

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ENCAPSULAMIENTO DE RESIDUOS DE CENIZA DE  
COMBUSTIÓN, VIDRIO DE AMPOLLETAS, PILAS USADAS Y  
PLÁSTICO UTILIZADO EN MINERÍA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
AMBIENTAL**

**VERÓNICA JACQUELINE ATAHUALPA MORETA**

**veronica.atahualpa@epn.edu.ec**

**DIRECTORA: ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS Ms.**

**lucia.montenegro@epn.edu.ec**

**Distrito Metropolitano de Quito, agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, VERÓNICA JACQUELINE ATAHUALPA MORETA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

VERÓNICA JACQUELINE ATAHUALPA MORETA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por VERÓNICA JACQUELINE ATAHUALPA MORETA, bajo mi supervisión.

---

ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS ms.  
DIRECTORA

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

VERÓNICA JACQUELINE ATAHUALPA MORETA

ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS MSc.

## **AUSPICIO**

El presente trabajo de investigación contó con el auspicio financiero de HAZWAT CRA, a través del convenio CV21-01-02, denominado: “Diseño de los procesos requeridos para eliminación, disposición final, reutilización de desechos contaminados (tóxicos y peligrosos) y no contaminantes que maneja la empresa Hazwat”.

## **DEDICATORIA**

*Al “Dios de lo imposible”, al que vive y reina por siempre,*

*mi Señor Jesucristo*

*A mi papá Gustavito, por haber sido este día para él,*

*el sueño más anhelado*

*Verónica Jacqueline Atahualpa*

## AGRADECIMIENTO

Una vez más a Cristo por traerme de su mano a este día, por la esperanza que me da para enfrentar todas las circunstancias de la vida.

A mis padres Gustavo y Rosita, por el esfuerzo de toda la vida para proveerme de lo necesario para seguir adelante.

A mi esposo Marco, por su paciencia y tolerancia en este duro camino como estudiante.

A mis hijos y compañeros Pablo y Alejandro, por sufrir malas noches junto a mí con una sonrisa.

A mis hermanos por sus palabras de aliento y sus buenos deseos.

A mi tutora, Ing. Lucía Montenegro por el conocimiento, paciencia y buena voluntad entregada a mi persona durante este proyecto.

A mi codirector Ing. Nicolay Yanchapanta por el direccionamiento e interés durante el presente proyecto.

A los Sres. Técnicos del LEMSUR, Ingenieros Francisco Guzmán y Gabriel por el acompañamiento y guía durante los respectivos ensayos.

A los Sres. Técnicos del LDIA, Ingenieros Jairo Jimpikit y Richard Puente por su direccionamiento y valiosa amistad.

*Verónica Jacqueline Atahualpa*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AUSPICIO.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ABREVIATURAS .....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance.....	3
1.4. Marco teórico.....	4
1.4.1. Definiciones .....	5
1.4.2. Clasificación de los residuos peligrosos .....	7
1.4.3. Encapsulamiento de residuos tóxicos y peligrosos.....	9
1.4.4. Disposición final de residuos tóxicos y peligrosos .....	9
1.4.5. Importancia de la disposición final de desechos peligrosos.....	10
1.4.6. Materiales alternativos a los agregados del hormigón.....	11
1.4.7. Residuos peligrosos gestionados en el presente estudio .....	11
1.4.8. Pilas utilizadas en el presente proyecto .....	16
1.4.9. Materiales plásticos contaminados con residuos de minería .....	18
1.4.10. Hormigón como matriz encapsulante .....	18
1.4.11. Agregados para la formación del hormigón .....	19
1.4.12. Lixiviación en el hormigón .....	21
1.4.13. Instrumentos Normativos utilizados en el presente estudio .....	22
1.4.14. Centro de remediación ambiental de HAZWAT .....	23
2. METODOLOGÍA.....	24
Área de estudio.....	26

