas alternativas de aprovechamiento o disposición, con esto se da la necesidad de implementar nuevos materiales en la industria de la construcción, una de las más demandantes de materiales que en su producción generan altas cantidades de CO<sub>2</sub>. En la presente investigación se estudia la posibilidad de valorización de una escoria de cobre secundaria (EC) generada en BRONALCO LTDA como material puzolánico, escoria de cobre fina (ECF) en la producción de cementos y como material agregado fino, escoria de cobre gruesa (ECG) en la elaboración de morteros. Se evalúa la actividad puzolánica de la ECF utilizando el método establecido en la norma ASTM C 311 por medio del índice (IAR). La ECG se evaluó en sustituciones parciales por la arena en morteros de (12,5% - 18,75% - 25% -31,25%, 37,5%- 43,75% -50%). Se encontró que la ECF cumple con las condiciones de resistencia con un IAR de 67,37% a 7 días y 78,56% a 28 días, los morteros reemplazados con ECG en un 43% presentan los mejores resultados con respecto al patrón, incrementando hasta un 15 % en resistencia a compresión. En la evaluación ambiental por medio de la norma EPA 1311 se estudiaron los lixiviados por metales pesados Pb, Cu y Fe en la EC y morteros A37 y A43, encontrando que la EC tiene niveles elevados de lixiviados de Pb: 826 mg/L y Cu: 55,958 mg/L, sobrepasando los límites de la norma Pb: 5 mg/L, sin embargo, los morteros A37 y A43 se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma A37(Pb): 0,132 mg/L y A43(Pb):0,03. De acuerdo a la evaluación de sulfuros, cloruros y sulfatos de los lixiviados por medio de Norma Europea EN 12457 se tiene como resultado que las muestras de ECG, MP y MA 43 clasifican como material inerte, mientras las muestras ECF, CTO, y MPU clasifican como material no peligroso conforme a los límites de la normatividad utilizada. De acuerdo a los resultados obtenidos el material en estudio tiene potencial para ser utilizado como material puzolánico y agregado fino en mezclas de mortero sin presentar dificultades por la posible contaminación de lixiviados.

**Palabras claves:** Agregado fino, aprovechamiento, escoria de cobre, estabilización, puzolana, lixiviados, residuos peligrosos.

## Abstract

### Valorization of copper slag as pozzolan and fine aggregate in mortars

High productions of solid waste create the need of searching new alternatives of use or disposal. As a result, there is a need to implement new materials in construction, one of the most material demanding industries generating high amounts of CO<sub>2</sub>. This research explores the possibility of valorization of: 1) a secondary copper slag (EC) generated in BRONALCO LTDA as pozzolanic material, 2) fine copper slag (ECF) in the production of cements and as fine aggregate material, and 3) coarse copper slag (ECG) in the production of mortars. The pozzolanic activity of the ECF is evaluated using the method established in ASTM C 311 by means of the index (IAR). The ECG was evaluated in partial substitutions for the sand in mortars of (12.5% - 18.75% - 25% -31.25%, 37.5% - 43.75% -50%). It was found that the ECF meets the resistance conditions with an IAR of 67.37% at 7 days and 78.56% at 28 days, the mortars replaced with EFG in 43% present the best results with respect to the pattern, increasing up to 15% in compressive strength. In the environmental assessment using EPA 1311 standard, leachates were studied for heavy metals Pb, Cu and Fe in EC and A37 and A43 mortars, finding that EC has high levels of Pb leachates: 826 mg/L and Cu:55,958 mg/L, exceeding the limits of the Pb standard: 5 mg/L, however, mortars A37 and A43 are within the limits established by standard A37(Pb): 0.132 mg/L and A43(Pb):0.03. According to the evaluation of leachate sulphides, chlorides and sulfates through European Standard EN12457 it is resulted in ECG, MP and MA 43 samples classifying as inert material, while ECF, CTO, and MPU samples are classified as non-hazardous material according to the limits of the standard used. According to our results, the material under study has the potential to be used as pozzolanic material and fine aggregate in mortar mixtures without presenting difficulties due to the possible contamination of leachates.

**Key words:** Fine aggregate, recycling, copper slag, stabilization, pozzolan, leachate, hazardous waste.

# Contenido

Resumen .....	i
Índice de figuras .....	v
Índice de tablas.....	vi
Lista de términos y abreviaturas .....	vii
Introducción .....	1
1. Planteamiento del problema .....	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Justificación.....	7
2. Objetivos.....	9
2.1. Objetivo general .....	9
2.2. Objetivos específicos.....	9
3. Marco teórico.....	10
3.1. Marco conceptual .....	10
3.1.1. Cementante.....	10
3.1.3. Pasta.....	12
3.1.4. Mortero.....	12
3.1.5. Agregados o áridos.....	12
□ Agregado fino .....	12
3.1.6. Agua o activante.....	13
3.1.7. Inmovilización-solidificación/estabilización.....	13
3.2. Marco referencial.....	17
3.2.1. Escorias de cobre (EC) .....	17
3.2.2. Alternativas de aprovechamiento de escorias.....	19
3.2.2.1. Escoria de cobre como puzolana .....	20
3.2.2.2. Escoria de cobre como agregado fino .....	21
3.3. Marco contextual.....	23
3.3.1. El cobre: .....	23
3.3.2. Fundición del cobre .....	24

---

3.3.3. Normatividad Ambiental.....	28
4. Marco metodológico .....	35
4.1. Ubicación del proyecto .....	35
4.2. selección y caracterización de los materiales .....	36
4.2.1. Escoria de cobre.....	36
4.2.2. Cemento.....	38
4.2.3. Agregado fino natural .....	38
4.3. Métodos y técnicas analíticas .....	38
4.3.1. Caracterización química .....	38
4.3.2. Caracterización mineralógica.....	39
4.3.3. Caracterización física .....	39
4.3.4. Elaboración de muestras de mortero .....	44
4.3.5. Evaluación Mecánica.....	45
4.3.6. Análisis ambiental de lixiviados .....	47
4.3.6.1. Norma Americana EPA 1311 .....	47
5. Resultados.....	50
5.1. Caracterización.....	50
5.1.1. Composición química .....	50
5.1.2. Mineralogía.....	51
5.1.3. Granulometría y gravedad específica .....	53
5.1.4. Morfología .....	55
5.3. Evaluación mecánica de la ECG como agregado fino .....	57
6. Evaluación ambiental .....	59
6.1. Análisis de lixiviados epa 1311 .....	59
6.2. Ensayos de lixiviación norma en 12457-2.....	60
7. Conclusiones .....	66
8. Difusión del conocimiento .....	67
9. Referencias .....	69

## Índice de figuras

Figura 1-1 Árbol de problemas basado en la metodología de Marco Lógico. Fuente: Elaboración propia, adaptado de (Sanchez, N. 2007). .....	7
Figura 2-3 Conceptos claves inmovilización/solidificación. Fuente: Elaboración propia. ..	15
Figura 3-3 Modelo estructural CSH, (a) Reacciones de adición, (b) reacciones de hidratación. Fuente: copyright (Romero ,L. G y Vargas, M.2009).....	17
Figura 4-3 Escorias de Cobre. Fuente: BRONALCO LTDA.....	19
Figura 5-3 Horno Cubilote de BRONALCO (Plano y Fotografía), Fuente: BRONALCO LTDA. ....	25
Figura 6-3 Proceso Productivo de BRONALCO LTDA. Fuente: BRONALCO LTDA .....	27
Figura 7-3 Producto final, lingotes de cobre. Fuente: BRONALCO LTDA .....	28
Figura 9-3 Listado de residuos termometalurgia del cobre. Fuente: catalogo europeo de residuos. ....	30
Figura 10-4 Ubicación planta BRONALCO LTDA .....	35
Figura 11-4 Metodología general. ....	36
Figura 12-4 Espectrómetro de fluorescencia de rayos X, Laboratorio de Materiales Universidad del Valle. ....	39
Figura 13-4 Equipo utilizado para Granulometría Láser. Universidad del Valle .....	40
Figura 14-4 Serie de Tamices de acuerdo a la norma NTC 77 para finos .....	41
Figura 15-4 Metodología NTC 237 para el cálculo de la densidad y absorción de agregado fino.....	42
Figura 16-4 Microscópio electrónico de barrido SEM.....	43
<b>Figura 17-4</b> Recubridor para el equipo SEM .....	43
Figura 18-4 Mezcla y elaboración de cubos de mortero para ensayos mecánicos y ambientales. ....	46
Figura 19-4 Cubo de mortero ensayado a compresión .....	47
Figura 20-4 Equipo absorción atómica de llama .....	48
Figura 21-4 Equipo giratorio.....	49
Figura 22-4 Cromatógrafo.....	49
Figura 23-5 DRX del CTO. Fuente: Elaboración propia .....	52
Figura 24-5 DRX de la escoria de cobre secundaria fina (ECF). Fuente: Elaboración propia .....	52
Figura 25-5 Distribución de tamaño de partícula (DTP) de la ECF del CTO Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 26-5 Granulometría de la EC y la arena utilizada.....	54
Figura 27-5 Fotografías SEM tomadas a la ECG. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 28-5 Resistencia a compresión de morteros ensayados de acuerdo a la norma ASTM C311. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 29-6 PH de lixiviados de los materiales estudiados. Fuente: Elaboración propia ..	61
Figura 30-6 Conductividad de los materiales estudiados. Fuente: Elaboración propia .....	61
Figura 31-6 Fluoruros que contienen las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia .....	62

Figura 32-6 Cloruros que contienen las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia .....	63
Figura 33-6 Sulfatos que contienen las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia. ....	64

## Índice de tablas

Tabla 1-3 Proceso y unidades productivas relacionadas con la Fundición del Cobre en BRONALCO. Fuente: BRONALCO LTDA.....	26
Tabla 2-1 Máximas concentraciones permitidas en los lixiviados de TCLP EPA 1311. Fuente: EPA 1311 .....	29
Tabla 3-4 Ensayos y método analíticos para cada material .....	37
Tabla 4-4 Prefijos para cada sustitución .....	44
Tabla 5-4 Dosificación de mezclas de morteros con ECG .....	45
Tabla 6-5 Composición química y características físicas del CTO y la ECF.Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 7-5 Gravedad específica y módulo de finura de la arena y la ECG. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 8-5 Propiedades químicas y físicas de la ECF de acuerdo con la norma ASTM C 618. Fuente: Elaboración propia .....	57
Tabla 9-5. Resultados de resistencia a compresión morteros sustituidos con ECG como agregado fino.....	58
Tabla 10-6 Resultado de análisis de TCLP para plomo (Pb), hierro (Fe) y cobre (Cu) en la escoria de cobre y los morteros elaborados. Fuente: Elaboración propia. ....	59
Tabla 11-6 Signatura para los materiales estudiados.....	60
Tabla 12-6 Análisis de clasificación de los materiales estudiados de acuerdo a DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002. Fuente: Elaboración propia .....	65

# Lista de términos y abreviaturas

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

<i>A0</i>	Mortero de comparación, mezcla de; cemento, agua y arena.
<i>A12</i>	Mortero con 12,5% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>A18</i>	Mortero con 18,75% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>A25</i>	Mortero con 25% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>A31</i>	Mortero con 31,25% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>A37</i>	Mortero con 37,5% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>A43</i>	Mortero con 43,75% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>A50</i>	Mortero con 50% de sustitución de escoria como agregado fino.
<i>CTO</i>	Cemento Portland tipo estructural o cemento tipo H.
<i>DRX</i>	Difracción de rayos X.
<i>DTP</i>	Análisis de distribución de tamaño de partícula.
<i>EC</i>	Escoria de cobre.
<i>ECF</i>	Escoria de cobre fina.
<i>ECG</i>	Escoria de cobre gruesa.
<i>FRX</i>	Fluorescencia de rayos X.
<i>IAR</i>	Índice de actividad de resistencia.
<i>MA0</i>	Mortero de comparación A0, para ensayo EN- 124572
<i>MA 43</i>	Mortero de sustitución A43, para ensayo EN- 124572
<i>MPU</i>	Mortero con sustitución del 20% para ensayo EN- 124572
<i>NTC</i>	Norma técnica colombiana
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>EN</i>	Norma europea

## Términos

**Cemento:** Material aglutinante hidráulico, obtenido de piedra caliza, se encuentra compuestos principalmente por óxidos de sílice, calcio, aluminio y hierro, es el material más utilizado en la industria de la construcción, principalmente para realizar mezclas de mortero y concreto.

**Ensayo:** Ejecución de actividades estándar para exponer una probeta o muestra a cierto esfuerzo, ambiente o serie acciones para obtener datos cuantitativos o cualitativos.

**Escoria:** Residuo inorgánico generado por el proceso de fundición de metales ferrosos y no ferrosos.

**Lixiviado:** Es el líquido que resulta después de que el mismo fluya a través de materiales sólidos, arrastrando parte de los componentes químicos y físicos de los sólidos.

**Mortero:** Mezcla de cemento, agua y agregado fino, material importante en el sector de la construcción.

**Puzolana:** Material alumino-silíceo utilizado como adición en la fabricación de cemento para reducir costos sin afectar las propiedades del producto final.

**Probeta:** Material elaborado de forma y medidas adoptados de las especificaciones estándar de una norma, las probetas se pueden llamar probeta testigo o probeta espécimen depende de lo planteado en el diseño de experimentos

## Introducción

La producción de residuos es una problemática mundial, el crecimiento poblacional viene acompañado a una necesidad de mayor producción y así mismo se incrementa la generación de subproductos industriales de los procesos, debilitando los recursos naturales y contribuyendo al calentamiento global (Prem, et al. 2018). Uno de los sectores que mayor impacto genera es el sector de la construcción no solo por la generación de residuos sino también por la explotación de materias primas, actualmente se explotan 3.7 billones de toneladas de agregado natural (Association, E.A. 2018).

Por otro lado, la escoria de cobre (EC) es generada por la industria de fundición de metales no ferrosos. La EC estudiada se obtiene durante el proceso de producción de ánodos de cobre, se clasifica como secundaria porque es el resultado del aprovechamiento de una escoria de cobre primaria y en algunos casos de fundición de chatarra. Se estima una producción anual mundial de EC entre 25,4 y 40 millones de toneladas para el año 2022 (ICSG, 2015; UPME, 2018), siendo los países de mayor relevancia, China, Japón, Chile, Rusia, India, Corea, Polonia, Zambia, Estados Unidos y Alemania.

La alta generación de estas escorias conlleva a la necesidad de realizar un aprovechamiento o una disposición final adecuada, y en el caso de Colombia no son aprovechadas en su totalidad debido a que existe la preocupación por el posible contenido de metales pesados en la EC, lo cual la hace clasificar como un residuo peligroso (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Esto significa que se debe hacer una gestión especial de este residuo, además de conocer las características para realizar un tratamiento y aprovechamiento de manera adecuada. En Colombia la norma que los cataloga por la autoridad ambiental como residuos peligrosos metálicos es el Decreto 4741 del 2005 y el que rige actualmente es el Decreto 1076 del 2017. Por lo anterior es indispensable tener una gestión integrada del ciclo de vida de los subproductos resultantes de los procesos de fundición.

Las fundiciones primarias modernas generan entre 2,2 y 3 ton de EC por cada tonelada de cobre producida (Shi et al., 2008). La generación de residuos desde la extracción hasta la obtención del producto terminado es del 50% del mineral extraído (Aliabdo et al. 2014). Sin embargo, en países como Italia, España, Turquía, Irán y Egipto, se realiza ya el aprovechamiento de residuos producto de las acciones de minería.

El aprovechamiento de la EC en materiales de construcción se ha venido estudiando desde el siglo XX (Tixie et al. 1997) y se ha convertido en un tema de interés en la industria de la construcción (Whyte et al. 2005), trabajo que se vienen realizando por muchos autores en la vía de la sostenibilidad (Limbachiya et al. 2000; Dyer y Dhir, 2001; Paine et al. 2002; Dhir, 2006; Dyer et al. 2006; Paine y Dhir, 2010a).

Por otro lado, estudios de los últimos años han demostrado que la evaluación ambiental por lixiviación es indispensable para analizar el comportamiento a la intemperie de cualquier residuo o material, ya sea utilizado en el sector de la construcción o en otros sectores, es una herramienta importante para determinar o clasificar los posibles contaminantes que pueden ser liberados cuando los materiales son expuestos a lluvias o escorrentías y el impacto que puede tener este en el ambiente (Barra M. et al. 2011).

Las principales empresas de refinación de cobre en Colombia se encuentran en Antioquia, por su cercanía a las minas de explotación y en el Valle del Cauca, una de estas empresas es Cobres de Colombia (Aparicio C. A. 2014), la cual es una de las empresas que dispone de sus escorias con BRONALCO LTDA.

Ante la descripción de la situación mencionada en el párrafo anterior, el presente proyecto de tesis propone la valorización de la escoria de cobre secundaria generada por BRONALCO LTDA, empresa Vallecaucana, evaluando la factibilidad de su aprovechamiento como puzolana y agregado fino en morteros. Se evalúan las propiedades físico mecánicas que permitan establecer su viabilidad técnica y se analiza el impacto ambiental de las mejores mezclas de mortero utilizando la técnica establecida por la normatividad Americana EPA 1311 y adicionalmente la norma para residuos particulados Europea (EN 12457-2), a partir de los resultados de evaluación de esta norma se hace una clasificación del residuo en lo establecido por el concejo de la Unión Europea en la DOCE L1127.

El presente documento se encuentra organizado en siete capítulos: en el capítulo uno se describe el planteamiento del problema y la justificación de la investigación; en el capítulo dos se establecen los objetivos; en capítulo tres se encuentra el marco teórico; el cual está dividido en: marco conceptual, marco referencial y marco contextual. En el capítulo cuatro se plantea el marco metodológico, que se encuentra dividido en: ubicación del proyecto, selección y caracterización de los materiales y se explican los métodos y técnicas analíticas con los que se realizaron los ensayos, parte de la metodología fue desarrollada en una pasantía realizada en la Universitat Politècnica de Catalunya- Barcelona (España) en el Departamento de Ingeniería Civil, con la coordinación de los profesores Diego Fernando Aponte y Marilda Barra Bizzinotto. Se muestran los resultados obtenidos de las evaluaciones técnicas en el capítulo cinco; seguido de los resultados de las evaluaciones ambientales en el capítulo seis; finalmente se muestran las conclusiones de la tesis en el capítulo siete.

La siguiente tesis se realizó con el apoyo de la empresa BRONALCO LTDA, Red Tecnoparque Nodo Cali y SENA Centro de la construcción Regional Valle.

# 1. Planteamiento del problema

## 1.1. Antecedentes

La demanda mundial del cobre ha tenido un crecimiento sostenido desde 2008. El consumo mundial aumentó en 5,2 millones de toneladas en la última década, desde 17,6 Ton en 2008 a 22,9 Ton en 2017. Este crecimiento se ve explicado por el constante aumento en demanda de cobre por parte de los países en vía de desarrollo, se estimó que el consumo mundial experimentó un superávit llegando a un total de 40 millones de toneladas al final del período de 2019, China seguirá siendo el mayor contribuyente al crecimiento mundial del uso del cobre seguido de países de la Unión Europea, Japón y los Estados Unidos (UPME, 2018).

Históricamente la producción de cobre en Colombia ha sido muy baja, en comparación con países como Chile y Perú, los cuales durante años han sido los principales productores de cobre en todo el mundo (López, 2017). Para el año 2011 en Colombia se produjeron en promedio más de 4.000 toneladas de cobre extraído de diferentes minas (Peña C., 2013), según estudios realizados por cada tonelada de cobre producido se generan 2,2 toneladas de escoria (Nazer A. et al, 2010). 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, no se evidencian publicaciones de reportes concretos relacionados con los últimos años 2018-2019.

Existe la preocupación por el posible contenido de metales pesados de la EC, estudios realizados han encontrado metales pesados en escorias de cobre (Khorasanipour M. y Esmaeilzadeh E., 2016), lo que significa que se debe hacer una gestión especial de este residuo, además es importante conocer las características para realizar un tratamiento y aprovechamiento de manera adecuada.

En Colombia no existe norma para la clasificación de residuos, sin embargo, la autoridad ambiental (Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial, 2007), tiene un decreto que contiene un listado de posibles residuos peligrosos metálicos, correspondiendo este al

Decreto 4741 del 2005 y el que rige actualmente es el Decreto 1076 del 2017. Donde se menciona la normatividad Americana EPA 1311 y la lista Europea de residuos peligrosos.