Recopilación de datos- Selección de residuos .....	26
Caracterización de los materiales que conforman el hormigón .....	27
2.1. Propiedades físicas de los agregados .....	27
2.1.1. Peso específico del agregado grueso .....	27
2.1.2. Densidad Relativa .....	28
2.2. Propiedades físicas del agregado fino .....	29
2.2.1. Peso específico .....	29
2.2.2. Densidad Relativa .....	30
2.2.3. Absorción .....	31
2.3. Densidad aparente .....	31
2.3.1. Densidad aparente suelta del agregado grueso y el agregado fino .....	31
2.3.2. Densidad aparente compactada del agregado grueso y agregado fino ..	32
2.4. Densidad real del cemento .....	32
2.5. Granulometría .....	34
2.5.1. Granulometría del agregado grueso .....	34
2.5.2. Granulometría del agregado fino .....	35
2.6. Ensayo de Abrasión del agregado grueso .....	36
2.7. Contenido Orgánico del agregado fino .....	37
2.8. Caracterización de los residuos peligrosos a encapsular .....	38
2.8.1. Ensayo de contenido de humedad .....	39
2.8.2. Ensayo de potencial hidrógeno (pH) .....	40
2.8.3. Ensayo de determinación de sulfatos .....	40
2.9. Cuantificación de metales pesados existentes en las muestras de residuos peligrosos .....	41
2.10. Elaboración de la matriz de encapsulamiento (hormigón) .....	43
2.10.1. Dosificación de cilindros de hormigón .....	43
2.10.2. Fundición de los cilindros de hormigón .....	45
2.10.3. Compresión de los cilindros de hormigón .....	46
2.11. Elaboración de los especímenes cúbicos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados .....	47
2.11.1. Menús de encapsulamiento .....	47
2.11.2. Fundición de cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados .....	50
2.11.3. Compresión de las muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados .....	51
2.12. Ensayo de lixiviación de las muestras cúbicas con RPE .....	52



2.12.1.	Determinación del contenido de humedad en los cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados .....	52
2.12.2.	Prueba de lixiviación sobre los cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados.....	53
2.13.	Análisis de concentraciones de metales pesados en los lixiviados de las muestras cúbicas.....	55
3.1.	Recolección de muestras de residuos peligrosos a encapsular .....	56
3.2.	Resultados de la caracterización de los materiales que conforman el hormigón. ....	56
3.2.1.	Resultados del ensayo de densidad relativa, densidad aparente y absorción del agregado grueso y agregado fino.....	56
3.3.	Resultados del ensayo de granulometría.....	57
3.3.1.	Resultados del ensayo granulometría del agregado grueso.....	57
3.3.2.	Resultado del ensayo de granulometría del agregado fino.....	58
3.4.	Resultados del ensayo de abrasión del agregado grueso.....	59
3.5.	Resultados obtenidos en el contenido orgánico del agregado fino .....	59
3.6.	Resultado del ensayo de densidad real del cemento .....	60
3.7.	Resultados de la caracterización de los residuos peligrosos a encapsular ...	61
3.7.1.	Resultado del ensayo de contenido de Humedad .....	61
3.7.2.	Resultados del ensayo de Potencial Hidrógeno (pH) .....	62
3.7.3.	Resultados del ensayo de determinación de sulfatos:.....	62
3.8.	Resultados de la cuantificación de metales pesados existentes en las muestras de residuos peligrosos .....	63
3.9.	Resultados de la elaboración del hormigón (matriz de encapsulamiento).....	64
3.9.1.	Dosificación de cilindros de hormigón .....	64
3.9.2.	Resultados de la compresión de los cilindros de hormigón .....	65
3.10.	Elaboración de las muestras cúbicas de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados .....	67
3.10.1.	Menús de encapsulamiento.....	67
3.10.2.	Resultados de la compresión de las muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados .....	68
3.11.	Resultados del ensayo de lixiviación.....	70
3.11.1.	Resultados del contenido de humedad en los cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados .....	70
3.11.2.	Resultados del control de pH en los lixiviados.....	71
3.11.3.	Resultados del control de Conductividad Eléctrica en lixiviados.....	72
3.11.4.	Resultados del análisis de concentraciones de metales pesados en los lixiviados de las muestras cúbicas .....	74