La falta de aprovechamiento de escorias da como consecuencia la acumulación excesiva de residuos metálicos en celdas de seguridad que son un sistema de control-seguro diseñado para disponer sustancias potencialmente peligrosas para la salud humana y el ambiente. Estas escorias se consideran un pasivo ambiental y pueden permanecer en celdas por tiempo indefinido; en la actualidad, se registran depósitos de alrededor de 200 años de antigüedad. Los volúmenes vertidos ocupan grandes extensiones de superficies de terreno y muchas veces restan terreno cultivable e impactan negativamente al medio ambiente por la potencial lixiviación natural de metales pesados y por la contaminación visual del paisaje. De allí la importancia de establecer una alternativa que permita aprovecharlas y que no causen ningún tipo de impacto ambiental (Nazer,2010).

Adicionalmente, la disposición final de este tipo de residuos genera un costo adicional para las empresas de fundición, lo que lleva a que muchas de estas incurran en una disposición inadecuada, utilizándolas para relleno de vías, taponamiento de huecos y otras actividades en el espacio público que no son controladas. Como consecuencia se generan riesgos ambientales y daños a la salud que pueden provocar enfermedades respiratorias, función pulmonar deficiente, la muerte prematura de las personas con enfermedades respiratorias y cardíacas; en la vegetación se inhibe el crecimiento y desarrollo de las plantas dado que se afecta el proceso de fotosíntesis. También puede perjudicar a las fuentes hídricas, por cambios en los niveles de pH cambiando la condición natural de las fuentes de agua superficial o subterránea (Solórzano, 2014). Lo que al final, se resume en el incumplimiento de la normativa legal vigente por el inadecuado manejo de estos residuos.

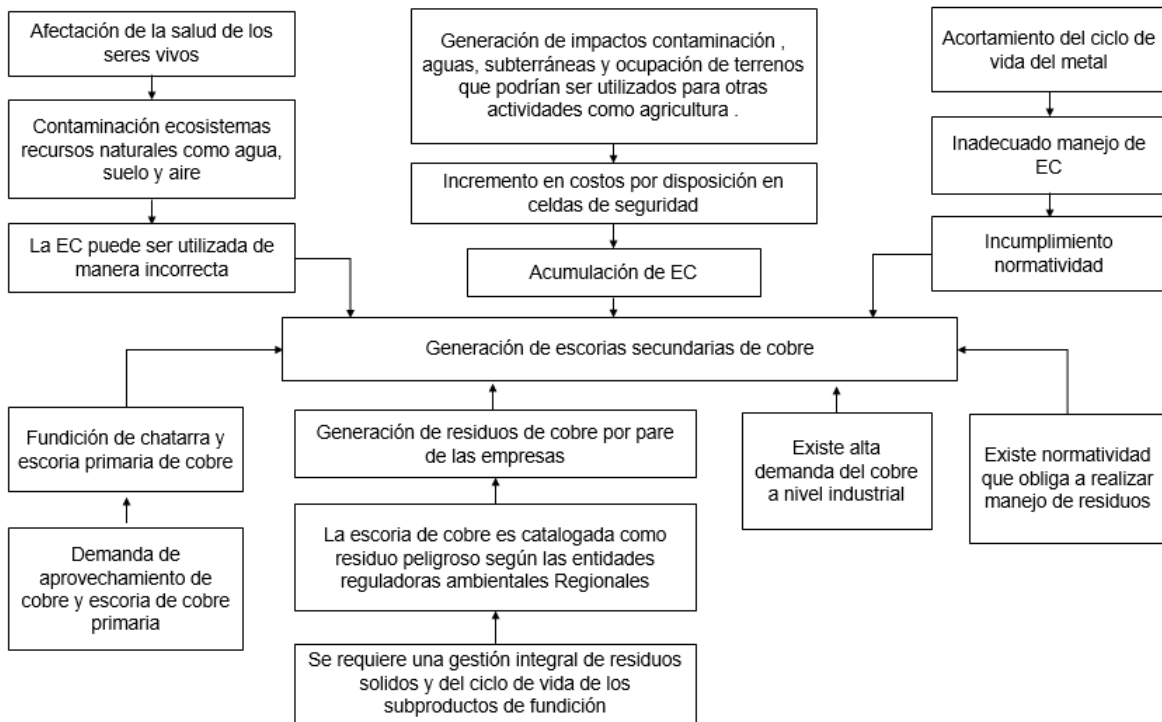
Por otro lado, el cobre es un material muy demandado por la industria, empleándose actualmente en sectores tan diversos como: la construcción, la industria eléctrica, la electrónica, la computación o la medicina. El Ministerio del Medio Ambiente, define escoria como una mezcla de óxidos de hierro y silicatos u otros compuestos producidos durante el proceso de fusión y conversión, por lo cual, se ha identificado que estas están constituidas por altas propiedades que contribuyen a mejorar la resistencia de algunas estructuras de concreto, siendo utilizada como agregado (Nazer, 2010). Lo que conduce a generar alternativas de aprovechamiento para generar nuevos materiales y de esta manera aportar a la reducción de la huella de carbono producida por la manufactura de materiales para la construcción.

Es por ello, que ya se han planteado diferentes técnicas y mezclas para ser utilizado en obras civiles, teniendo aplicación en diferentes estructuras como: carreteras, edificios, barreras de ruido, rellenos, diques; también en pavimentos, mampostería, estabilizadores de suelos o en materiales de construcción como yeso, barro rojo donde se combinan escorias de níquel y cobre, como agregado fino en materiales para construcción. Igualmente son utilizados residuos de ferrocromo como material de aislamiento en estructuras (Fabara et al, 2017). De allí la posibilidad de valorizar las escorias de cobre, mediante la recuperación de metales contenidos en ellas, puede ser una interesante alternativa para la industria metalúrgica (Naser, 2016). Por ejemplo, en la construcción se utiliza principalmente como: material de relleno y como material abrasivo; además contiene propiedades cementantes para la fabricación de morteros y hormigones (Murari et al., 2015 citado por Naser, 2016).

Como se muestra en la figura 1-1, en la página siguiente la causa raíz es la producción continua de cobre y recuperación del mismo, siendo este uno de los metales que no pierde sus propiedades al ser reciclado continuamente, la economía se ve obligada a recuperar este metal en forma de chatarra, lo que lleva a un aumento de fundición y por ende a un aumento de residuo del proceso.

El aumento de la producción de escorias y el alto costo en su disposición lleva a que en algunos casos no se haga la disposición adecuada y el residuo termine en terrenos sin las precauciones necesarias para que no se generen lixiviados de metales pesados en los suelos y finalmente puedan llegar a cuerpos hídricos cercanos. De igual manera cuando los residuos se disponen para celdas de seguridad se ocupan grandes extensiones de terreno los cuales pueden ser aprovechados en otras actividades económicas productivas, como por ejemplo la agricultura. Esta problemática crea la necesidad de buscar alternativas de tratamiento y aprovechamiento de este residuo.

**Figura 1-1** Árbol de problemas basado en la metodología de Marco Lógico. Fuente: Elaboración propia, adaptado de (Sanchez, N. 2007).



## 1.2. Justificación

Se da la necesidad de realizar un proceso de aprovechamiento de la EC de BRONALCO LTDA, con el fin de darle valor en el ciclo de vida del metal, teniendo como valor agregado la optimización de los procesos, la diversificación del mercado y potencialización de la empresa como modelo de producción ecológica en la Región. Además de contribuir al aprovechamiento de subproductos provenientes de la minería, donde según Fabara et al., 2017, la creciente preocupación ambiental y los beneficios económicos implícitos en su uso es cada vez mayor.

Por otro lado, el impacto ambiental asociado a la industria de la construcción, principalmente en la producción de cemento y explotación de agregados naturales, los cuales son principalmente explotados en las cuencas de los ríos y montañas, conducen a generar alternativas de aprovechamiento para generar nuevos materiales y de esta manera

aportar a la reducción de la huella de carbono producida por la manufactura de materiales para la construcción.

Se hace necesario realizar estudios que caractericen la escoria de cobre físico químicamente, para evaluar su peligrosidad y encontrar otras propiedades que puedan darle valor para poder ser utilizados en diferentes aplicaciones, específicamente alargar el ciclo de vida del mineral en este caso como puzolana y agregado fino en morteros.

Esta investigación tiene como alcance final darle posibles usos a la EC como material puzolánico en el cemento y como agregado fino en el mortero, evaluando propiedades mecánicas para realizar un análisis técnico, además de evaluar ambientalmente los materiales resultantes por medio de análisis de lixiviados para validar su potencial contaminante.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Valorizar la escoria de cobre de Bronalco Ltda buscando el aprovechamiento como material puzolánico y agregado fino en morteros de matriz cementicia.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar físico-químicamente la escoria de cobre generada en Bronalco Ltda.
- Evaluar la escoria de cobre como puzolana de acuerdo con parámetros de las normas ASTM C311 y ASTM C618.
- Evaluar la resistencia a compresión de sustituciones parciales de escoria de cobre como agregado fino en mezclas de mortero.
- Analizar ambientalmente la escoria de cobre y las mejores mezclas de mortero elaboradas por medio de la normatividad Americana EPA 1311 y Europea EN 12457-2

---

## 3. Marco teórico

### 3.1. Marco conceptual

El marco conceptual se ha construido a partir de conceptos teóricos sobre la tecnología del concreto y del mortero, disponible en la literatura, a continuación, se definen y se describen los conceptos más relevantes alrededor de esta temática.

#### 3.1.1. Cementante

*“Un material cementante tiene la propiedad de fraguar y endurecer con el agua o un activante alcalino que propicia una serie de reacciones químicas formando silicatos cálcicos hidratados y otros compuestos que otorgan las propiedades a la pasta endurecida. Tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, estas propiedades dependen de su composición química y de la finura de las partículas que le brindan ciertas características como lo son la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que puede alcanzar en estado endurecido” (Sanchez de Guzman, 2011).*

El cementante más utilizado en el mundo es el cemento portland, sin embargo se vienen realizando investigaciones en búsqueda de cementantes suplementarios o alternativos, esto como consecuencia del impacto ambiental causado por los procesos de explotación de Clinker y el proceso de producción de cemento que implica alto consumo de energía y una alta huella de carbono e hídrica (Torres Carrasco & Puertas, 2017).

---

### 3.1.2. Puzolana

En la industria del cemento existen adiciones activas, las cuales se pueden definir como productos que, en presencia de cemento portland, colaboran al desarrollo de conglomerante hidráulico-resistente.

Existen puzolanas que poseen la propiedad de fraguar o endurecer al contacto con el agua, esto debido a su composición química y mineralógica, un ejemplo de estas es la escoria granulada de alto horno, otras no poseen propiedades hidráulicas, sin embargo, son ricas en compuestos de sílice y alúmina, llevándolas a estado de elevada finura son capaces de fijar hidróxido de calcio en presencia de agua para dar lugar a compuestos con propiedades hidráulicas (*Soria F. 1983*).

En otras palabras el término puzolana se utiliza para definir materiales que tienen la capacidad de reaccionar con  $Ca(OH_2)$ , en presencia de agua y formar productos con propiedades conglomerantes. Hoy en día se abarcan materiales muy diversos respecto a su origen y/o composición, tanto química como mineralógica.

#### 3.1.2.1. Clasificación

- **Puzolanas Naturales:**

Las puzolanas naturales se caracterizan por ser materiales que son activos desde su origen, es decir no necesitan tratamientos para que se lleven a cabo modificaciones químicas ni mineralógicas sustanciales en sus propiedades (*Soria F. 1983*).

- **Puzolanas artificiales:**

Las puzolanas artificiales resultan de transformaciones químicas y estructurales de materiales que originalmente no presentaban características puzolánicas (*Soria F. 1983*), generalmente requieren de tratamiento térmico, disminución de tamaño de partícula o mezclas con materiales activos.

---

### **3.1.3.Pasta**

La pasta se puede definir como la mezcla entre el cementante con el agua o activante mas el aire naturalmente atrapado o intencionalmente incluido, en algunos casos se emplea aditivos con diferentes funciones depende de la aplicabilidad de la pasta. La función de la pasta en estado fresco es darles cohesión a las partículas de agregado, puede ser agregado fino o grueso según sea el caso, brindando una fluidez a la mezcla. En estado sólido la pasta obstruye los espacios entre las partículas al aglutinarse, reduciendo permeabilidad para lograr una resistencia, entre menor permeabilidad, menor penetración de agentes agresivos y mayor durabilidad del material formado (Sanchez de Guzman, 2011).

### **3.1.4.Mortero**

El mortero es la mezcla entre la pasta y un agregado fino, por lo general en nuestra región es arena (agregado natural), sin embargo también se pueden utilizar otro tipo de agregados que cumplan con las especificaciones técnicas establecidas (Sanchez de Guzman, 2011). Este material es utilizado como material de pega de ladrillos, acabo fino para muros (repello), y con la suma de aditivos se utiliza para pega de cerámicos. Es uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción.

### **3.1.5.Agregados o áridos**

Los agregados son materiales inertes de relleno, aportan resistencia a compresión a las mezclas de mortero o concreto, estos materiales no deben influir en el endurecimiento de la pasta en el proceso de fraguado. Los agregados controlan los cambios de volumen de la pasta, evitando agrietamientos en el proceso de fraguado, depende de la procedencia de estos será su forma, color y otras propiedades intrínsecas de estos. Por lo general las partículas provenientes de los ríos son de formas más redondeadas (Sanchez de Guzman, 2011).

- **Agregado fino**

Según la norma técnica Colombiana NTC 174 el agregado fino debe estar compuesto de arena natural, arena triturada o una combinación de éstas, y debe cumplir características

generales mencionadas en la norma, donde se especifica características físicas como la distribución de tamaño de partícula, contenido de arcilla, partículas deleznableles entre otras. De igual manera contiene características químicas como resistencia a agentes agresivos, reactividad álcali-sílice contenido de materia orgánica.

En Colombia los agregados más utilizados son los agregados naturales provenientes de los ríos (arena de río), sin embargo, en otros países como España se utiliza principalmente agregado fino de canteras, se ha trabajado en la prohibición de explotación de arena de ríos (Teresa Ponte Iglesias, M. 1990).

### **3.1.6. Agua o activante**

El cementante más utilizado en el mundo son los cementos, estos son materiales hidráulicos ya que tienen la capacidad de fraguar y endurecer por que reaccionan con el agua, en otros casos se utilizan activantes alcalinos como hidróxidos o silicatos (Torres Carrasco & Puertas, 2017), en algunos casos diluidos en agua con el fin de que se presenten las reacciones necesarias ya mencionadas. De tal manera el agua tiene dos funciones, la función de activar las reacciones de hidratación y también brinda manejabilidad a la mezcla de mortero en estado fresco.

### **3.1.7. Inmovilización-solidificación/estabilización**

*“Proceso por medio del cual los contaminantes de un residuo son transformados en formas menos tóxicas o menos móviles o solubles. Las transformaciones se dan a través de reacciones químicas que fijan los compuestos tóxicos en polímeros impermeables o en cristales estables. Los productos utilizados en este proceso permiten: - Mejorar las características físicas del residuo. - Disminuir el área superficial a través de la cuál se transfieren los contaminantes. - Reducir la solubilidad de los contaminantes. - Reducir la toxicidad (la disponibilidad) de los contaminantes”. (Ministerio de ambiente y desarrollo territorial, 2007).*

- **Inmovilización**

Se llama inmovilización a las técnicas que reducen el riesgo potencial de un residuo al convertir sus contaminantes en sus formas menos solubles, móviles o tóxicas (Macias A. et al. 1999).

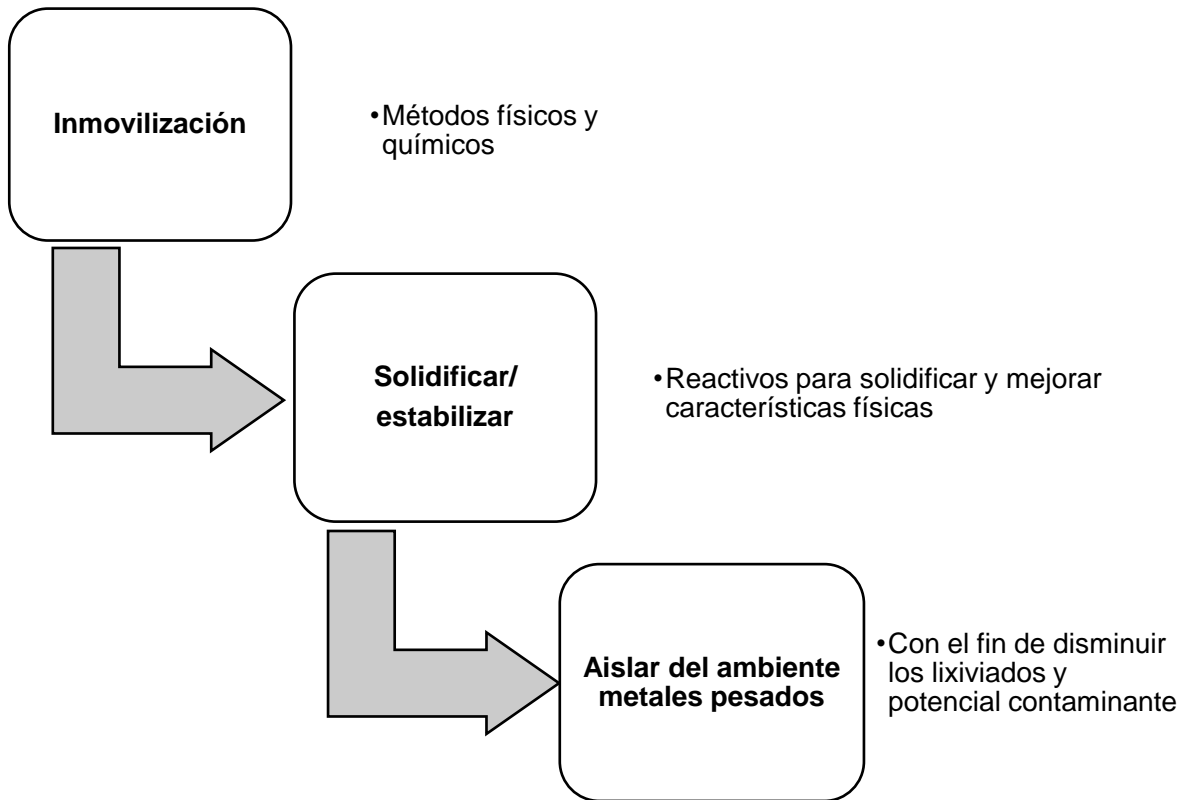
- **Solidificación**

El termino solidificación a los procesos desarrollados para encapsular un residuo en un sólido monolítico de alta integridad estructura, existe la microencapsulación y la macroencapsulación, dependiendo del tamaño de la reducción de superficie expuesta a lixiviación.

- **Inmovilización/solidificación**

En la figura 2-3 se ilustran los conceptos claves de la inmovilización/solidificación de residuos peligrosos.

**Figura 2-3** Conceptos claves inmovilización/solidificación. Fuente: Elaboración propia.



La inmovilización puede darse mediante diferente tipo de procesos, a continuación, se definen:

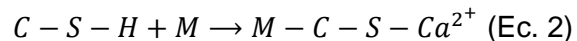
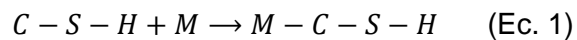
**Procesos orgánicos:** Este tipo de procesos se realiza con materiales monómeros o prepolímeros son polimerizados o enlazados tridimensionalmente mediante catalizadores o aceleradores después de ser mezclados con el residuo líquido.

**Procesos inorgánicos:** Este tipo de procesos se realizan con materiales como cemento portland, cenizas volantes, cal, puzolanas, silicato sódico, etc. bajo costo, su buena estabilidad física y química a largo plazo, su utilización bien documentada en una gran variedad de residuos industriales por un período superior a 10 años.