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
4.1. CONCLUSIONES .....	77
4.2. RECOMENDACIONES .....	78
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
6. ANEXOS .....	86
ANEXO I: INVENTARIO ENTREGADO POR HAZWAT .....	86
ANEXO II: EJEMPLOS DE CÁLCULO .....	87
II.1. Densidad Relativa Seca del agregado grueso .....	87
II.2 Densidad Relativa del agregado grueso saturado con superficie seca (SSS) .....	87
II.3 Absorción de agua del agregado grueso .....	88
II.4 Densidad Relativa Seca del agregado fino .....	88
II.5 Densidad relativa saturada y superficialmente seca del agregado fino .....	89
II.6 Absorción del agregado fino .....	89
II.7 Densidad real del Cemento .....	89
II.8 Ensayo de contenido de humedad .....	90
II.9 Ensayo de humedad en las muestras de residuos peligrosos. ....	91
II.10 Determinación del contenido de humedad de las muestras cúbicas .....	91
ANEXO III. INFORMES ENTREGADOS POR EL LEMSUR .....	92
ANEXO IV: INFORMES DE RESULTADOS ENTREGADOS POR EL DEMEX ..	99
ANEXO V: TABLAS Y FIGURAS .....	101
ANEXO VI: REGISTRO FOTOGRÁFICO .....	106
ANEXO VII: MANUAL DEL PROCESO DE ENCAPSULAMIENTO .....	109
ANEXO VIII: INFORME Y CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD .....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Partes de una pila alcalina.....	15
<b>Figura 1.2</b> Disolución de las fases sólidas del hormigón en función del pH del fluido de sus poros.....	22
<b>Figura 2.1</b> Metodología de trabajo para el encapsulamiento de residuos peligrosos.....	25
<b>Figura 2.2</b> Ubicación del CRA de HAZWAT.....	26
<b>Figura 2.3</b> Determinación de la densidad aparente del agregado fino (prueba del cono)...	29
<b>Figura 2.4</b> Extracción del agua con la bomba de vacío.....	30
<b>Figura 2.5</b> Agregado grueso siendo igualado con la altura del cilindro.....	32
<b>Figura 2.6</b> Determinación de la masa del cemento y gasolina a 23 °C.....	33
<b>Figura 2.7</b> Tamizado mecánico del agregado grueso.....	36
<b>Figura 2.8</b> Tamizado del agregado fino.....	36
<b>Figura 2.9</b> Equipos utilizados en el ensayo de abrasión.....	36
<b>Figura 2.10</b> Retiro del agregado grueso retenido en el tamizador electrónico.....	37
<b>Figura 2.11</b> Mezcla del hidróxido de sodio con el agregado fino.....	38
<b>Figura 2.12</b> Residuos peligrosos pulverizados.....	39
<b>Figura 2.13</b> Determinación del pH de las muestras de residuos.....	40
<b>Figura 2.14</b> Proceso de digestión de las muestras de residuos peligrosos.....	42
<b>Figura 2.15</b> Determinación del asentamiento del hormigón.....	45
<b>Figura 2.16</b> Fundición de los cilindros de hormigón.....	45
<b>Figura 2.17</b> Curado de los cilindros de hormigón.....	45
<b>Figura 2.18</b> Compresión sobre un cilindro en la máquina universal de prueba.....	46
<b>Figura 2.19</b> Especímenes cilíndricos luego del ensayo.....	47
<b>Figura 2.20</b> Formación de la mezcla para la dosificación del 5%.....	50
<b>Figura 2.21</b> Pilas apiladas por cada tipo para el encapsulamiento.....	50
<b>Figura 2.22</b> Encapsulamiento de las pilas y baterías.....	51
<b>Figura 2.23</b> Desencofrado de los cubos de hormigón con residuo encapsulado.....	51
<b>Figura 2.24</b> Curado de los cubos de hormigón con residuo encapsulado.....	51
<b>Figura 2.25</b> Secado de los cubos y determinación del peso.....	53
<b>Figura 2.26</b> Preparación del sistema para la lixiviación en el laboratorio.....	55
<b>Figura 3.1</b> Curva granulométrica del agregado grueso.....	58
<b>Figura 3.2</b> Curva granulométrica del agregado fino.....	58
<b>Figura 3.3</b> Comparación de la mezcla con la cartilla de color.....	59
<b>Figura 3.4</b> Fisuras presentadas durante la compresión.....	65
<b>Figura 3.5</b> Pilas siendo encapsuladas en el centro del molde.....	68
<b>Figura 3.6</b> Ensayo de compresión sobre los cubos con residuos encapsulados.....	69

<b>Figura 3.7</b> Cubos de hormigón con daño luego de la compresión.....	69
<b>Figura 3.8</b> pH presentado en los especímenes cúbicos y sus duplicados con las diferentes dosificaciones durante el tiempo de lixiviación.....	71
<b>Figura 3.9</b> CE en función de los períodos de medición.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Algunos materiales alternativos a los componentes del hormigón.....	11
<b>Tabla 1.2</b> Composición química y propiedades físicas de la ceniza de fondo.....	14
<b>Tabla 1.3</b> Características generales de los tipos de pilas usadas utilizadas en el encapsulamiento.....	17
<b>Tabla 1.4</b> Composición general de las pilas primarias utilizadas.....	18
<b>Tabla 1.5</b> Porcentaje de composición del cemento.....	20
<b>Tabla 1.6</b> Requisitos físicos y químicos de ARMADURO.....	21
<b>Tabla 2.1</b> Listado de residuos entregados por el CRA de Hazwat.....	27
<b>Tabla 2.2</b> Número de tamices con su respectivo tamaño de abertura para el agregado grueso.....	34
<b>Tabla 2.3</b> Gradación para agregado fino según el número de tamiz.....	35
<b>Tabla 2.4</b> Metales pesados a cuantificar en las muestras digeradas de RP.....	41
<b>Tabla 2.5</b> Condiciones de dosificación de los materiales utilizados para la formación de hormigón.....	43
<b>Tabla 2.6</b> Dosificación requerida para la elaboración de los cilindros de prueba.....	44
<b>Tabla 2.7</b> Tamaño de partícula requerido de los residuos peligrosos utilizados.....	48
<b>Tabla 2.8</b> Dosificación del hormigón para la construcción de los cubos.....	48
<b>Tabla 2.9</b> Dosificación para los porcentajes de reemplazo de agregado fino.....	49
<b>Tabla 3.1</b> Listado de residuos entregados por el CRA de Hazwat para la ejecución del TIC.....	56
<b>Tabla 3.2</b> Resultados de los ensayos de gravedad específica y densidad aparente del agregado grueso y fino.....	57
<b>Tabla 3.3</b> Resultados obtenidos en el ensayo de abrasión para el agregado grueso.....	59
<b>Tabla 3.4</b> Colores estándar de plato orgánico.....	60
<b>Tabla 3.5</b> Datos obtenidos en el ensayo de densidad real del cemento.....	60
<b>Tabla 3.6</b> Datos Recolectados de las muestras de R.P. después de salir del horno.....	61

<b>Tabla 3.7</b> Valores de pH medidos en las muestras de RP .....	62
<b>Tabla 3.8</b> Concentración de sulfatos presentes en las muestras de RP .....	62
<b>Tabla 3.9</b> Concentración de metales pesados existentes en la muestras de RPE .....	63
<b>Tabla 3.10</b> Consistencia del hormigón en relación con los valores de asentamiento.....	64
<b>Tabla 3.11</b> Dosificación requerida para la elaboración de los cilindros de prueba.....	65
<b>Tabla 3.12</b> Valores obtenidos en la compresión de los cilindros de hormigón.....	66
<b>Tabla 3.13</b> Porcentajes y pesos requeridos para cada uno de los materiales de encapsulamiento en las proporciones 5%, 10%, 15% y 20%.....	67
<b>Tabla 3.14</b> Valores obtenidos en la compresión de las muestras cúbicas con RPE.....	69
<b>Tabla 3.15</b> Resultados del porcentaje de humedad presente en los especímenes cúbicos con los RP encapsulados.....	70
<b>Tabla 3.16</b> Comparación de la concentración de metales pesados en el lixiviado con los LMP establecidos en la O. M. No.404.....	74

## ABREVIATURAS

<b>RP</b>	Residuos peligrosos
<b>CRA</b>	Centro de remediación ambiental
<b>REP</b>	Residuos peligrosos encapsulados
<b>LMP</b>	Límite máximo permisible
<b>NN</b>	No normado
<b>ND</b>	No detectable
<b>IL</b>	Inferior al límite
<b>OM</b>	Ordenanza municipal
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tuvo como propósito la elaboración de un menú de encapsulamiento de residuos peligrosos en una matriz de hormigón, en donde se reemplazó la mayor cantidad de residuos en los agregados del hormigón y se encapsularon pilas agotadas. Para esto, se seleccionaron cuatro tipos de residuos peligrosos proporcionados por la empresa Hazwat: ceniza de combustión, vidrio de ampollitas y perfumes, plástico usado en minería y pilas usadas.