- **Inmovilización de los metales tóxicos y peligrosos con cemento portland**

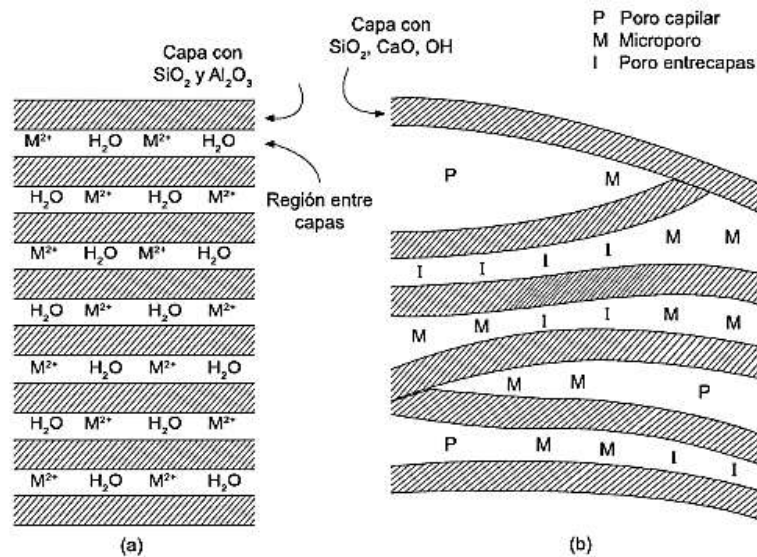
Los sistemas de inmovilización basados en cemento Portland fueron los primeros en ser utilizados en el campo de los residuos radioactivos en 1950. En ellos, el residuo, ya sea en forma sólida o acuosa, los metales contenidos en los residuos son los únicos constituyentes peligrosos que no pueden ser destruidos o alterados por métodos químicos o térmicos; y, por lo tanto, deben ser convertidos en su forma más insoluble posible, para evitar su vuelta al medio ambiente (Macias A. et al. 1999).

Los iones de metales pesados quedan atrapados en las cadenas de los geles C-S-H que se forman en las reacciones del cementante con el agua o activante, esto se puede dar por medio de reacciones de adición (Ec. 1) o reacciones de sustitución (Ec. 2). La gran área superficial de los geles C-S-H pueden absorber físicamente una gran cantidad de cationes, en algunos casos la adsorción física puede incluso ser mayor que el enlace químico. En la figura 3-3, mostrada en la página siguiente, se observa una ilustración de cómo se pueden dar este tipo de reacciones. Evidencias de rayos X en investigaciones han demostrado formación de nuevos compuestos que podrían inmovilizar metales (Romero ,L. G y Vargas, M.2009).



Donde C-S-H : Silicatos cálcicos hidratados, M: ion metálico.

**Figura 3-3** Modelo estructural CSH, (a) Reacciones de adición, (b) reacciones de hidratación. Fuente: copyright (Romero, L. G y Vargas, M.2009).



## 3.2. Marco referencial

### 3.2.1. Escorias de cobre (EC)

Dentro de los procesos pirometalúrgicos que se llevan a cabo en el proceso de fundición del cobre, se generan escorias de cobre, las cuales se componen principalmente, en un 30 a 40 % por óxidos de cobre ( $CuO$ ,  $Cu_3O_4$ ) que se producen por la oxidación durante el proceso piro-metalúrgico; seguido de Óxidos de silicio ( $SiO_2$ ) que están en un 35% y Óxidos de aluminio ( $Al_2O_3$ ) que pueden llegar hasta 10%, al igual que los Óxidos de calcio ( $CaO$ ). También se caracteriza por contener altos contenidos de Hierro, donde las principales especies componentes son la Fayalita y Magnetita, además, de encontrar Óxidos de Calcio, Aluminio ( $CaAl_2O_4$ ), Silicato de Cinc ( $Zn_2SiO_4$ ), y Óxidos de Cobre Hierro ( $CuOFe_2O_4$ ) (Carrasco Correa, 2017).

Están constituidas tanto por fases vítreas como cristalinas, se producen a partir de los 1600°C, al ser líquidas su estructura amorfa-cristalina dependerá de la velocidad de enfriamiento. Si es rápido la estructura queda colapsada y es mayoritariamente amorfa y

---

sus propiedades serán las de un material altamente reactivo. En cambio, si el enfriamiento es lento, tenemos menor cantidad de estructura amorfa o vítrea, predominando estructuras cristalinas impidiendo la formación de nuevos enlaces (Oyarzún, 2013).

Cabe resaltar que estas partículas contribuyen al proceso de producción del cobre, también llamado metal rojo, dado que estas disminuyen el punto de fusión del mineral que es a 1200°C. Una vez pasada la fase vítrea o cristalina, dependiendo del enfriamiento natural al que es sometida, se disponen en tolvas donde posteriormente son depositadas en vertederos no autorizados o dispuesta como residuos peligrosos (generalmente, esta disposición consta de almacenarla o verterla en lugares aptos u autorizados para ello).

Si bien no existe una norma que regule específicamente su disposición, la legislación colombiana a través de la Política para la gestión integral de residuos peligrosos las cubre y las clasifica, aunque no presenta una definición. Por ello, se cita la definición del Ministerio de Ambiente de Chile. Las escorias se definen como: una mezcla de óxidos de hierro y silicatos u otros compuestos producidos durante el proceso de fusión y conversión de concentrados sulfurados, que son descartados en el proceso para su disposición final como residuo peligroso. Puede permanecer en lugares de acopio por décadas, lo que involucra la ocupación de grandes extensiones de superficies de terreno.

Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: concentración rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxido).

El sulfuro de cobre pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que el óxido o escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas. En los procesos de fundición, lo ideal es lograr tener una escoria con la menor cantidad de cobre posible. Por ejemplo, en BRONALCO LTDA, las escorias que se producen 3,5 toneladas en un turno de 8 horas donde se llega a recuperar el 30% del cobre. El mineral de cobre que llega a la fundición es comúnmente de residuos procedentes de empresas de fundición o material de cobre directamente, como cables o lo llamado comúnmente chatarra (Figura 4-3).

**Figura 4-3** Escorias de Cobre. Fuente: BRONALCO LTDA.



Se ha diagnosticado que las áreas destinadas para el almacenamiento de escorias tienen un crecimiento anual, por lo que la reutilización de escorias se ha convertido en un tema de gran interés para las empresas metalúrgicas.

Dada la problemática anterior, en los últimos años se vienen desarrollando trabajos de investigación, que permiten vislumbrar la posibilidad de encontrar usos alternativos, como, por ejemplo, utilizar las escorias en materiales y derivados de la construcción y la ingeniería civil. Permitiendo visibilizar una posibilidad de sostenibilidad de estos procesos, al tener la posibilidad de prolongar el ciclo de vida de este mineral mediante su reutilización y así reducir la contaminación y dar un valor agregado al subproducto de las fundiciones de cobre.

### **3.2.2. Alternativas de aprovechamiento de escorias**

En los últimos años, ha habido un creciente interés por buscar alternativas para dar un uso a las escorias de cobre. Encontrando que éstas se han propuesto utilizar en diversos sectores productivos relacionados con el sector de la construcción (Whyte et al., 2005), trabajo que se vienen realizando por muchos autores en camino a la sostenibilidad (Limbachiya et al., 2000; Dyer y Dhir, 2001; Paine et al., 2002; Paine y Dhir, 2010a). A continuación, se muestran algunas de las investigaciones de las posibilidades abordadas en el presente estudio.

---

### **3.2.2.1. Escoria de cobre como puzolana**

El aprovechamiento de escorias de cobre en materiales de construcción se ha venido estudiando desde el siglo XX por Tixie et. Al (1997), estudió la viabilidad de estas como cementante sustituto, encontrando que aporta resistencia a la compresión y a la densidad.

Spry (2003) afirma que a pesar de que la escoria de cobre no tiene un uso industrial masivo, a nivel mundial se han encontrado buenos resultados, específicamente en el sector de la construcción; utilizándose como sustituto parcial del cemento hidráulico, gravilla para líneas de ferrocarriles, material para mezclas asfálticas de obras viales, material para morteros y hormigones de cemento, material abrasivo en la limpieza de superficies de estructuras metálicas o de hormigón y como bloques de escorias moldeados en albañilerías.

Estudios más recientes se han enfocado en la utilización de las escorias como un material que reemplace en forma parcial al cemento Portland, los resultados que se han informado ratifican que algunas escorias de cobre tienen propiedades cementicias y pueden considerarse materiales cementantes alternativos (Rojas F., 2004; Behnood, A., et al 2008; Sharma, R., & Khan, R. A. ,2017). Dado que en el proceso de fabricación de cemento se introduce como sustituto parcial de los minerales como el sílice y hematita, contando con beneficios como alta resistencia, disminución del consumo de agua, del poder calorífico y por ende disminución en los costos de producción, permitiendo contribuir a procesos más sostenibles con el ambiente (Orizola, 2006).

Por otro lado se ha estudiado la escoria de cobre como material cementante alternativo en concretos de ultra alta resistencia (UHSC), encontrando que se puede sustituir un 5% en el material cementante aportando a las reacciones de endurecimiento (Edwin R. S. et al. 2016).

Otro estudio demuestra la viabilidad como material cementante reemplazando hasta un 30% (Mirhosseini, S. R. et al., 2017). En un estudio más reciente se encontró que de la activación alcalina de escoria de cobre junto a metacaolín y ceniza volante se obtienen resultados favorables respecto a la resistencia a compresión (Singh, J., & Singh, S. P., 2019). En otras investigaciones incorporaron escorias de cobre en la elaboración de ladrillos de cementantes activados alcalinamente, dando resistencias hasta de 15Mpa (Gavali H.R., 2019

---

Los resultados favorables en los procesos investigativos han efectuado de que en algunos países se regule el empleo de escorias como material aditivo para el cemento, como por ejemplo la normas: DIN 4226; BS 6599; BS EN 12620; ASTM C 989, entre otras. Situación que ha llevado a que en países como Australia se comercialicen hormigones con escorias de cobre.

### **3.2.2.2. Escoria de cobre como agregado fino**

Según Reyes, Sánchez & Valenzuela, (2010) a nivel mundial existen una serie de usos para la escoria de fundición del cobre como balastro, arena abrasiva, ebonygrit y adcretos, en donde se ha mostrado altamente eficiente.

Al jabri (2006) estudió las escorias de cobre como agregado fino en el concreto, encontrando que después del 50% se va reduciendo la resistencia a compresión y en el 2009, Al jabri et al, (2009a,b) encontró que una sustitución del 100% como agregado fino en el concreto aumentó un 20% de resistencia a compresión en comparación con el concreto patrón, mejorando también trabajabilidad y reducción de absorción de agua superficial.

De acuerdo con estudios realizados en Chile, se obtuvieron resultados comparativos de la resistencia a la compresión de hormigones fabricados con escoria de cobre versus un hormigón con materiales convencionales de río, observándose que, a los 28 días de edad la resistencia a la compresión del hormigón con escoria de cobre fue 34 % mayor que en el hormigón convencional (Aguilar et al, 2010). De hecho, Spry (2003) manifiesta que poblaciones asentadas en lugares próximos a las fundiciones de cobre han aprovechado las escorias como un material de construcción basado en bloques de escoria moldeada.

En China, se han desarrollado manuales técnicos para el uso de escorias de cobre en morteros y hormigones, utilizando las escorias de cobre como materia prima para la fabricación de cemento, hormigones y morteros de cemento (Behnood, Meyer & Shi,2008). De igual forma, Rojas (2004), varió el reemplazo de la arena por escoria fina hasta un 30% en la fabricación de morteros, obteniendo aumentos en la resistencia a medida que aumentaba el reemplazo.

También se han realizado estudios sobre el comportamiento mecánico de los morteros de cemento fabricados con escoria de cobre donde se observa un incremento de su resistencia a la abrasión (Bastos, Cachim & Resende, 2008). Por ejemplo, de acuerdo con (Carrasco Correa, 2017) el componente hidráulicamente activo de la escoria se encuentra en la fase

---

vítrea o amorfa, siendo uno de los puntos que favorece el aumento de la resistencia a compresión al fabricar hormigón con estas escorias.

Cendoya (2007), obtuvo resultados esperanzadores Al utilizar la escoria de cobre en la fabricación de hormigones como reemplazo de los agregados finos tradicionales. Tanto los ensayos de compresión como las pruebas de flexo-tracción, registraron mejores valores al ser comparadas con las probetas testigo, registrándose valores mayores para un 40% de remplazo de las arenas por Escorias de Cobre. Producto que la escoria es más densa que los Tradicionales.

Al-Jabri. et al, (2011) amplió el rango de reemplazo variando de 0 hasta 100% los materiales finos en la fabricación de mortero y hormigón, todas las probetas de morteros, realizadas con escoria de cobre, arrojaron aumentos en sus resistencias, en tanto, para pruebas de absorción como de volúmenes de los poros permeables, registrando valores máximos en las probetas donde se reemplazó la totalidad de la arena por escoria disgregadas.

Adicionalmente, otros estudios han revelado que hasta el 40% de reemplazo como agregado fino en morteros y concretos de escorias de cobre incrementa propiedades en fresco como la trabajabilidad, y propiedades en estado endurecido como la resistencia a compresión, densidad, absorción de agua (M.A.G Dos Angos et al,2017 ; Al Jabri KS. Et al, 2010; Vijayaraghavan J. et al, 2017).

Trabajos de investigación como Mavroulidou and Liya (2015) reportan la utilización de escorias como agregados finos para el sector de la construcción. Encontrando que los reemplazos óptimos de escoria de cobre como agregado fino están entre el 40% y el 60% mejorando propiedades como resistencia a compresión y absorción superficial de agua.

Por otro lado, Sharma and Kan (2018) investigó la factibilidad de producción de concreto autocompactante con un reemplazo del 100% de escorias de cobre, incorporando metakaolin para incrementar características de durabilidad y un estudio más reciente se encontró que de la activación alcalina de escorias de Cobre junto a metakaolin y ceniza volante, se obtienen resultados favorables respecto a la resistencia a compresión (Jagmeet Singh y SP Singh, 2019).

Rajasekar et al (2019) revelaron que es posible utilizar escoria de cobre como agregado fino para producir concretos de ultra alta resistencia, elaborando mezclas que incorporan humo de silice y superplastificantes, alcanzando resistencias hasta de 235Mpa de

---

resistencia compresión, 47 Mpa de resistencia flexión, 31 Mpa de resistencia a tensión, con un reemplazo del 60%. De igual manera con un reemplazo del 100% se alcanzó una resistencia a compresión de 216 Mpa. Este estudio también reveló la influencia del tipo de curado de las muestras, encontrando que el curado a altas temperaturas mejora las propiedades físicas del concreto. En cuanto a la durabilidad se refleja un aumento de la resistencia a la penetración de agentes que la afectan por su alta densidad y baja absorción superficial.

Finalmente, las investigaciones recientes empiezan abordar no solamente el aprovechamiento de las escorias de cobre y otros residuos en matrices cementicias, de morteros y concretos, sino también en la elaboración de elementos constructivos (Zhang Z. et al, 2018, Murmu A.L. y Patel A., 2018) y otros materiales de construcción como asfaltos (Raposeiras A.C. et al 2016).

En el valle del Cauca se ha investigado el uso de escorias como agregado grueso en concretos, estudio abordado en una tesis de grado (Aparicio C. A. 2014). Sin embargo, existe la ausencia de estudios de este residuo como puzolana y como agregado fino.

### **3.3. Marco contextual**

#### **3.3.1.El cobre:**

El cobre (Cu) es un elemento metálico, de color rojizo, entre sus propiedades se destaca por su alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, buen conductor térmico, dúctil y reciclable, este mineral conductor presenta una alta demanda en la industria energética y de las telecomunicaciones; lo que también ha llevado a un paulatino agotamiento de este recurso, dada la falta de nuevos yacimientos cupríferos para responder a la demanda. En la actualidad, Chile es el primer productor y exportador del mundo y posee las mayores reservas de mineral, seguido de China y Perú en menor proporción. Sin embargo, el consumo global de cobre refinado progresa en forma alarmante. La producción industrial no mantiene el ritmo de consumo de cobre, por lo que se señala que, en el próximo cuarto de siglo, el planeta necesitará producir tanto cobre como el producido en toda la historia de la humanidad (Carrasco Correa, 2017).

### 3.3.2. Fundición del cobre

El proceso de fundición de cobre requiere que este mineral sea sometido a un proceso de fusión en un horno a altas temperaturas, donde básicamente la capacidad de fundición depende de la tecnología con que se cuente para mantener un proceso de operación constante, fundición de altos volúmenes, pero que a su vez se controlen los gases que se emiten en el proceso de fundición. De manera que sea posible cumplir con las actuales regulaciones ambientales.

En el caso de BRONALCO LTDA, es una empresa que se encuentra constituida legalmente desde el año 2008, se dedica a la fundición de metales no ferrosos y al aprovechamiento, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos metálicos.

El proceso de fundición del Cobre lo realiza mediante un horno cubilote (Figura 5-3), el cual consiste en un equipo construido en lámina de hierro de 3/8" de forma cilíndrica y que alcanza una altura de 3 metros y un diámetro de 90 cm, revestido internamente con material refractario de carácter ácido en forma de ladrillos y masas apisonadas. El fondo es de tipo abierto, con una puerta en la placa de base, que se puede bajar para permitir la remoción de los residuos al final de la fundición. El modelo descrito es artesanal y el tiempo de operación es de 8 horas y la temperatura de operación es 1200°C; tiene como combustible carbón mineral o coque, cuyo consumo aproximado es de 800 kg/ por turno de 8 horas. Cuenta con una campana de evacuación de emisiones dirigida al sistema de control de emisiones.

La capacidad del horno es aproximadamente de 250-300 kg/ de carbón por tonelada de materia prima a procesar, cuya frecuencia de uso del equipo es de 3 veces por semana, mínima de una vez por mes y tiene una relación de consumo de combustible de 3 a 1, es decir que, para procesar 3 toneladas de materia prima de cobre, se requiere una tonelada de carbón coque. Lo que significa que, durante un turno de 8 horas, se pueden procesar entre 3 y 5 toneladas de materia prima. Lo que se traduce en una capacidad máxima 300Kg/h – 50.400 Kg/semana y 201.600Kg/mes. Cabe resaltar que, para hacer uso del horno, es necesario un alistamiento de un día, en el cual consiste en poner una capa de 10 cm de una mezcla de greda, cuarzo y arcilla en todo el equipo como aislante de temperatura en todo el proceso de fundido y para la prevención de fugas.

**Figura 5-3** Horno Cubilote de BRONALCO (Plano y Fotografía), Fuente: BRONALCO LTDA.



Este horno es especial para la fundición de cobre y escorias metálicas. Una vez el material alcanza la temperatura de fundición del cobre ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) empieza la generación de escoria residual. La producción de este residuo es debido a la diferencia de densidad entre la escoria y el material fundido, generando una separación de fases, donde la escoria emerge a la superficie para un posterior retiro del proceso. El horno cuenta con un orificio en la parte superior de tanque de fundido por el cual emerge la escoria, este proceso es apoyado por labores de desincrustación del orificio por parte de los operarios.

Una vez se ha retirado toda la escoria resultante del fundido, se procede a vaciar el material en lingoteras de 30 kilogramos, se abre el orificio de la parte inferior del tanque de fundido y se recibe el material en vasos de hierro, el cual es trasvasado en las lingoteras, garantizando que todo es proceso este a  $1200^{\circ}\text{C}$ . Una vez colocado el cobre fundido en las lingoteras, esta se deja enfriar por 4 horas. Para labores de limpieza se debe dejar enfriar durante 6 horas, y un día posterior al proceso de fundido se realiza limpieza a todos los instrumentos y equipos utilizados.

BRONALCO actualmente cuenta con la Licencia Ambiental según la Resolución 0100 No. 0150-0640 de 2014, por el cual se otorga el permiso para el almacenamiento, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos específicamente escorias de bronce, aluminio, cobre, zinc, antimonio y plomo; limallas y retales de materiales ferrosos o piezas defectuosas de diferentes metales como bronce, aluminio, cobre, zinc, antimonio y plomo en el proceso de fundición de metales. Lo que permite que la empresa

pueda tener almacenamiento y tratamiento de 48 toneladas/mes de escoria de Bronce y cobre mediante el proceso de fundición en el Horno Cubilote.

De acuerdo a lo anterior, BRONALCO a partir del 2012 se planteó mejorar el proceso productivo (Figura 5-3) con el fin de implementar un manejo sostenible de sus procesos y mejorar su responsabilidad ambiental empresarial, generando impactos positivos que benefician a la comunidad.

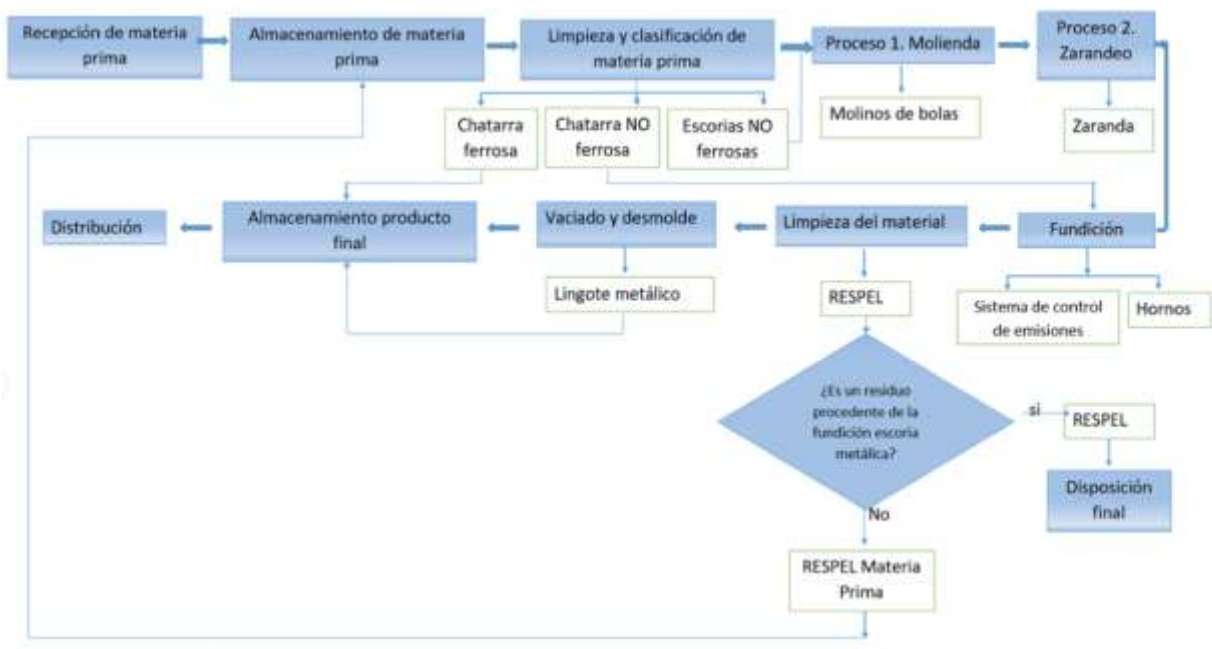
A continuación, en la Tabla 1-3 se describe el proceso de fundición que se realiza en BRONALCO y las áreas productivas con las que cuenta.

**Tabla 1-3** Proceso y unidades productivas relacionadas con la Fundición del Cobre en BRONALCO. Fuente: BRONALCO LTDA

Proceso	Unidades Productivas BRONALCO	Procesos
<b>Fundición de cobre</b>	Área de Materia Prima Peligrosa	Recepción de Materia Prima Limpieza y Clasificación de Materia Prima
	Área de Excedentes Industriales	Almacenamiento de Materia Prima
	Área de proceso (maquinado)	Molienda y Zarandeo Fundición
	Área de Fundición	Limpieza del Material Vaciado y Desmolde
	Área del sistema de Control	Control de Emisiones
	Área de Descargue y Pesaje	Almacenamiento del Producto Final y Distribución del producto fundido.
	Área de almacenamiento de Residuos	Acopio de Escorias de Cobre (RESPEL) Disposición Final

En la actualidad la empresa BRONALCO cuenta con una serie de equipos y herramientas específicos para realizar las actividades de separación física, fundición y comercialización de sus materias primas. Durante los últimos 3 años la empresa ha realizado importantes inversiones con el propósito de actualizar sus equipos y herramientas en los sistemas de control ambiental, es así como ahora cuenta con un sistema de control de emisiones automatizado y un sistema de tratamiento de aguas residuales lo que traduce en una empresa que ha venido teniendo cambios positivos que buscan el mejoramiento del proceso productivo, la calidad del producto terminado (Figura 7-3). Actualmente, BRONALCO tiene una capacidad anual de fundición de 2.419.200 toneladas, lo que lleva a una generación de 5.322.240 toneladas.

**Figura 6-3** Proceso Productivo de BRONALCO LTDA. Fuente: BRONALCO LTDA



**Figura 7-3** Producto final, lingotes de cobre. Fuente: BRONALCO LTDA



### 3.3.3. Normatividad Ambiental

La normatividad ambiental que rige en Colombia actualmente es el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual se fundamenta en normatividades y listados internacionales de RESPEL como: Catálogo Europeo de residuos, Listas de RESPEL de la EPA, Listas del Convenio de Basilea.

El Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, define a un residuo peligroso como:

*“Es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.*

*Los residuos sólidos que satisfacen cualquiera de los siguientes criterios son considerados peligrosos y están sujetos a reglamentación por parte de la EPA: - Poseen una o más de las siguientes características de peligrosidad: inflamabilidad, corrosividad, reactividad y toxicidad. - Están incluidos en una de las listas de residuos peligrosos de la EPA. - Son una mezcla de residuos peligrosos y no peligrosos listados sólo por una característica (por ejemplo: agua sucia mezclada con solventes orgánicos). - Proviene del tratamiento, almacenaje, o desecho de un residuo peligroso (por ejemplo: ceniza de incineración o polvo de control de emisiones). - Son tierra, agua subterránea, o sedimento (elementos ambientales)*

*contaminados con residuo peligroso. - Son objetos manufacturados, material vegetal o animal, o material geológico natural (ruinas) destinados a desecharse que contienen residuo peligroso (por ejemplo: concreto, ladrillos, equipo industrial, rocas y pasto).*

*Además, se considera residuo o desecho tóxico aquel que, al realizársele una prueba de lixiviación para característica de toxicidad (conocida como prueba TCLP) contiene uno o más de las sustancias, elementos o compuestos que se listan en la Tabla 2-1 (del Decreto 4741 de 2005), en concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles en el lixiviado establecidos en dicha tabla”.*

**Tabla 2-1** Máximas concentraciones permitidas en los lixiviados de TCLP EPA 1311.

Fuente: EPA 1311

<b>Máximas concentraciones permitidas en los lixiviados de TCLP (US. EPA)</b>	
<b>Metales</b>	<b>Concentración permisible (mg/L)</b>
<b>Zn</b>	----
<b>Cr</b>	5
<b>Pb</b>	5
<b>As</b>	5
<b>Cd</b>	1
<b>Ni</b>	----
<b>V</b>	----
<b>Ba</b>	100
<b>Sr</b>	----
<b>La</b>	----

---- No hay información disponible

De acuerdo al listado de la EPA no se encuentra las escorias de cobre clasificadas como residuo peligro, esto concuerda con en el listado Europeo de residuos donde no señalan a la escoria de cobre con \* (como señalan a los residuos peligros en dicha lista) de los

---

residuos de la termometalurgia del cobre como se observa en la figura 9-3, mostrada en la siguiente página.

**Figura 8-3** Listado de residuos termometalurgia del cobre. Fuente: catalogo europeo de residuos.

**10 06 Residuos de la termometalurgia del cobre**

- 10 06 01 Escorias de la producción primaria y secundaria
- 10 06 02 Granzas y espumas de la producción primaria y secundaria
- 10 06 03\* Partículas procedentes de los efluentes gaseosos
- 10 06 04 Otras partículas y polvos
- 10 06 06\* Residuos sólidos del tratamiento de gases
- 10 06 07\* Lodos y tortas de filtración del tratamiento de gases
- 10 06 09\* Residuos del tratamiento del agua de refrigeración que contienen aceites
- 10 06 10 Residuos del tratamiento del agua de refrigeración, distintos de los especificados en el código 10 06 09
- 10 06 99 Residuos no especificados en otra categoría

En España se lleva un adelanto al aprovechamiento de residuos en el sector de la construcción, gracias a que existe una normatividad técnica para caracterizar la conformidad de los residuos y a partir de esto determinar cuál debe ser su disposición final de acuerdo a su clasificación, del mismo modo a partir de los resultados se pueden establecer las metodologías de tratamiento o aprovechamiento, según sea el caso. La conformidad de los residuos se lleva a cabo a partir de la normatividad establecida dependiendo de ciertas características del material.

Para conocer e interpretar los resultados de impacto ambiental es necesario conocer las decisiones del concejo, en este caso nos confiere la DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002, DOCE L 11/27, donde se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

A continuación, se muestra el procedimiento que se debe realizar para clasificar los residuos a los vertederos establecidos

*“ PROCEDIMIENTO DE ADMISIÓN DE RESIDUOS EN LOS VERTEDEROS*

---

### *1.1. Caracterización básica*

*La caracterización básica es el primer paso del procedimiento de admisión y constituye la recogida de toda la información necesaria para eliminar el residuo de forma segura a largo plazo. La caracterización básica será obligatoria para cada tipo de residuo.*

*1.1.1. Las funciones de la caracterización básica son las siguientes:*

*a) información básica sobre el residuo (tipo y origen, composición, grado de homogeneidad, lixiviabilidad y, si es necesario y posible, otras propiedades características);*

*b) información básica para comprender el comportamiento de los residuos en los vertederos y las opciones de tratamiento que establece la letra a) del artículo 6 de la Directiva vertidos;*

*c) evaluación de los residuos con respecto a valores límite;*

*d) detección de las variables principales (parámetros críticos) para las pruebas de conformidad y opciones para la simplificación de ésta mediante una reducción significativa del número de componentes que deben medirse previa demostración de la información pertinente. La caracterización podrá servir para obtener proporciones entre la caracterización básica y los resultados de los procedimientos de prueba simplificados, así como la frecuencia de las pruebas de conformidad.*

*Si la caracterización básica de un residuo muestra que éste cumple los criterios para una clase de vertedero conforme a lo establecido en el punto 2 de este anexo, el residuo se considerará admisible en esa clase de vertedero. En caso contrario, el residuo no será admisible en esa clase de vertedero.*

*El productor del residuo o, en su defecto, la entidad responsable de su gestión, será responsable de garantizar que la información de caracterización sea correcta.*

*La entidad explotadora llevará un registro de la información exigida que deberá conservar durante un período que establecerá el Estado miembro.*

*1.1.2. Los requisitos fundamentales para la caracterización básica de los residuos son los siguientes:*

---

a) fuente y origen del residuo; b) información sobre el proceso de producción del residuo (descripción y características de las materias primas y de los productos); c) descripción del tratamiento aplicado de conformidad con lo dispuesto en la letra a) del artículo 6 de la Directiva vertidos, o una declaración de las razones por las que ese tratamiento no se considera necesario; d) datos sobre la composición del residuo y el comportamiento de lixiviación, si procede; e) aspecto del residuo (olor, color, forma física); f) código conforme a la lista europea de residuos (Decisión 2001/118/CE de la Comisión) (1), g) en lo que se refiere a los residuos peligrosos en caso de una entrada espejo: las características de peligrosidad pertinentes con arreglo al anexo III de la Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos (2); h) información que pruebe que el residuo no esté excluido en virtud de los criterios mencionados en el apartado 3 del artículo 5 de la Directiva vertidos; i) la clase de vertedero a la que puede admitirse el residuo; j) en su caso, precauciones adicionales que deben tomarse en el vertedero; k) comprobación de la posibilidad de reciclado o valorización del residuo.

#### 1.1.3. Realización de pruebas

Por regla general, los residuos deberán someterse a prueba para obtener la información arriba mencionada. Las pruebas deberán servir para conocer o determinar, además del comportamiento de lixiviación, la composición del residuo. Entre las pruebas que se utilicen para determinar la caracterización básica deberán figurar siempre las que deberán emplearse en las pruebas de conformidad.

El contenido de la caracterización, la amplitud de las pruebas de laboratorio necesarias y la relación entre la caracterización básica y las pruebas de conformidad dependerán del tipo de residuo. Puede diferenciarse entre: a) residuos generados de forma regular en un mismo proceso; b) residuos no generados de forma regular.

Las caracterizaciones descritas en las letras a) y b) aportarán información que podrá compararse directamente con los criterios de admisión de cada clase pertinente de vertedero y, además, podrán ofrecer información descriptiva (por ejemplo, las consecuencias de efectuar vertidos mezclados con residuos municipales).

a) Residuos de producción regular en un mismo proceso

---

*Se trata de residuos específicos y homogéneos que se generan de forma regular en un mismo proceso cuando: — la instalación y el proceso que generan el residuo son bien conocidos y los materiales de entrada en el proceso y el propio proceso están bien definidos, — la entidad explotadora de la instalación aporta toda la información necesaria e informa a la entidad explotadora del vertedero de los cambios en el proceso (especialmente los referidos al material de entrada en el proceso).*

*El proceso tendrá lugar normalmente en una única instalación. El residuo también podrá proceder de instalaciones diferentes si puede determinarse como un flujo único con características comunes dentro de límites conocidos (por ejemplo, cenizas de fondo de horno procedentes de la incineración de residuos municipales).*

*Para estos residuos, la caracterización básica incluirá los requisitos fundamentales correspondientes de la lista de el punto 1.1.2 y, en particular, los siguientes: — gama de composiciones de los residuos específicos, — gama y variabilidad de las propiedades características, — si procede, la lixiviabilidad de los residuos determinada mediante una prueba de lixiviación por lotes y/o una ensayo de percolación y/o una prueba de dependencia del pH, — principales variables que deberán someterse a prueba periódicamente.*

... “

#### *“ 1.2. Pruebas de conformidad*

*Cuando un residuo se considere admisible para una clase específica de vertedero atendiendo a la caracterización básica efectuada con arreglo al punto 1 se condicionará posteriormente a la realización de pruebas de conformidad para determinar si se ajusta a los resultados de la caracterización básica y cumple los criterios de admisión pertinentes con arreglo a lo establecido en el punto 2.*

*La función de las pruebas de conformidad es comprobar periódicamente flujos de residuos generados con regularidad.*

*Los parámetros pertinentes que se deberán comprobar serán los determinados en la caracterización básica y deberán estar relacionados con la información que se desprenda de ésta. Sólo será necesario examinar los parámetros críticos (variables principales) que determine la caracterización básica. El examen deberá demostrar que el residuo cumple los valores límite en lo que se refiere a los parámetros críticos.*

---

*Las pruebas efectuadas para comprobar la conformidad serán una o varias de las empleadas para la caracterización básica y deberá consistir en al menos una prueba de lixiviación con un lote. A este efecto se utilizarán los métodos enumerados en el punto 3.*

*Los residuos para los que no se exijan pruebas de caracterización básica en las letras a) y c) del punto 1.1.4, tampoco deberán someterse a una prueba de conformidad. No obstante, sí deberá comprobarse que se dispone de información de caracterización básica sobre ellos, distinta de la prueba*

*La prueba de conformidad se efectuará al menos una vez al año y, en cualquier caso, la entidad explotadora deberá garantizar que se efectúe en el grado y con la periodicidad que determine la caracterización básica.*

*Se llevará un registro de los resultados de las pruebas que deberá conservarse durante un período que determinará cada Estado miembro.” (DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002)*

Se establecen los criterios de admisión de los residuos a las respectivas clasificaciones en tablas de valores límites de lixiviación de acuerdo a los ensayos realizados con base en la norma Europea EN 12457-2, Characterization of waste- Leaching- Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges- Part 2: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10 l/Kg for materials with particle size below 4 mm (withot or with size resuction). De acuerdo a esto los residuos se pueden clasificar como: Inertes, no peligrosos y peligrosos de acuerdo a los valores límites establecidos.

## 4. Marco metodológico

### 4.1. Ubicación del proyecto

El presente proyecto se desarrolló en la región del Valle del Cauca, Colombia, dando como respuesta a la problemática del residuo escoria de cobre generado por la empresa BRONALCO LTDA, ubicada en el corregimiento la Dolores del municipio de Palmira como se puede observar en la figura 10-4.

**Figura 9-4** Ubicación planta BRONALCO LTDA



El trabajo experimental se realizó en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y el Sena Centro de la Construcción en la ciudad de Santiago de Cali. Algunos ensayos de caracterización de realizaron en los laboratorios de Tecnoparque nodo Cali y laboratorios de la Universidad del Valle (sede Melédez).

Los ensayos de la normatividad Europea (EN 12457-2) se realizaron en los laboratorios de ingeniería civil en la Universitat Politècnica Catalunya ubicada en la ciudad de Barcelona, España, por medio de un convenio de pasantía corta.

## 4.2. selección y caracterización de los materiales

Para el desarrollo de la presente investigación, se seleccionaron materias primas disponibles a nivel Regional, tales como:

### 4.2.1. Escoria de cobre

La escoria de cobre estudiada fue una muestra única generada en la empresa BRONALCO LTDA, de acuerdo a la bibliografía este material se llevó a molienda para disminuir su tamaño de partícula con el fin de ser analizada como material cementante o como agregado fino en morteros, en la figura 11-4 se muestra el diagrama metodológico aplicado a este material. De acuerdo con su clasificación por tamaño de partícula; ECG (escoria de cobre gruesa) con un tamaño de partícula entre 0,075 a 7,75 mm y ECF (escoria de cobre fina) con un tamaño de partícula inferior a 0,075 mm, se realizaron las caracterizaciones como material cementante y como agregado fino en morteros respectivamente, en la tabla 3-4, en la página siguiente, se muestran las técnicas y métodos utilizados de acuerdo a cada interés específico.

Figura 10-4 Metodología general.



**Tabla 3-4** Ensayos y método analíticos para cada material

<b>Material</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Método o Norma</b>
<b>ECF y CTO</b>	Composición química	Fluorescencia de rayos X
	Mineralogía	Difracción de rayos X
	Densidad Blaine	ASTM 204-84
	Distribución y tamaño de partícula	DTP
	Lixiviación Pb-Cu-Fe	Método EPA 1311
	PH-Conductividad Cloruros- Fluoruros- Sulfatos	EN 12457
<b>ECG y Arena</b>	Tamaño y distribución de partícula	NTC 77
	Densidad, absorción y porosidad	NTC 237
	Morfología	Microscopía electrónica de barrido
	PH-Conductividad Cloruros- Fluoruros- Sulfatos	EN 12457
<b>Mortero con ECF</b>	Resistencia mecánica a la compresión	ASTM C311
	PH-Conductividad Cloruros- Fluoruros- Sulfatos	EN 12457
<b>Mortero con ECG</b>	Resistencia mecánica a la compresión	NTC 220
	Lixiviación Pb-Cu-Fe	Método EPA 1311
	PH-Conductividad Cloruros- Fluoruros- Sulfatos	EN 12457

---

### **4.2.2. Cemento**

Para la preparación de morteros y como material de comparación de la ECF se utilizó cemento Portland tipo estructural o cemento tipo H (CTO) de acuerdo con la clasificación dada en la norma ASTM C 1157, el cual se caracteriza por ser un cemento de baja adición puzolánica, recomendado para realizar los ensayos de puzolanicidad establecidos en la norma ASTM C 311, las caracterizaciones realizadas se muestran en la tabla 3-4.

### **4.2.3. Agregado fino natural**

El agregado fino de comparación utilizado fue arena de río, ya que este es el material que más se utiliza a nivel Nacional, las caracterizaciones realizadas fueron las mismas utilizadas para caracterizar la ECG, los métodos y técnicas de ensayos se muestran en la tabla 3-4.

## **4.3. Métodos y técnicas analíticas**

A continuación, se muestran las técnicas analíticas utilizadas para la caracterización de los materiales utilizados en la presente investigación.

### **4.3.1. Caracterización química**

- **Fluorescencia de rayos x (FRX)**

La técnica utilizada para el análisis de composición química del CTO y la ECF fue fluorescencia de rayos X, utilizando un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X secuencial por longitud de onda dispersiva (WDXRF) marca PANalytical modelo AXIOS mAX, equipado con un tubo de Rodio con una potencia máxima de 4.0 KW, el software utilizado fue SuperQ versión 5.0L – Estándares de la base de datos OMNIAN, para análisis semicuantitativo y la detección de elementos desde el Sodio (Na) hasta el Uranio (U).

Cada muestra se secó a 107° C por 24h y luego se mezcló con cera Merck para análisis de FRX en relación 10:1 (10 gr de muestra y 1 gr de cera), la cual una vez homogenizada fue llevada a una prensa hidráulica a 196 KN generando una pastilla de 40 mm. El análisis de la muestra se realizó en un tiempo de 20 min.

**Figura 11-4** Espectrómetro de fluorescencia de rayos X, Laboratorio de Materiales Universidad del Valle.



### 4.3.2. Caracterización mineralógica

- **Difracción de rayos x**

Los compuestos cristalinos del CTO y la ECF se evidenciaron por medio de difracción de rayos X, el equipo utilizado fue un difractómetro de rayos X X'PertPanAnalytical MRD usando un tubo de  $\text{CuK}\alpha 1$ , a 45-kV, 40-mA, el caneo se hizo por 30 minutos en un rango de  $4\text{-}60^\circ$  de  $2\theta$ , utilizando el software PANalytical X'Pert Pro se determinaron las fases cristalinas, la fase amorfa de la ECF se calculó con el método DOC (degree of crystallinity)

### 4.3.3. Caracterización física

Para caracterizar físicamente los materiales estudiados se utilizaron diferentes técnicas dependientes del tamaño de partícula, tanto para el cemento y la ECF como para la ECG y la arena, a continuación, se muestran las descripciones de cada técnica.

---

- **Granulometría laser**

La determinación del tamaño promedio de partícula y la distribución del CTO y la ECF se realizó con un Granulómetro Laser Mastersizer 2000 de Malvern Instruments. Esta propiedad fue caracterizada con el fin de analizar la influencia del tamaño de partícula en los resultados de las evaluaciones de resistencia en los morteros y en los análisis ambientales.

**Figura 12-4** Equipo utilizado para Granulometría Láser. Universidad del Valle



- **Densidad**

Para calcular la densidad del CTO y la ECF se utilizó un picnómetro de Gay-Lussac para sólidos, se calculan varios pesos, M1 es el peso del picnómetro con agua, M2 el peso del picnómetro con la mitad del agua, después se agrega la muestra seca y se toma el peso M3, posteriormente se eliminan todas las burbujas de aire introduciendo el picnómetro en un desecador conectado a una bomba de vacío, finalmente se llena de agua el picnómetro con una jeringa hasta enrasar, se pesa M4. La masa del árido será  $M3-M2$ , y su volumen el del líquido que desaloja (o el cociente de su masa y densidad):  $(M3-M2)/(M4-M1)/\rho$ .

- **Análisis por tamizado de agregados finos**

Este ensayo se realizó con el fin de observar la distribución y tamaño de partículas de la ECG, con fines comparativos se realizó también la caracterización de la arena.

La metodología utilizada fue de acuerdo a la norma técnica Colombiana **NTC 77**, por la cual se calcula la distribución y tamaño de partícula, además del módulo de finura de los agregados, dato importante para realizar mezclas de morteros o concretos, debido a que

la distribución y tamaño de partícula influye en las propiedades físicas en estado fresco y en estado endurecido.

Se realiza un tamizaje por una serie de tamices descritos en la norma técnica, como se muestra en la figura 14-4, en la página siguiente, organizados por detrimento de abertura del tamiz, después se sometió a una vibración, quedando retenido un peso de la muestra en cada tamiz, y a partir de este dato se realizan los cálculos de interés, el módulo de finura se calculó con la ecuación (Ec.3.)

$$MF = \frac{\sum \%retenido\ acumulado}{100} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde MF es el módulo de finura, y  $\sum\%retenido$  acumulado es la sumatoria de los porcentajes de retenido acumulado.

**Figura 13-4** Serie de Tamices de acuerdo a la norma NTC 77 para finos



- **Peso específico**

El siguiente ensayo se realizó para calcular la densidad y la absorción de las partículas tanto de arena como de la ECG, este dato es de suma importancia para calcular el agua de mezcla.

El peso específico de los agregados se calcula de acuerdo a la metodología establecida en la norma técnica colombiana NTC 237, con la que se puede encontrar la densidad y la absorción de los agregados finos. La norma indica llevar a la muestra a un estado SSS o (S), que significa superficialmente seco, luego de lleva a un picnómetro en donde

se pesa con agua hasta la marca de volumen (C), se debe encontrar el peso seco de la muestra (A) y se realizan los cálculos tomando los pesos del picnómetro, y del picnómetro más agua (B). En la figura 15-4, en la siguiente pagina, se muestra el procedimiento del ensayo.

**Figura 14-4** Metodología NTC 237 para el cálculo de la densidad y absorción de agregado fino



- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La técnica de microscopía electrónica es capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. La imagen es procesada por un software especializado conectado al equipo principal. Antes de introducir la muestra al microscopio es necesario recubrirla con oro, en este caso, para que el material quede totalmente conductor, y de esta manera facilitarle al equipo los acercamientos. Esta técnica es importante para caracterizar el material morfológica, es una técnica complementaria, junto los ensayos de composición química y mineralógica

Los equipos utilizados fueron un recubridor para SEM, mostrado en la figura 17-4 y un microscopio electrónico de barrido NEOSCOPE 5000 mostrado en la figura 16-4, en ambos equipos se manejó internamente condiciones de vacío.

---

La muestra se secó a 60°C antes de ingresarla al recubridor para SEM, dejando la muestra con una capa milimétrica de oro para obtener una muestra totalmente conductora.

**Figura 15-4** Microscópio electrónico de barrido SEM



**Figura 16-4** Recubridor para el equipo SEM



#### 4.3.4. Elaboración de muestras de mortero

##### 4.3.4.1. Muestras de mortero con ECG como agregado fino

Para evaluar la ECG como agregado fino en morteros se utilizó una metodología de nivel descriptivo, con un diseño experimental unifactorial, tomando como factor al porcentaje (%) de sustitución de la proporción de arena de la mezcla de partida (A0), en la tabla 4-4 se muestran los prefijos definidos para cada porcentaje de sustitución.

**Tabla 4-4** Prefijos para cada sustitución

<b>Mezcla</b>	<b>% sustitución</b>
<b>A0</b>	0
<b>A12</b>	12,5
<b>A18</b>	18,75
<b>A25</b>	25
<b>A31</b>	31,25
<b>A37</b>	37,5
<b>A43</b>	43,75
<b>A50</b>	50

Para definir la dosificación de agua en cada mezcla se decidió trabajar con un flujo estable de acuerdo a los parámetros de norma NTC 111 (el cual es  $110 \pm 5$  % de fluidez.), con el fin de que la diferencia de contenido de agua demanda en las mezclas no afectara el análisis final de propiedades mecánicas y ambientales, después de realizar ensayos preliminares con las diferentes sustituciones, se encontraron las dosificaciones mostradas en la tabla 5-4 para cada nivel.

**Tabla 5-4** Dosificación de mezclas de morteros con ECG

<b>Mezcla</b>	<b>Cemento (g)</b>	<b>Arena (g)</b>	<b>Escoria (g)</b>	<b>Agua (g)</b>	<b>relación agua/cemento</b>
<b>A0</b>	900	2475	0	588,57	0,65
<b>A12</b>	900	2165,62	309,37	495	0,55
<b>A18</b>	900	2010,93	464,0625	504	0,56
<b>A25</b>	900	1856,25	593,75	461,68	0,51
<b>A31</b>	900	1701,56	773,43	495	0,55
<b>A37</b>	900	1546,8	928,12	477	0,53
<b>A43</b>	900	1392,19	1082,81	486	0,54
<b>A50</b>	900	1237,5	1237,5	451,79	0,50

#### **4.3.4.2. Muestras de mortero con ECF como puzolana**

Para elaborar las muestras de mortero para realizar el análisis de la ECF como puzolana, se utilizó el método establecido en la norma ASTM C311, dejando como referencia la dosificación del mortero referencia A0, en este caso se realizó la sustitución del 20% del contenido del cemento.

#### **4.3.5. Evaluación Mecánica**

Para la elaboración de cubos de mortero tanto de ECG como de ECF para su análisis de resistencia a compresión se realizaron las mezclas de acuerdo a la norma técnica Colombiana NTC 220, donde establece que las mezclas deben tener una fluidez de acuerdo a la norma NTC 111, cubos a la medida 5x5x5cm para realizar los ensayos a los 7 y 28 días de curado, en la figura 18-4 se muestra el método de mezcla de acuerdo a las normas mencionadas y los equipos utilizados.

**Figura 17-4** Mezcla y elaboración de cubos de mortero para ensayos mecánicos y ambientales.



Mezcladora



Mesa de flujo



Cámara de curado



A cada muestra se le determinó geoméricamente las dimensiones de base y altura con el fin de poder obtener el área de ensayo, posteriormente se procedió a ingresar el valor del área de ensayo con su respectiva muestra a la prensa hidráulica y así aplicar la carga axial a una velocidad de 0,25 MPa/s y una sensibilidad de 4 kN hasta el momento de la falla.

Se utilizó una Prensa hidráulica marca CONTROLS (canal 2) de referencia RIGID con código interno LAB-E-11, de resolución 0.01 KN, en la figura 19-4 se muestra un cubo de mortero sometido a compresión.

**Figura 18-4** Cubo de mortero ensayado a compresión



## **4.3.6. Análisis ambiental de lixiviados**

### **4.3.6.1. Norma Americana EPA 1311**

Este método corresponde al Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, APHA-AWWA\_WEF, 23 Edición, 2017 (EPA), correspondiente a métodos de la agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Después de realizar el análisis de composición química de FRX se decidió realizar el test TCLP, debido a que se encontraron constituyentes tóxicos como óxido de plomo y óxido de cobre (metales pesados). Con el fin de encontrar los componentes tóxicos en los lixiviados que puede generar el residuo en estudio y los materiales elaborados con estos morteros elaborados con la escoria ECG.

En este ensayo la extracción de los lixiviados se realizó en el laboratorio EIDENAR de la Universidad del Valle, después de extraídos se realizó una caracterización de los metales pesados por medio de un equipo de absorción atómica de llama en el laboratorio de Bio en las instalaciones de Tecnoparque Sena (Figura 20-4), las medidas se hacen de acuerdo a un blanco establecido para cada metal en estudio, posteriormente se realizan una serie de disoluciones, para encontrar la disolución adecuada se realizan ensayos previos.

**Figura 19-4** Equipo absorción atómica de llama



#### **4.3.6.2. Norma Europea EN 12457-2**

En el presente estudio se utilizó la norma Europea EN 12457-2, Characterization of waste-Leaching- Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges- Part 2: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10 l/Kg for materials with particle size below 4 mm (withot or with size resuction).

Para conocer e interpretar los resultados de impacto ambiental es necesario conocer las decisiones del concejo, en este caso nos confiere la DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002, DOCE L 11/27, donde se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

Este ensayo de lixiviación hace parte de uno de los ensayos de caracterización que se deben realizar a los residuos en España para ser clasificados, como; residuos inertes, residuos no peligrosos o residuos peligros, de acuerdo a los criterios.

Para realizar el proceso de lixiviación , se someten las muestras a el equipo giratorio para generar un estado de difusión entre la fase solida (muestra) y liquida (agua desionizada) que se muestra en la figura 21-4, posteriormente el ensayo de lixiviación se realiza en dos etapas, una donde se miden los Ph y la conductividad de cada muestra, este análisis se realiza por medio de la técnica de cromatografía liquida (HPLC) donde se analizan los contenidos de fluoruros cloruros y sulfatos (figura 22-4), y la segunda etapa donde se

analizan los metales pesados por medio del ensayo IPC (Inductively Coupled Plasma) o espectrómetro de plasma. Para el presente estudio se realizó la primera etapa en el laboratorio de ingeniería civil de la Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona

**Figura 20-4** Equipo giratorio



**Figura 21-4** Cromatógrafo



## 5. Resultados

### 5.1. Caracterización

#### 5.1.1. Composición química

En las tablas 6-5 se presentan las composiciones químicas del cemento y la ECF, donde se observa que la escoria estudiada está compuesta principalmente por  $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ - $\text{CuO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , superando en contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  al cemento.

**Tabla 6-5** Composición química y características físicas del CTO y la ECF. Fuente:  
Elaboración propia

Composición química (% en peso)		
Compuesto	Cemento	ECF
$\text{SiO}_2$	36,52	54,161
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,74	10,816
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,05	4,86
$\text{MgO}$	1,38	0,753
$\text{CaO}$	46,31	10,654
$\text{Na}_2\text{O}$	0,238	2,707
$\text{K}_2\text{O}$	0,191	0,369
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,133	0,209
$\text{SO}_3$	2,38	0,664
$\text{CuO}$		3,926
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,013	
$\text{ZnO}$		9,104
$\text{PbO}$		1,093
$\text{SrO}$	0,147	
otros	0,3715	0,684
LOI	5,52	1,81
Propiedades Físicas		
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	3,116	3,051
Partículas <45 $\mu\text{m}$	100%	91,8%

---

Sin embargo, el cemento presenta mayor contenido de CaO. En contraste con otros estudios, en algunos casos las escorias se encuentran mayoritariamente compuestas por sílice (Rozendaal A. and Horn Richard, 2013; Potysz Anna et. Al, 2018) mientras que otros presentan mayoritariamente contenidos de hierro (Gorai B. and Premchand J., 2003), también se puede dar el caso de composiciones cercanas (Feng Y. et. Al, 2019), esto puede variar de acuerdo al proceso de obtención, temperatura de enfriamiento, y procedencias geológicas del material fundido. Las densidades calculadas para el cemento y para la ECF muestran valores similares entre sí.

Según el catalogo europeo de residuos, de acuerdo con los resultados obtenidos de composición química se le otorgan las siguientes clasificaciones siendo \* lo que lo hace un residuo peligroso, debido a que la escoria contiene Oxido de plomo (PbO) en un 0.57%, esto indica que tiene 5700 ppm lo que equivale a decir 5,7 g de compuesto por 1Kg de escoria.

De acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas, revisión 3 adaptada para Colombia-DANE la escoria analizada es un desecho peligroso porque tiene como constituyente **Y31 Plomo, compuestos de plomo.**

### 5.1.2. Mineralogía

Mineralógicamente se diferencian en las fases mostradas en las figuras 23-5 y 24-5, donde se observa que el cemento estudiado muestra compuestos principales como silicatos tricálcicos, silicatos bicálcicos, calcita, y yeso. La escoria analizada está compuesta principalmente por minerales como leucita (aluminio silicato potásico) y piroxeno (silicato-ferro magnésico), se encontró que la ECF tiene un porcentaje de fase amorfa de 45,8%, lo que indica que posee un importante porcentaje reactivo, siendo un material con un potencial importante para usarse como adición en la fabricación de cemento.

Figura 22-5 DRX del CTO. Fuente: Elaboración propia

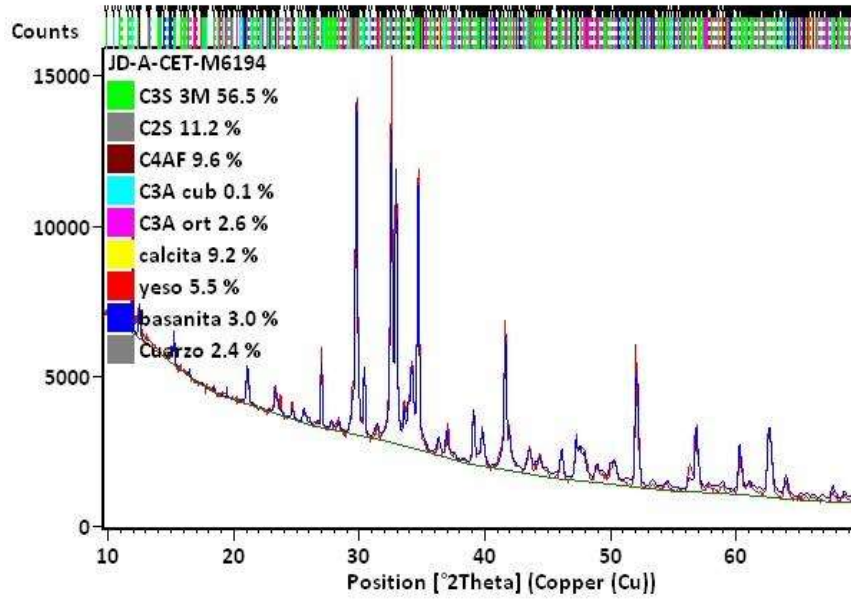
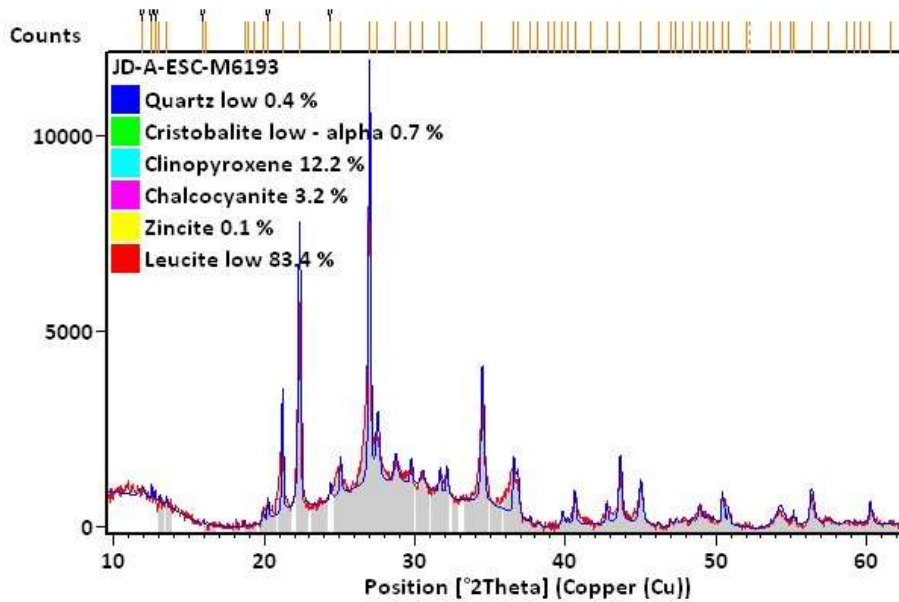


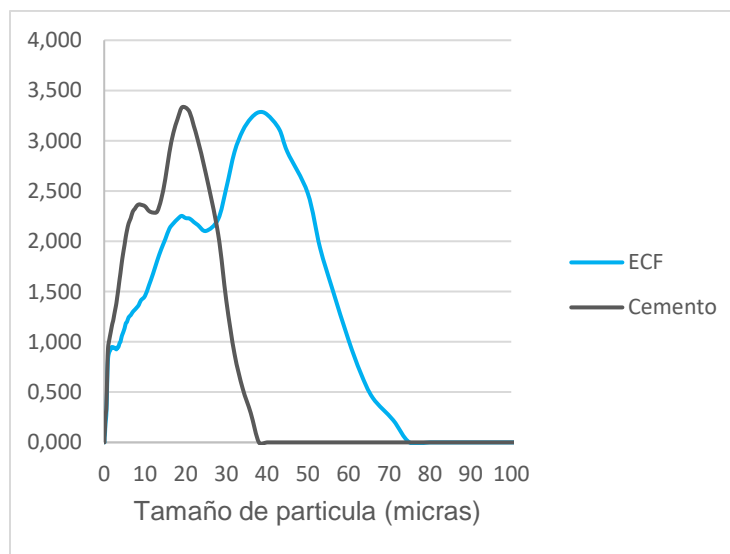
Figura 23-5 DRX de la escoria de cobre secundaria fina (ECF). Fuente: Elaboración propia



### 5.1.3. Granulometría y gravedad específica

En la figura 25-5 se observa la distribución de tamaño de partícula de la ECF y el cemento, donde se observa que el D50 del cemento es de 7 $\mu$ m mientras que el de la ECF es de 13  $\mu$ m, la DTP de la ECF muestra que se tiene una gran fracción de las partículas con tamaño mayor al del cemento.

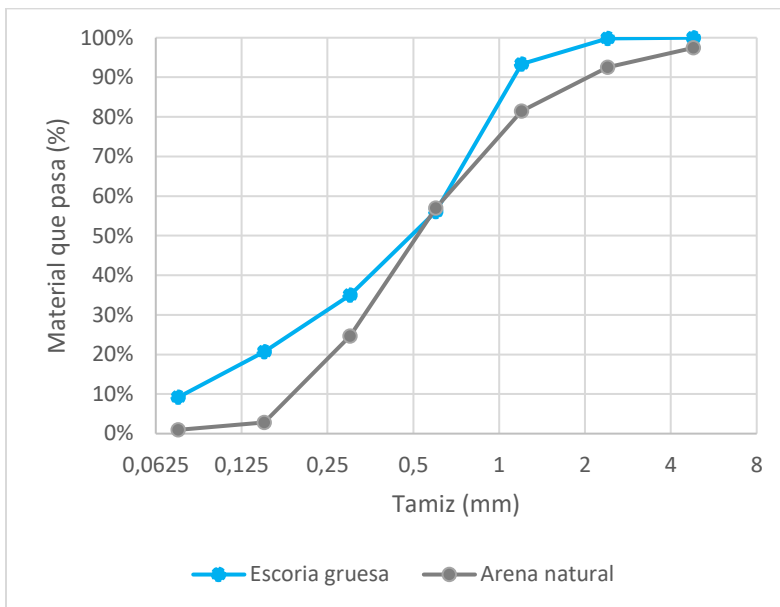
**Figura 24-5** Distribución de tamaño de partícula (DTP) de la ECF del CTO Fuente:  
Elaboración propia.



A continuación, en la figura 26-5 se muestra la granulometría de la escoria y la arena, donde se puede observar que la escoria presenta más partículas finas que la arena, lo que se puede ver reflejado en el módulo de finura (tabla 7-5), sin embargo, presentan comportamiento similar en la distribución de los tamaños de partícula.

En la tabla 7-5 se muestran los resultados obtenidos de las características físicas gravedad específica de la arena y la ECG de acuerdo a la norma NTC 237, donde se observa una diferencia notable entre el % de absorción de la arena y la escoria, de igual manera la escoria muestra una mayor densidad que la arena, aunque no con una diferencia significativa.

**Figura 25-5** Granulometría de la EC y la arena utilizada



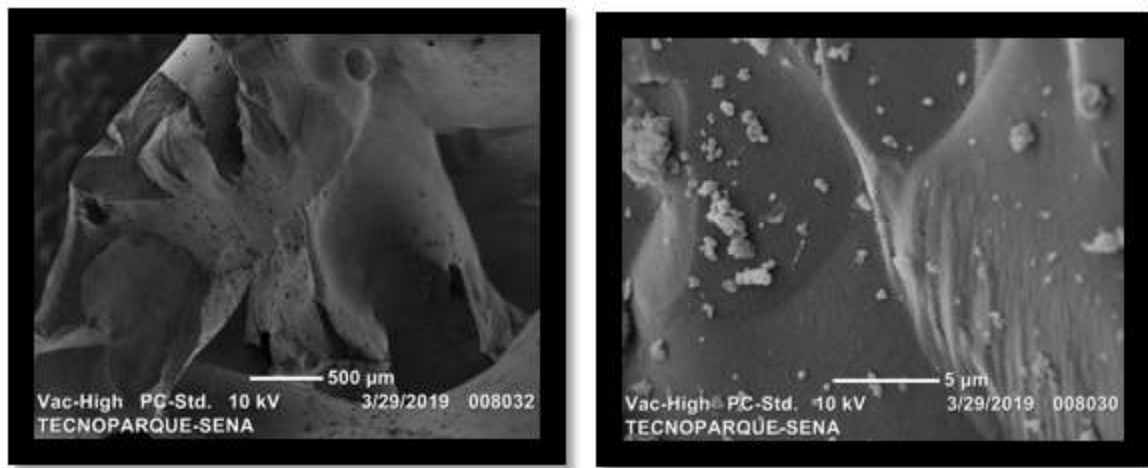
**Tabla 7-5** Gravedad específica y módulo de finura de la arena y la ECG. Fuente:  
Elaboración propia.

Propiedad	Arena	ECG
<b>Ds Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,84	2,54
<b>Ds Nominal (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,07	2,59
<b>Absorción (%)</b>	2,69	0,77
<b>Módulo de finura</b>	2,44	1,95

### 5.1.4. Morfología

En la figura 27-5 se muestran las fotografías tomadas por el microscopio electrónico de barrido en diferentes aumentos, donde se puede observar la morfología de la escoria estudiada, se observa que las muestras tienen una forma angular y de baja porosidad.

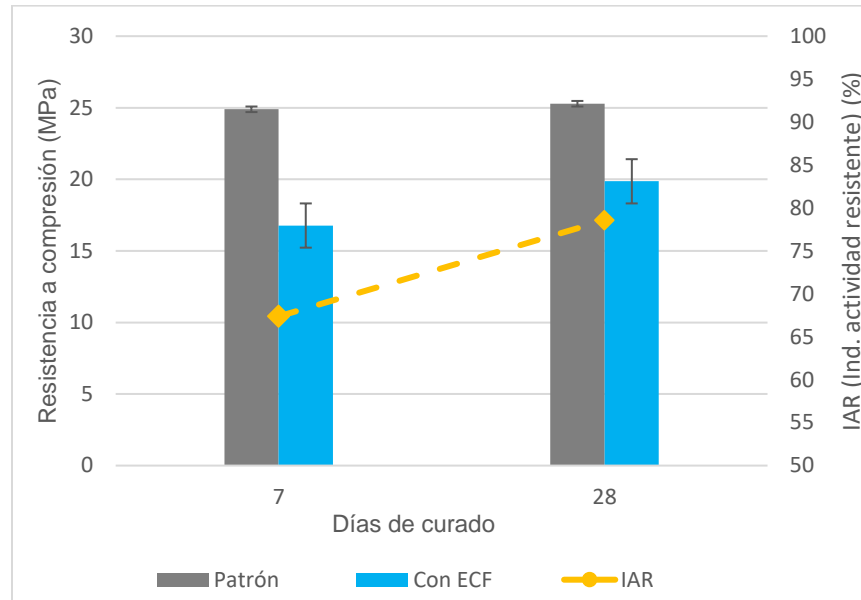
**Figura 26-5** Fotografías SEM tomadas a la ECG. Fuente: Elaboración propia



## 5.2. Evaluación de actividad puzolánica de la ECF

En la figura 28-5 se presenta el índice de actividad por resistencia (IAR) y la resistencia de los morteros ensayados a 7 y 28 días de curado de acuerdo a la norma donde se observa que los morteros con ECF ensayados a los 7 días de curado presentan un 67,37% de resistencia frente al mortero patrón, mientras que a los 28 días de curado los morteros ensayados cumplen con el requerimiento mínimo de resistencia del 75% de acuerdo a la norma ASTM C311, esta caída de resistencia a la edad de 7 días se pudo ver afectada por el contenido de metales pesados en la ECF que retrasa el proceso de hidratación en el cemento (Zain et al., 2004).

**Figura 27-5** Resistencia a compresión de morteros ensayados de acuerdo a la norma ASTM C311. Fuente: Elaboración propia



En la tabla 8-5 se muestran los comparativos de los requerimientos físicos y químicos de la ECF estudiada, donde se observa que en los requerimientos químicos cumplen como los requisitos máximos de  $\text{SO}_3$  (%), Contenido de humedad, y pérdida por ignición. La suma de los óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se encuentra muy cercano al mínimo que pide la norma ASTM C618. Esto indica que la ECF presenta potencial para ser utilizada como adición puzolánica de acuerdo con su composición química y su comportamiento mecánico conforme a evaluaciones realizadas por otros autores que estudian esta propiedad en diferentes residuos (Silva Urrego Y.F. et al., 2017).

Edwin R. et al 2016 estudiaron escorias de cobre secundarias con procesos de enfriado rápido y lento, encontrando que las escorias con enfriado lento cumplieron con el IAR mientras que las de enfriado rápido no.

De acuerdo con estudios sobre actividad puzolánica en escorias de cobre se ha encontrado que la ECF secundaria no causa efectos adversos como puzolana, evaluándose por otro método como frattini (Edwin R. S. et.al, 2017), sin embargo, se puede mejorar

modificándose con CaO (Feng Y. et. Al, 2019) o realizando activación alcalina para alcanzar mejores resultados (Nazer A. et.al, 2016).

**Tabla 8-5** Propiedades químicas y físicas de la ECF de acuerdo con la norma ASTM C 618. Fuente: Elaboración propia

Requerimientos	Puzolana, ASTM C618	ECF
<b>Requerimientos químicos</b>		
<b>SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	Min, 70,0	69,84
<b>Trióxido de azufre, SO<sub>3</sub> (%)</b>	Max, 4,0	0,66
<b>Contenido de humedad (%)</b>	Max, 3,0	0,0
<b>Pérdida por ignición (%)</b>	Max, 10,0	1,81
<b>Requerimientos físicos</b>		
<b>Índice de actividad de resistencia a los 28 días, porcentaje de control</b>	Min, 75	78,56

### 5.3. Evaluación mecánica de la ECG como agregado fino

A continuación, en la tabla 9-5 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación mecánica de resistencia a compresión de los morteros elaborados, donde se observa que después del 50% de sustitución los morteros empiezan a perder resistencia, resultado que concuerda con lo obtenido por el autor (Al jabri 2006), A los 28 días las resistencias se muestran con una tendencias estable alrededor de 27 Mpa con las sustituciones entre 12,5% y 37,75%, estos resultados concuerdan con los obtenidos con investigaciones donde se pueden realizar sustituciones hasta de un 40% (M.A.G Dos Angos et al,2017 ; Al Jabri KS. Et al, 2011; Vijayaraghavan J. et al, 2017), sin embargo, para la sustitución de 43,75% se observa un aumento de resistencia a compresión, lo que llevó a realizar los análisis de lixiviados a las mejores sustituciones, por su mayor porcentaje y mayores resistencias (mezclas A37 y A43).

**Tabla 9-5.** Resultados de resistencia a compresión morteros sustituidos con ECG como agregado fino

Mezcla	Resistencia	$\sigma$	Resistencia	$\sigma$
	a		a	
	compresión		compresión	
	7 días		28 días	
	(Mpa)		(Mpa)	
<b>A0</b>	24,89	1,52	25,28	1,34
<b>A12</b>	24,48	3,55	27,02	1,74
<b>A18</b>	24,76	1,11	27,03	1,15
<b>A25</b>	22,49	2,72	27,37	1,20
<b>A31</b>	21,43	6,16	24,46	1,40
<b>A37</b>	25,58	2,47	27,71	1,54
<b>A43</b>	17,26	0,80	29,18	1,54
<b>A50</b>	0,21	0,12	15,09	0,12

## 6. Evaluación ambiental

### 6.1. Análisis de lixiviados epa 1311

En la tabla 10-6 se muestran los resultados del análisis ambiental realizado a la escoria y a las mezclas de mortero con mayor porcentaje de sustitución que presentaron los mejores resultados en la evaluación técnica (resistencia a compresión), se puede observar que los niveles de lixiviados de plomo en la escoria son considerablemente elevados, para las dos mezclas A37 y A43 se presenta un encapsulamiento de los metales pesados evaluados, bajando los niveles de lixiviación después del tratamiento por debajo de los límites para plomo y cobre, debido a que los resultados se encuentran por debajo de los límites permisibles de acuerdo a la norma EPA 1311 mostrados en la figura. En contraste con un estudio realizado a escorias de cobre autores como (Khorasanipour M. y Esmaeilzadeh E., 2016) encontraron que los principales contaminantes de la escoria analizada fueron As, Mo, Co, Cu y Fe.

**Tabla 10-6** Resultado de análisis de TCLP para plomo (Pb), hierro (Fe) y cobre (Cu) en la escoria de cobre y los morteros elaborados. Fuente: Elaboración propia.

<b>Muestra</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>
	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
EC	826	1,878	55,958
A37	0,132	0	0
A43	0,03	0	0
<b>Limite permisible EPA</b>	5	NA	NA

---

## 6.2. Ensayos de lixiviación norma en 12457-2.

Para realizar los ensayos de lixiviados de acuerdo a la norma EN 12457-2 se realizó una nueva signatura en algunos de los materiales a analizar, en este caso se evalúa la escoria en sus dos tamaños de partícula, el cemento, el mortero patrón, mortero con la mayor sustitución de ECG como agregado y por último el mortero con la sustitución de ECF como puzolana.

**Tabla 11-6** Signatura para los materiales estudiados

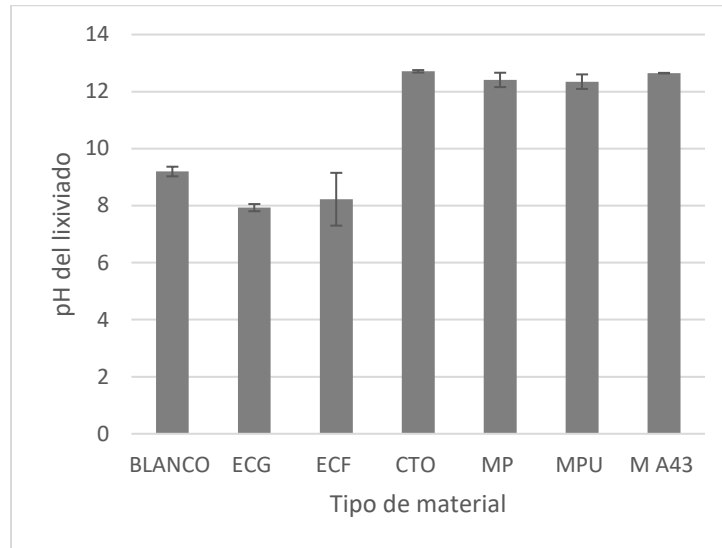
material	signatura
<b>Escoria de cobre fina</b>	ECF
<b>Escoria de cobre gruesa</b>	ECG
<b>Cemento</b>	CTO
<b>Mortero patrón</b>	MP
<b>Mortero con sustitución de arena por escoria gruesa (43,75%)</b>	MA43
<b>Mortero con sustitución de cemento por escoria fina (20%)</b>	MPU

A continuación se muestran los resultados obtenidos de Ph, conductividad y HPLC,. Los resultados de HPLC se muestran graficados con los valores límites de cada ítem de la norma utilizada.

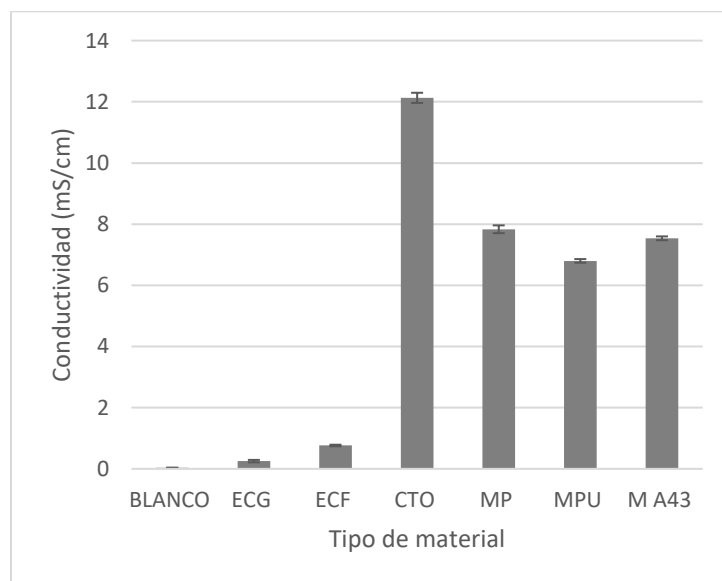
En la figura 29-6 se muestran los resultados obtenidos de Ph, donde se observa que la ECF y ECG presentan Ph cercano al blanco, lo que implica que su lixiviado no es ácido ni básico. Por otro lado, el CTO, el MP, el MPU y el MA43 presentaron Ph cercanos a 12, lo que indica que su lixiviado tiende a ser básico, esto se puede atribuir principalmente al hidróxido de calcio (pH~12) producido en las reacciones de hidratación del cemento, de igual manera a los componentes minoritarios de álcalis en el cemento. En los resultados obtenidos en las

medidas de conductividad (figura 30-6) el CTO presenta la mayor conductividad debido al mayor contenido de sulfatos, seguidos de los morteros.

**Figura 28-6** PH de lixiviados de los materiales estudiados. Fuente: Elaboración propia



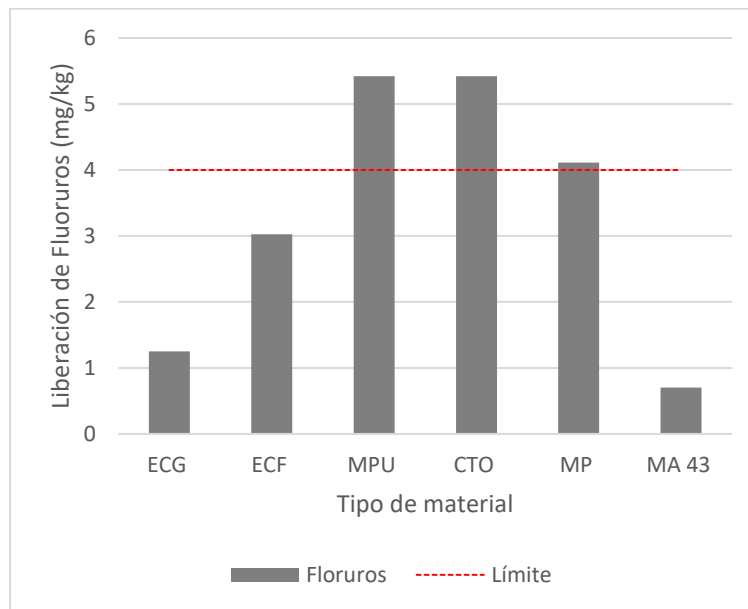
**Figura 29-6** Conductividad de los materiales estudiados. Fuente: Elaboración propia



Los resultados de HPLC se muestran graficados con los valores límites de residuos inertes de acuerdo a la DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002, DOCE L 11/27.

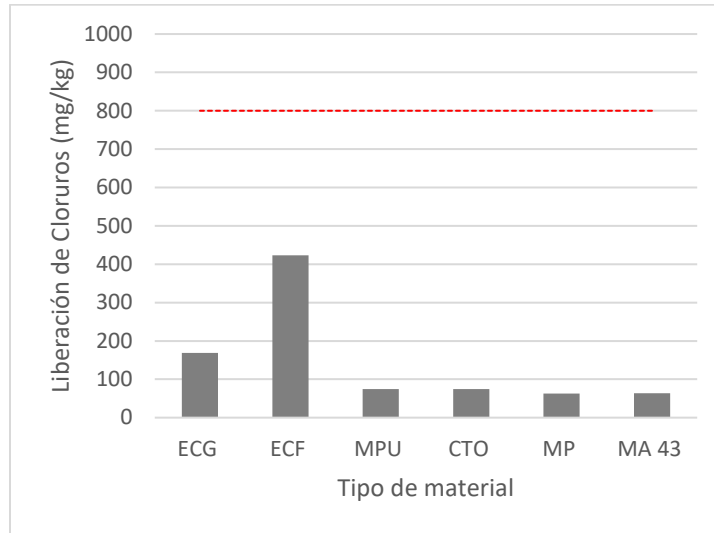
En la figura 31-6 se puede observar que las muestras que sobrepasan el límite establecido son las muestra de CTO, MPU y MP que pasa un poco el límite, lo que puede indicarnos que a mayor contenido de escoria se puede presentar una inhibición de reacciones del cemento que llevan a una lixiviación de fluoruros, sin embargo, también se observa que a menos tamaño de partícula de la EC se presenta mayor lixiviación de fluoruros, este fenómeno se da por que a mayor superficie especifica de las partículas se presenta un mayor contacto con el líquido y por tanto aumenta la liberación de contaminantes.

**Figura 30-6** Fluoruros que contienen las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia

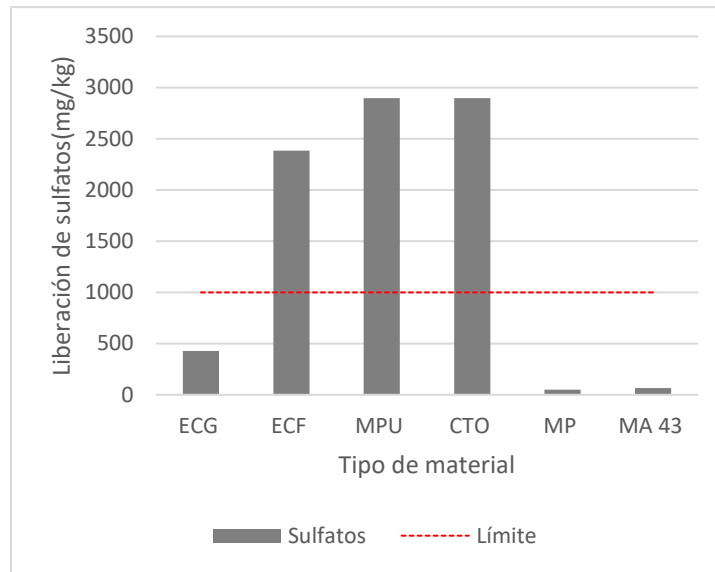


Los resultados de HPLC para cloruros muestran que todas las muestras estudiadas están por debajo de los límites como se muestra en la figura 32-6.

**Figura 31-6** Cloruros que contienen las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia



En la figura 33-6 se observa que el CTO, la ECF y el MPU sobrepasan los límites establecidos para liberación de sulfatos, la liberación de sales en el cemento se explica por su composición química, en la EC se observa que a mayor finura mayor liberación de sulfatos, como lo es en el caso de la ECF, en el caso del mortero MPU se puede atribuir al contenido de ECF que no reaccionó como puzolana en las reacciones de hidratación con el cemento. La influencia del tamaño de partícula también fue encontrada en un estudio realizado por los autores (Vítková M. et al, 2011).

**Figura 32-6** Sulfatos que contienen las muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12-6 se muestra los análisis de aceptación de los materiales en los vertederos establecidos, la clasificación puede ser; materiales inertes, materiales peligrosos y materiales no peligrosos. De acuerdo a los resultados obtenidos ninguno de los, materiales clasifica como peligroso según los análisis de lixiviados de HPLC. Un dato relevante es que la ECG clasifica como residuo inerte, sin embargo, es importante aclarar que este análisis es una parte del análisis ambiental de la normativa debido a que se deben analizar los metales pesados por medio de la técnica de IPC (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente). De igual manera se observa que todos los materiales analizados no sobrepasan los límites establecidos de cloruros y de fluoruros, sin embargo, la ECF, MPU y el cemento sobrepasan el límite de material inerte para clasificar como material no peligroso. Esto nos lleva a determinar que tanto la es ECG como la ECF no son materiales peligrosos, además se puede dar un valor como materia prima como agregado fino y material puzolánico respectivamente.

**Tabla 12-6** Análisis de clasificación de los materiales estudiados de acuerdo a DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002. Fuente: Elaboración propia

<b>Muestra</b>	<b>Fluoruros</b>	<b>Límite</b>	<b>Cloruros</b>	<b>Límite</b>	<b>Sulfatos</b>	<b>Límite</b>	<b>Inerte</b>	<b>no peligroso</b>
<b>ECG</b>	1,3	10	168,8	800,0	427,6	1000,0	cumple	
<b>ECF</b>	3,0	10	422,8	800,0	2383,6	1000,0		cumple
<b>MPU</b>	5,4	10	74,3	800,0	2897,5	1000,0		cumple
<b>CTO</b>	5,4	10	74,3	800,0	2897,5	1000,0		cumple
<b>MP</b>	4,1	10	63,0	800,0	49,7	1000,0	cumple	
<b>MA 43</b>	0,7	10	63,4	800,0	66,4	1000,0	cumple	

---

## 7. Conclusiones

Se logró determinar mediante los diferentes estudios y técnicas de análisis que la EC estudiada es posible utilizarla en el sector de la construcción tanto como agregado fino en mezclas de mortero y como material puzolánico, de aquí se derivan las siguientes conclusiones:

De acuerdo con los resultados obtenidos de resistencia a compresión, la ECG aporta hasta un 15,8 % de su resistencia inicial realizando sustituciones desde 12% hasta 43% en peso de la arena natural de los morteros estudiados, lo que indica que es el máximo porcentaje recomendado de sustitución en agregados finos, reduciendo pasivos ambientales que genera la explotación de agregados naturales. los resultados concuerdan con los obtenidos de diferentes investigadores como Al Jabri 2006; 2009ab y Cendoya (2007).

De acuerdo con el análisis de los requerimientos físicos y químicos de la ECF como puzolana de acuerdo a la norma ASTM C 618, esta cumple con la mayoría de los requerimientos, aunque se encuentra muy cercano al límite mínimo sugerido por la norma de composición de óxidos de sílice, alúmina y hierro. La ECF cumple con el IAR a pesar de que la finura del material se encuentre por encima de la del cemento, es posible que al hacer una molienda conjunta (Clinker- ECF-otros) se pudiera potencializar el efecto químico del material, de acuerdo a esto se puede concluir que es posible valorizar ECF como material puzolanico, disminuyendo los pasivos ambientales a causa del proceso de explotación y sinterización del Clinker en la fabricación del cemento.

De acuerdo con la Normatividad EPA 1311 la EC es un residuo peligroso, sin embargo, después de mezclada en el mortero hasta un contenido de 43, 75%, esta queda encapsulada y el método de estabilización de los metales pesados Pb y Cu es efectivo.

La evaluación ambiental de lixiviación de acuerdo a la norma EN 12457-2 (primera fase) demostró que la ECG clasifica en primera instancia como material inerte, estando por debajo de los límites establecidos de la normatividad europea, mientras que la ECF clasificó como material no peligroso. Se encuentra que el tamaño de partícula afecta la lixiviación de contaminantes, resultando que entre mayor finura liberación.

### **Agenda Futura:**

Adicionalmente a los análisis realizados en el presente estudio, se adelantan los estudios de ICP (Espectroscopia de Plasma Inductivo) de los lixiviados estudiados por la norma europea EN-12457-2 (segunda fase), donde se buscan lixiviados de metales pesados de las muestras.

## **8. Difusión del conocimiento**

La investigación realizada en el desarrollo de la presente tesis, permitió obtener los siguientes productos académicos como estrategia de difusión del conocimiento y de los resultados logrados:

### **Proyecto de Investigación:**

Díaz Rosero, Yessica Dayana; (2019). Valoración de escorias de bronce y cobre. Proyecto de Investigación. Contrato de Prestación de Servicios, Yumbo, febrero, 11 – noviembre, 8. Contratante: BRONALCO LTDA. Asesor Académico: Luis Octavio González Salcedo (Anexo 1).

### **Ponencias:**

Díaz R., Yessica Dayana; González S., Luis Octavio; (2019). Aprovechamiento de escoria de fundición de cobre (catalogada como residuo peligroso) como agregado fino en morteros y su evaluación técnico-ambiental. Poster, 8º Congreso Internacional por el Desarrollo Sostenible y el Medio Ambiente – Cambio Climático desde las perspectivas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS, Manizales, octubre 23-24, Universidad de Manizales (Anexo 2).

Díaz R., Yessica Dayana; González S., Luis Octavio; (2019). Estudios previos para valorización de escoria de fundición de cobre como materia prima en elementos de construcción. Ponencia, 4º Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Cali, noviembre 6-8, Universidad Autónoma de Occidente (Anexo 3).

Díaz R., Yessica Dayana; (2020). Socialización de resultados de las movilidades internacionales FIA 2019-2020. Ponente, evento temático. (Anexo 4)

---

**Pasantía Internacional de Investigación:**

Díaz Rosero, Yessica Dayana; (2019). Estancia de trabajo final de Master. Pasantía Internacional de Investigación, Barcelona, noviembre 20 – diciembre 23, Universitat Politècnica de Catalunya. Supervisores: Marilda Barra Bizinotto, Diego Aponte. Director: Luis Octavio González Salcedo (Anexo 5).

**Artículo científico:**

Díaz Rosero, Yessica Dayana; González Salcedo, Luis Octavio; Díaz Rosero, Jherson Eveiro; (2020). Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica. Informador Técnico. Artículo sometido (Anexo 6).

---

## 9. Referencias

ASTM International (2017). Standard Specification for coal fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-17). West Conshohocken, PA.

ASTM International (2017). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete (ASTM C311-17). West Conshohocken, PA.

Al Jabri, K.S., (2006). Copper slag as fine aggregate for high performance concrete. High Perform. Struct. Mater. III 1, 381e389.

Al-Jabri, K. S., Al-Saidy, A. H., & Taha, R. (2011). Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. Construction and Building Materials, 25(2), 933–938.

Al-Jabri, K.S., Hisada, M., Al-Oraimi, S.K., Al-Saidy, A.H., 2009a. Copper slag as sand replacement for high performance concrete. Cem. Concr. Compos. 31, 483e488.

Al-Jabri, K.S., Hisada, M., Al-Saidy, A.H., Al-Oraimi, S.K., 2009b. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. Construct. Build. Mater. 23, 2132e2140.

Aguilar, C., Nazer, A., Pavez, O. Y Rojas, F. (2010): "Una revisión de los usos de las escorias de cobre", IBEROMET XI, X CONAMET/SAM 2 al 5 de noviembre de 2010, Viña del Mar, CHILE

Aparicio C. A. (2014). Uso de material reciclado de la industria del cobre en la producción de concreto (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana Cali, Santiago de Cali, Colombia.

Barra Bizzinotto M, Aponte D.F., Valls del Barrio S., Vázquez E. (2011). Impacto ambiental en el ámbito de los materiales de construcción. A: Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins. "Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins". Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona.

Bastos, A.M., Cachim, P. & Resende, C, P. (2008)."Copper Slag Mortar Properties," Materials Science Forum, vol. 587-588, 2008, pp. 862-866.

---

Behnood, A., Meyer, C. & Shi, C. (2008). "Utilization of copper slag in cement and concrete," Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, 2008, pp. 1115-1120

Carrasco Correa, P. R. (2017). Propuesta de reciclaje de la escoria de cobre de la fundición ventanas de CODELCO, para mitigar el impacto ambiental.

Cendoya, p. (2009). Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. Ingeniare (Chile). 17 (1): 85-94.

Dyer T D and Dhir R K, 2001. Chemical reactions of glass cullet used as a cement component. Journal of Materials in Civil Engineering 13 (6), 412–417.

DOCE L 11/27. DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002. Criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

Dos Anjos, M. A. G., Sales, A. T. C., & Andrade, N. (2017). Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete. Journal of Environmental Management, 196, 607–613.

Edwin R. S., De Schepper M. Gruyaert., Elke D.B N. (2016). Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar, 119, 31-44.

European Standard EN 12457-2, Characterization of waste- Leaching- Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges- Part 2: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10 l/Kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction).

Feng Y., Yang Q., Chen Q., Kero J., Andersson A., Ahmed H., Engstrom F., Samuelsson C. (2019). Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO. Journal of cleaner production, 232, 1112-1120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.062>

Gavali H. R., Bras A., Faria P., Ralegaonkar R. V. (2019). Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes, 215, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.152>

---

Gorai, B., Jana, R.K., & Premchand. (2003). "Characteristics and utilization of copper slag-a review," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 39, 2003, pp. 299-313

ICSG, (2015). *The World Copper Factbook 2015*. International Copper Study Group, Lisbon, Portugal, 64 pp.

Kern, A., Madsen, I.C. and Scarlett, N.V.Y. (2012) *Quantifying amorphous phases. Uniting Electron Crystallography and Powder Diffraction*. Editors: Kolb, U., Shankland, K., Meshi, L., Avilov, A. & David, W. Springer. 434 pages. ISBN: 978-94-007-5585-7

Khorasanipour M. and Esmailzadeh E.(2016). Environmental characterization of Sarcheshmeh Cu-smelting slag, Kerman, Iran: Application of geochemistry, mineralogy and single extraction methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 166, 1-17.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.03.015>

Kirkham, R. R., Tyler, S. W., & Gee, G. W. (1985). Analysis of leachate production in closed hazardous waste landfills. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/236570168\\_Analysis\\_of\\_leachate\\_production\\_in\\_closed\\_hazardous\\_waste\\_landfills](https://www.researchgate.net/publication/236570168_Analysis_of_leachate_production_in_closed_hazardous_waste_landfills)

Limbachiya M C, Leelawat T and Dhir R K, 2000. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures* 33 (9), 574–580.

Macías A., Goñi S., Guerrero A., Fernández E. (1999). Inmovilización/solidificación de residuos tóxicos y peligrosos en matrices de cemento. *Materiales de construcción*.49, 254,5-16.

<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/446/494>

Mavroulidou, M., Liya, N., 2015. Properties of Concrete Containing Waste Copper Slag as a Fine Aggregate Replacement, pp. 3e5.

Mirhosseini, S. R., Fadaee, M., Tabatabaei, R., & Fadaee, M. J. (2017). Mechanical properties of concrete with Sarcheshmeh mineral complex copper slag as a part of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 134, 44–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.02>

Murmu, A. L., & Patel, A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>

---

Nazer, A., Pavez O., Rojas, F., Aguilar C (2010). 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).

Nazer A., Payá M., Borrachero M. V., Monzó J. (2016). Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices. *Journal of environmental management*, 167,115-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.024>.

Orizola, S. (2006). Uso de escoria de cobre en cementos". Tesis Ingeniería Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago- 2006, 84 págs.

Oyarzún Kneer, Iván Alejandro. (2013) "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013, página 15

Paine K A, Dhir R K and Doran V P, 2002. Incinerator bottom ash: engineering and environmental properties as a cement bound paving material. *International Journal of Pavement Engineering* 3 (1), 43–52

Paine K A and Dhir R K, 2010a. Research on new applications for granulated rubber in concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Construction Materials* 163 (1), 7–17.

Pavelka, C., Loehr, R. C., & Haikola, B. (1993). Hazardous waste landfill leachate characteristics. *Waste Management*, 13(8), 573¿580. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(93\)90017-Q](https://doi.org/10.1016/0956-053X(93)90017-Q)

Peña, C. Se vuelve a hablar de cobre. En: Mundo Minero [online], Enero 4 de 2013,. Disponible en: <http://mundominero.com.co/se-vuelve-ahablar-de-cobre/>

Potysz A., Kierczak J., Pietranik A., KadziolkaK.(2018). Mineralogical, geochemical, and leaching study of historical Cu-slugs issued from processing of the Zechstein formation (Old Copper Basin, southwestern Poland). *Applied Geochemistry*. 98, 22-35. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.08.027>

---

Rajasekar A., Arunachalam K., Kottaisamy M. (2019). Assessment of strength and durability characteristics of copper slag incorporated ultra high strength concrete, 208, 402-414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.118>

Raposeiras, A. C., Vargas-Cerón, A., Movilla-Quesada, D., & Castro-Fresno, D. (2016). Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 119, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.081>

Reyes, Pedro; Sánchez, Mario Y Valenzuela, Armando (2010): "Opciones para el manejo y comercialización de escorias de cobre". Primer workshop de Reciclaje y Recuperación de metales y materiales, Santiago, Abril 2010.

Rojas F. (2004). Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis Ingeniería. Civil Metalúrgico. Univ. de Atacama, Facultad de Ingeniería. Atacama, 165 p.

Romero, L. G; Vargas, M. (2009). Informe final: desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización / solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica Tecnología en Marcha, Vol. 22, N.º 2, 79-90.

Rozendaal A., Horn R. (2013). Textural, mineralogical and chemical characteristics of copper reverb furnace smelter slag slag of the Okiep Copper District, South Africa. *Minerals Engineering*. 52, 184-190. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.020>

Sánchez, Norma (2007). El marco lógico. Metodología para la planificación, , seguimiento y evaluación de proyectos. *Visión Gerencial*, (2), 328-343. [fecha de Consulta 31 de Mayo de 2020]. ISSN: 1317-8822. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=4655/465545876012>

Sharma, R., & Khan, R. A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 151, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.031>

---

Silva Urrego, Y. F., Gordillo, M., & Delvasto Arjona, S. (2017). Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de morteros. *Informador Técnico*, 81(1), 44-54. <https://doi.org/10.23850/22565035.719>

Singh, J., & Singh, S. P. (2019). Development of Alkali-activated Cementitious Material using Copper Slag. *Construction and Building Materials*, 211, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.233>

Soria F.(1983).Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales de construcción*. Vol 33. 190-191, 69-84. Recuperado de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/974/1027>

Spry, N (2003).Blocks in Gloucestershire - A survey. (2003). *Industrial Archaeology*, pp. 36 – 58

Teresa Ponte Iglesias, M. (1990). EN TORNO A LA PROHIBICION DE EXTRACCION DE ARIDOS EN EL TRAMO INTERNACIONAL DEL RIO MIÑO. *Revista Española De Derecho Internacional*, 42(1), 321-324. Retrieved May 4, 2020, from [www.jstor.org/stable/44297359](http://www.jstor.org/stable/44297359)

Tixier, R., Devaguptapu, R., Mobasher, B., 1997. The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures. *Cem. Concr. Res.* 27, 1569e1580.

UPME, (2018). Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular. Documento de análisis internacional. Universidad industrial de Santander-Unidad de planeación minero energética. Recuperado de : <http://www.andi.com.co/Uploads/ Documento%20Análisis%20Internacional.pdf>

Vijayaraghavan, J., Jude, A. B., & Thivya, J. (2017). Effect of copper slag, iron slag and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of concrete. *Resources Policy*, 53, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.06.01>

Vítková M., Ettler V., Mihaljevic M., Sebek O. (2011). Effect of simple preparation on contaminant leaching from copper smelting slag. *Journal of Hazardous Materials*, 197, 417. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.102>

---

Whyte A, Dyer T D and Dhir R K, 2005. Best practicable environmental option (BPEO) for recycling demolition waste. *Achieving Sustainability in Construction*, Ed. R K Dhir, T D Dyer and P C Hewlett, Thomas Telford Publishing, London, pp. 245–252.


Zain M. F. M., Islam M.N., Radin S. S., Yap S.G. (2004). Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. *Cem. Concr.Compos.* 26, 845-851.  
<https://doi.org.10.1016/j.cemconcomp.2003.08.002>

Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.152>.

## ANEXOS

## ANEXO 1

Página 1 de 3

  
**BRONALCO LTDA.**  
Consultoría Ambiental, Ingeniería y Construcción

## CONTRATO DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS.

Entre los suscritos a saber **BRONALCO LTDA.**, identificada con Nit. 900.236.680-7 ubicada en la Calle 2 # transversal 0 – 100 en la Zona Industrial La Dolores, del municipio de Palmira, departamento del valle del cauca, con números de contacto (2)6669003 – 6669214, quien en adelante se denominará **EL CONTRATANTE**, por una parte y por la otra la señora **YESSICA DAYANA DIAZ ROSERO**, identificada con cedula de ciudadanía 1.144.045.877, ubicado en calle 48 NO. 97-36 del municipio de Santiago de Cali, departamento del valle del cauca, quien en adelante se denominará **EL CONTRATISTA**, realizará el trabajo contratado con sus propios medios y con libertad y autonomía técnica y directiva, lo que de acuerdo con el artículo 34 de C.S.T. Y el artículo 3 del D.L. 2351/65, lo caracteriza como verdadero patrono, no representante ni intermediario de otra persona natural o jurídica. **EL CONTRATANTE** tiene derecho a reclamar sobre un adecuado resultado acerca del trabajo realizar el proyecto de investigación (valorización de escorias de bronce y cobre) de la empresa **BRONALCO LTDA.**, y la implementación de este. En el evento de que la obra no esté terminada a juicio **EL CONTRATANTE** dará un plazo prudencial de (03) tres meses para terminar el proyecto. Si sigue así se dará por terminado el contrato. El presente contrato se registrará por las siguientes cláusulas:

**PRIMERA: EL CONTRATISTA se obliga a realizar las siguientes actividades:**

1. Cumplir el objeto del contrato, ejecutando y entregado la investigación contratada de acuerdo con los criterios de calidad exigibles la entrega de informes productos de la investigación, resultados de ensayos de laboratorio con su respectivo análisis.
2. Respeto al derecho de autor en caso de participar en eventos de divulgación o publicación científicas. En el caso de participación en eventos de divulgación o publicación científicas, la ponencia y/o artículo dará los respectivos créditos en los cuales se mencionará que los resultados obtenidos hacen parte del proyecto de investigación objeto de este contrato. En todos los casos, no se publicará información sensible de la empresa (secretos profesionales, indicadores de producción, comercialización y ventas, datos laborales).
3. Indemnizar y/o asumir todo daño que se cause a terceros a bienes propios o de terceros o al personal contratado para la ejecución del contrato, por causa o con ocasión del desarrollo de este.
4. El contratista será el encargado y único responsable de entregar los informes productos de la investigación y los resultados de ensayos de laboratorio con su respectivo análisis con referencia a las condiciones contratadas. El **CONTRATISTA** realizará la entrega al **CONTRATANTE**, de los informes mensualmente hasta el término del cumplimiento final del contrato.
5. Se encargará de gestionar los laboratorios donde se realizarán los ensayos.

*Calle N 2 No. Transversal 0-100 Zona Industrial La Dolores. (Palmira – valle).  
Teléfono 6669003 - 6669214. Cel. 3187068933.*

## ANEXO 2



Manizales, 9 de octubre de 2019

Señor (a):  
Yessica Dayana Diaz Rosero

Cordial saludo

Es muy grato para nosotros informarle que su poster **"Aprovechamiento de escoria de fundición de cobre (catalogada com"** fue aceptado para ser presentada en el 8° Congreso Internacional por el Desarrollo Sostenible y el Medio Ambiente – Cambio Climático desde las perspectivas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible –ODS–, el cual se realizará los días 22, 23 y 24 de octubre en la ciudad de Manizales.

Las dimensiones con las que se debe presentar el poster es de 80cm de ancho por 100cm de alto y siguiendo la siguiente estructura:

Para la presentación de trabajos en proceso se requiere un resumen de 600 palabras el cual debe contener las siguientes características del poster:

- Título de la investigación
- Autores con filiación institucional (máximo 3)
- Problema que se está enfrentando
- Principales postulados teóricos que soportan el estudio
- Avances y resultados preliminares

Adicionalmente se les recuerda que el pago de los costos de asistencia y participación (\$70.000) puede efectuarse hasta el 22 de octubre de 2019, día de apertura del evento. Se puede realizar en la tesorería de la Universidad de Manizales o en la cuenta bancaria Bancolombia, cuenta corriente No. 70550137737 No. de Convenio para pago en sucursales Bancolombia No. 25423. Se hará revisión previa de dicho soporte al ingresar al evento.

Cualquier inquietud o duda al respecto estaremos prestos a solucionarla.

Cordialmente,

**IRMA SOTO VALLEJO**

Directora comité Académico Congreso  
Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo –CIMAD  
congresomads@umanizales.edu.co

Secretaría de Facultad  
Facultad de Ingeniería y Administración  
Sede Palmira



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

Palmira, 16 de Octubre de 2019

[P.SFIA-0726-19]

Estudiante  
**YESSICA DAYANA DÍAZ ROSERO c.c. 1.144.045.877**  
Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental  
Sede Palmira

**Asunto:** Aval Académico.

Cordial saludo:

El Consejo de Facultad de Ingeniería y Administración en su sesión No.21 de Octubre 16 de 2019, teniendo en cuenta la solicitud presentada mediante oficio s/n del 15 de Octubre de 2019, acordó **aval académicamente** su participación en el "8° CONGRESO INTERNACIONAL POR EL DESARROLLO SOSTENIBLE Y EL MEDIO AMBIENTE - CAMBIO CLIMÁTICO DESDE LAS PERSPECTIVAS DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE-ODS", con la presentación de la ponencia titulada: "**Aprovechamiento de escoria de fundición de cobre (catalogada como residuo peligroso) como agregado fino en morteros y su evaluación técnico-ambiental**".

El evento se llevará a cabo del 22 al 24 de Octubre de 2019, Organizado por la Universidad de Manizales, en la ciudad de Manizales - Caldas.

Cordialmente,

**HARLEN GERARDO TORRES CASTAÑEDA**  
Secretario de Facultad  
Facultad de Ingeniería y Administración

Copia: Prof. Luis Octavio González, Departamento de Ingeniería.  
Archivo.

200  
**AÑOS** Bicentenario

[Página 1 de 1]  
Elaboró: Diana B.

Carrera 32 No. 12 - 00 Vía Candelaria  
Torres Administrativa, Primer Piso  
Conmutador: (57-2) 2868888 Ext. 35101  
Palmira, Valle del Cauca, Colombia  
secacadfia\_pal@unal.edu.co

Proyecto  
**cultural y colectivo**  
de nación.



# APROVECHAMIENTO DE ESCORIA DE FUNDICIÓN DE COBRE (CATALOGADA COMO RESIDUO PELIGROSO) COMO AGREGADO FINO EN MORTEROS Y SU EVALUACIÓN TÉCNICO-AMBIENTAL



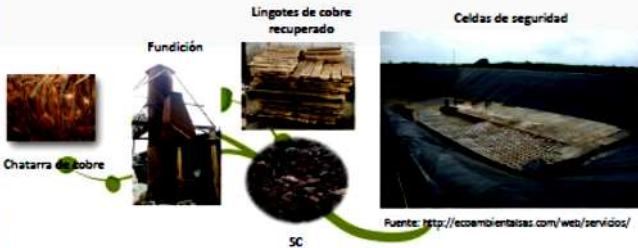
Autores: Yessica Dayana Díaz R. <sup>1</sup> Luis Octavio Gonzalez S. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante Ms. Ingeniería Ambiental Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira [ydiatzr@unal.edu.co](mailto:ydiatzr@unal.edu.co)

<sup>2</sup> Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira [logonzalezsa@unal.edu.co](mailto:logonzalezsa@unal.edu.co)

## PROBLEMA

La escoria de cobre (SC) es un residuo industrial perteneciente al grupo de las escorias no ferrosas y es generada durante el proceso de producción de ánodos de cobre. BRONALCO LTDA genera aproximadamente 3 toneladas diarias de SC, la falta de aprovechamiento de escorias da como consecuencia la acumulación excesiva de residuos metálicos en celdas de seguridad que son un sistema de control-seguro diseñado para disponer sustancias potencialmente peligrosas para la salud humana y el ambiente.



## METODOLOGÍA

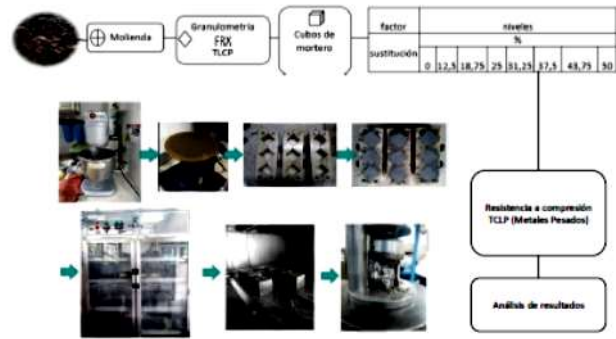


Fig 1. Métodos utilizados para la mezcla de morteros y ensayos (NTC 220) , método utilizado para mesa de flujo (NTC 111)

POSTULADO TEORICO	AUTORES
Estudió la SC como agregado fino en el concreto, encontrando que después del 50% se va reduciendo la resistencia a compresión.	Al jabri et al (2006)
Revelaron que hasta el 40% de reemplazo como agregado fino en morteros y concretos de SC incrementa propiedades en fresco como la trabajabilidad, y propiedades en estado endurecido como la resistencia a compresión, densidad, resistencia a absorción de agua.	(M.A.G Dos Angos et al,2017 ; Al Jabri et al,2009 ab; Al Jabri KS. Et al, 2010; Vijayaraghavan J. et al, 2017).
Encontró que una sustitución del 100% como agregado fino en el concreto aumentó un 20% de resistencia a compresión en comparación con el concreto patrón, mejorando también trabajabilidad y reducción de absorción de agua superficial.	Al jabri et al (2009b)
Investigó la factibilidad de producción de concreto autocompactante con un reemplazo del 100% de SC, incorporando metakaolin(MK) para incrementar características de durabilidad.	Sharma and Kan (2018)

## AVANCES DE RESULTADOS

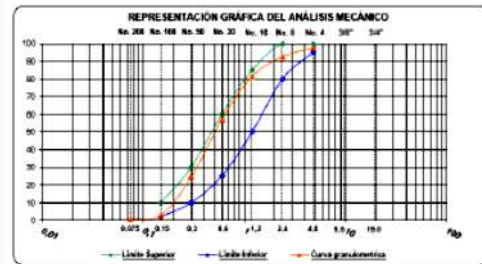


Fig 2. Método utilizados para determinar granulometría arena (NTC 77)

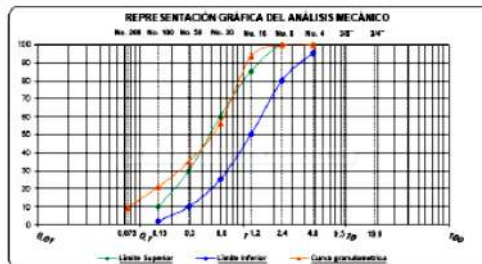


Fig 3. Método utilizados para determinar granulometría SC (NTC 77)

Código Externo	Escoria de Cobre
Oxido	Kg/Kg
MgO	0.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.89
SiO <sub>2</sub>	55.92
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25
SO <sub>3</sub>	0.16
Cl	0.07
K <sub>2</sub> O	0.45
CaO	12.46
TiO <sub>2</sub>	0.70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04
MnO	0.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.67
NiO	0.03
Cu <sub>2</sub> O	12.04
ZnO	2.96
Rb <sub>2</sub> O	0.00
SrO	0.05
SnO <sub>2</sub>	0.11
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01
PbO	0.57

Tabla 1 . Composición química por FRX

Mezcla	Resistencia a compresión 7 días prom(Mpa)	$\sigma$	Resistencia a compresión 28 días prom(Mpa)	$\sigma$
A0	24.89	1.52	25.28	1.34
A12	24.48	3.55	27.02	1.74
A18	24.76	1.11	27.03	1.15
A25	22.49	2.72	27.37	1.20
A31	21.43	6.16	24.46	1.40
A37	25.58	2.47	27.71	1.54
A43	17.26	0.80	29.18	1.54
A50	0.21	0.12	15.09	0.12

Tabla 2 . Resistencia a compresión morteros

Muestra	Pb mg/L	Fe mg/L	Cu mg/L
Escoria de cobre	826	1,878	55,958
A37	0.132	0	0

Tabla 3. Método utilizados para determinar lixiviados de metales pesados (EPA 1311)

## REFERENCIAS

- Al Jabri, K.S., 2006. Copper slag as fine aggregate for high performance concrete. High Perform. Struct. Mater III 1, 361-369. <https://doi.org/10.2485/HPSM06037>.
- Al-Jabri, K.S., Hizada, M., Al-Oraimi, S.K., Al-Saidy, A.H., 2009b. Copper slag as sand replacement for high performance concrete. Cem. Concr. Compos. 31, 483-488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.007>.
- Al-Jabri, K.S., Hizada, M., Al-Saidy, A.H., Al-Oraimi, S.K., 2009a. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. Construct. Build. Mater. 23, 2132-2140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.013>.
- Dos Anjos, M. A. G., Sales, A. T. C., & Andrade, N. (2017). Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete. *Journal of Environmental Management*, 196, 607-613. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.032>
- Sharma, R., & Khan, R. A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 151, 179-192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.051>
- Vijayaraghavan, J., Jute, A. B., & Thiya, J. (2017). Effect of copper slag, iron slag and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of concrete. *Resources Policy*, 53, 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.06.011>

## ANEXO 3



Facultad de Ciencias Básicas y Ambientales / PBX: 318 80 00 Ext. 11439  
Calle 25 No. 115- 85 Cali (Colombia) / lacastano@uao.edu.co

## CARTA DE RESPUESTA DE RESUMEN DE PONENCIA

Santiago de Cali, 09 de Octubre de 2019

Apreciado  
Yessica Diaz  
Universidad Nacional de Colombia

ASUNTO: Resumen de ponencia

De mi mayor consideración:

Aprovecho la oportunidad para saludarlo/a y comunicarle que su resumen de ponencia al 4º Congreso Nacional de Ciencias Ambientales “Estudios previos para valorización de escoria de fundición de cobre como materia prima en elementos de construcción”, ha sido APROBADO para presentarse en el Eje Temático Ciencia y Tecnología para el Control de la Contaminación.

Debe tener en cuenta las siguientes observaciones:

- No hay referencias bibliográficas.
- No se presentan resultados parece una investigación en ejecución.
- ¿Cómo se relacionan con las tecnologías para la descontaminación?

La Presidencia y el Comité Organizador del 4º Congreso Nacional de Ciencias Ambientales les da la bienvenida y los espera en el campus de la Universidad Autónoma de Occidente del 6 al 8 de noviembre del año en curso.

Las inscripciones se encuentran abiertas. Cómo inscribirse:

<https://congresocienciasambientalesrcfa.org/evento/congreso-rcfa-inscripcion/>

Felicitemos su participación en nuestro evento y expedimos la presente carta para los fines pertinentes.

Atentamente:

Elizabeth Muñoz  
Coordinadora Comité Académico  
4º Congreso Nacional de Ciencias Ambientales





# Estudios previos para valorización de escoria de fundición de cobre como materia prima en elementos de construcción

Yessica Dayana Diaz R., Luis Octavio González S.

Estudiante Ms. Ingeniería Ambiental Universidad Nacional de Colombia, Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia (sede Palmira).



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA



Centro de la  
**Construcción**  
Regional-Valle



## CERTIFICADO DE PONENCIA

La Red Colombiana de Formación Ambiental y la Universidad Autónoma de Occidente, certifica que:

### YESSICA DAYANA DIAZ ROSERO

Identificada con cédula de ciudadanía N. 1144045877, adscrita a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se presentó en calidad de ponente en el **4to Congreso Nacional de Ciencias Ambientales**, con el trabajo "Estudios previos para valorización de escoria de fundición de cobre como materia prima en elementos de construcción." presentado en el eje temático "Ciencia y Tecnología para el Control de la Contaminación." en modalidad oral..

A solicitud del interesado para constancia, se firma en Santiago de Cali a los ocho días del mes de noviembre de 2019.

José A. Lozano Irarte  
Presidente  
Red Colombiana de Formación Ambiental

Elizabeth Muñoz  
Coordinadora Académica Comité Académico  
4 Congreso Nacional de Ciencias Ambientales  
Universidad Autónoma de Occidente

---

**ANEXO 4**

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
SEDE PALMIRA

CERTIFICAN QUE

***YESSICA DAYANA DIAZ ROSERO***

*IDENTIFICADO CON C.C. 1144045877*

*PARTICIPÓ COMO PONENTE EN EL EVENTO TEMÁTICO*

**Socialización de resultados de las movilidades internacionales FIA  
2019 – 2020**

REALIZADO DEL 09 DE JULIO AL 09 DEL JULIO DE 2020 EN LA CIUDAD DE PALMIRA .

DADO EN PALMIRA, EL 09 DE JULIO DE 2020.

## ANEXO 5



Barcelona, 7 de octubre de 2019

Estimado Yessica Diaz,

Con ánimo y satisfacción escribo esta carta de apoyo para su periodo de estancia en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA) en Barcelona - España. Estoy animada con la posibilidad de que se una a nuestro grupo de investigación en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), y por la oportunidad de colaborar en las investigaciones que abordan la utilización de residuos para generar materiales sostenibles y durables.

El plan de trabajo que se ha planteado es acorde al tiempo de estancia, como también adecuado y bien definido. Tengo la certeza de que usted será capaz de realizar los trabajos planteados y llegar a buen fin con los objetivos previstos en el plan de trabajo.

La Universitat Politècnica de Catalunya tiene una excelente reputación, siendo reconocida mundialmente por sus investigaciones y educación, sobre todo en el área de ingeniería. El Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental trabaja dentro de la Escuela de Caminos Canales y Puertos que está clasificada entre los mejores programas que ofrecen investigación en ingeniería en el país.

Su periodo de estancia de 45 días, que se prevé entre los meses de noviembre y diciembre es correcto.

Atentamente,

Dra. Marilda Barra Bizinotto  
Profesora DECA

Dr. Diego Aponte  
Investigador DECA

Universitat Politècnica de Catalunya  
Campus Nord, Edif B1, Of 109.  
C/ Jordi Girona, 1-3. C.P. 08034  
Tel: (+34)93401 1827  
e-mail: [marilda.barra@upc.edu](mailto:marilda.barra@upc.edu)  
[Diego.fernando.aponte@upc.edu](mailto:Diego.fernando.aponte@upc.edu)

Secretario de Facultad  
Facultad de Ingeniería y Administración  
Sede Palmira



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

Palmira, 16 de Octubre de 2019

[P.SFIA-0727-19]

Estudiante  
**YESSICA DAYANA DÍAZ ROSERO c.c.1.144.045.877**  
**Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental**  
Sede Palmira

**Asunto:** Aval Académico.

Cordial saludo:

El Consejo de Facultad de Ingeniería y Administración en su sesión No.21 de Octubre 16 de 2019, teniendo en cuenta la solicitud presentada mediante oficio s/n del 15 de Octubre de 2019, acordó **aval académicamente** el plan de trabajo de la **estancia investigativa** a realizar en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en la ciudad de Barcelona- España; la estancia sería de 45 días entre los meses de Noviembre y Diciembre de 2019.

La estancia se realiza con el ánimo de contribuir a los resultados y productos de la Tesis de Maestría titulada: "**Valorización de escorias de acería (EAF) como cementante y agregado en elementos constructivos**", con el acompañamiento del Investigador Dr. Diego Aponte.

Finalmente, el aval académico se otorga con el fin de participar en la Convocatoria Nacional para el apoyo a la Movilidad Internacional de la Universidad Nacional de Colombia.

Cordialmente,

**HARLEN GERARDO TORRES CASTAÑEDA**  
Secretario de Facultad  
Facultad de Ingeniería y Administración

Copia: Prof. Luis Octavio González, Departamento de Ingeniería.  
Archivo.

20  
**AÑOS** Bicentenario  
0

[Página 1 de 1]  
Elaboró: Diana B.

Carrera 32 No. 12 - 00 Vía Candelaria  
Torres Administrativa, Primer Piso  
Commutador: (57-2) 2868888 Ext. 35101  
Palmira, Valle del Cauca, Colombia  
secacadfia\_pai@unal.edu.co

Proyecto  
**cultural y colectivo**  
de nación.



Barcelona, 27 de enero de 2020

Estimado

**Dr. Luis Octavio González Salcedo**  
Profesor Asociado  
Universidad Nacional de Colombia  
Sede Palmira.

La presente es con el fin de certificar que, la estudiante, *Yessica Dayana Diaz Rosero* ha realizado una estancia relacionada con su trabajo final de Máster bajo la supervisión del Dr. *Diego Aponte* y la Dra. *Marilda Barra Bizinotto*, en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona - España). Durante su estancia, la estudiante ha realizado campañas experimentales relacionadas con la caracterización química, mineralógica y ambiental de escorias de cobre y morteros.

Igualmente, mencionar que la estudiante tuvo la oportunidad de asistir como oyente a la parte final del curso "Utilización de Residuos en la Construcción", como también de asistir a una visita técnica a una planta de reciclaje de residuos (Germans Cañet Xirgut) ubicada en Girona.

Atentamente,

**Dra. Marilda Barra Bizinotto**  
Profesora DECA  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Campus Nord, Edif B1, Of 109.  
C/ Jordi Girona, 1-3. C.P. 08034  
Tel: (+34) 93 401 1827  
e-mail: [marilda.barra@upc.edu](mailto:marilda.barra@upc.edu)  
[diego.fernando.aponte@upc.edu](mailto:diego.fernando.aponte@upc.edu)

**Dr. Diego Aponte**  
Investigador DECA



## **Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica**

### ***Characterization of secondary copper slag and evaluation of its pozzolanic activity reaction***

Yessica Dayana Diaz Rosero<sup>1</sup>, Luis Octavio González Salcedo<sup>2</sup>, Jherson Eveiro Diaz Rosero<sup>3</sup>.

1 Universidad Nacional de Colombia sede Palmira (Colombia), correo: ydiazr@unal.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7225-8604>.

2 Universidad Nacional de Colombia sede Palmira (Colombia), correo: logonzalezsa@unal.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-003-2460-6106>.

3 Universidad del Valle (Colombia), correo: jhersondiaz@hotmail.com ; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2885-9365>

#### **Resumen**

En la presente investigación se presenta la caracterización de una escoria de cobre secundaria (EC) generada por una empresa ubicada en la región del Valle del Cauca Colombia para su posible uso como adición al cemento. Se realiza su caracterización física por medio de un análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP), caracterización química por medio de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX), caracterización mineralógica por medio de la técnica difracción de rayos X (DRX), y finalmente, se evalúa la actividad puzolánica de la EC utilizando el método establecido en la norma ASTM C 311 por medio del índice de actividad por resistencia (IAR). Se encontró que la ECF cumple con las condiciones químicas para clasificarse como puzolana (ASTM C618) y con las condiciones de resistencia según ASTM C311 y ASTM C618 con un IAR de 67,37% a 7 días y 78,56% a 28 días. Se encontró también, que los principales componentes mineralógicos de la EC son leucita y piroxeno, y que el porcentaje de fase vítrea de la escoria es 45,8%.

**Palabras claves:** Puzolana, escoria de cobre, residuo industrial, aprovechamiento de residuos, morteros de matriz cementicia.



## ANEXO 6

The screenshot shows a web browser window with the URL `revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/submissions`. The page is titled "Envíos" (Submissions) and features a dark blue sidebar on the left with the logo of "SENA Sistema de Bibliotecas Portal de Revistas". The main content area has a header with "Tareas 0" and a language selector set to "Español (España)". Below the header, there are tabs for "Mi lista" and "Archivos", and an "Ayuda" button. The main section is titled "Mis envíos asignados" and includes a search bar with the text "Buscar" and a "Nuevo envío" button. A single submission is listed with the ID "2696", the author "Yessica Diaz", and the title "Characterization of secondary copper slag and evaluation of its pozzolanic activity ...". The submission status is "Revisión" (Review), and there is a "0/1" indicator. A dropdown arrow is visible on the right side of the submission row. At the bottom right of the page, it says "Platform & workflow by OJS / PKP".

Informador Técnico Tareas 0 Español (España) Ver el sitio ydiazr

SENA Sistema de Bibliotecas Portal de Revistas

Envíos

Envíos

Mi lista Archivos Ayuda

Mis envíos asignados Buscar Nuevo envío

2696 Yessica Diaz Revisión 0/1

Characterization of secondary copper slag and evaluation of its pozzolanic activity ...

1 de 1 envíos

Platform & workflow by OJS / PKP