Se realizó la caracterización de los agregados con el propósito de dosificar un hormigón de una resistencia a la compactación mayor a  $210 \text{ kg/cm}^2$  en donde se reducen procesos de infiltración, y debido a que el hormigón con el agregado fino reemplazado por residuos y las pilas encapsuladas causarían la reducción de su resistencia. Se lo hizo a través de ensayos físicos como granulometría, densidad aparente, peso específico, abrasión, contenido orgánico solo para la arena y densidad real para el cemento IP de alta resistencia, en los cuales los resultados obtenidos, fueron favorables para la elaboración de un hormigón de tipo estructural.

Así mismo se realizó la caracterización de los residuos peligrosos, en los cuales se determinaron parámetros que podrían alterar la resistencia de la matriz de encapsulamiento, y estos fueron pH, contenido de humedad y contenido de sulfatos, y se determinó la concentración de As, Hg, Cr, Pb, Ni, Cd, Mn y Zinc por espectroscopia de absorción atómica, contaminantes cuyas concentraciones están normadas en la Ordenanza Municipal No.404 a excepción del Mn. Estas concentraciones fueron comparadas con los LMP y se estableció el exceso en que intervinieron en un inicio.

A continuación, se realizaron cuatro menús en los cuales se reemplazó una parte del agregado fino por los residuos peligrosos (microencapsulación) a excepción de las pilas, en porcentajes de 5%,10%,15% y 20% y se fundieron 3 cubos de  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  por cada porcentaje además de dos blancos, en cuyo centro se colocaron las pilas apiladas ocupando un volumen de  $100 \text{ cm}^3$  (macroencapsulación). Obtenidas las muestras se determinó la resistencia a la compresión en una de cada porcentaje y en uno de los blancos, cuyo valor fue un poco inferior a los  $210 \text{ kg/cm}^2$ . Las dos muestras restantes de cada porcentaje fueron sometidas a un proceso de lixiviación con el método 1315 de la EPA, bajo el cual se armó un tanque de lixiviación semidinámico para cada muestra y se llevó un control del pH y conductividad eléctrica de los lixiviados, medidos durante un tiempo de 112 días.

Finalmente, se determinó la concentración de cada contaminante en los lixiviados de cada una de las muestras cúbicas con los diferentes porcentajes de reemplazo, los cuales fueron nuevamente comparados con los LMP establecidos en la Ordenanza Municipal No.404, existiendo ausencia de los más contaminantes como son el As, Hg y Cd. Una concentración de Cr de 0,04 mg/L para el 5%, 0,06 mg/L para el 10%, 0,03 mg/L para el 15% y de 0,05 mg/L para el 20%, valores muy inferiores a los 5,0 m/L establecidos. Para el plomo se obtuvo una concentración de 0,03 mg/L para el 5%, 0,03 mg/L para el 10%, 0,05 mg/L para el 15% y 0,04mg/L para el 20%, valores muy inferiores a los 5 mg/L establecidos. En el caso del Ni se obtuvieron valores de 0,01mg/L para el 5%, 0,02 mg/L para el 10%, 0,02 mg/L para el 15% y de 0,02 mg/L para el 20%, sin embargo, este elemento no se encuentra normado. El Mn fue no detectable para la muestra de 5% de reemplazo, estuvo presente con 0,01 mg/L para el 10%, 0,02 mg/L para el 15% y 0,03 mg/L para el 20%, sin embargo, este elemento tampoco estuvo normado al igual que el Zn que estuvo totalmente ausente.

Sobre la base de estos resultados se concluyó que el encapsulamiento fue eficiente para todas las muestras cúbicas, además que las pilas en el interior de los cubos no se fracturaron de lo cual la ausencia de Hg, Zn y Cd confirman este hecho. La dosificación con la cual se alcanzaron los objetivos planteados fue la de reemplazo de residuo en un 15% del agregado fino en donde la muestra cúbica alcanzó la mayor resistencia de 199, 96 kg/cm<sup>2</sup> y al mismo tiempo encapsuló la mayor cantidad de residuo correspondiente a 0,610 kg por muestra.

**PALABRAS CLAVE:** agregados, resistencia, residuos, encapsulamiento, dosificación, menú.

## ABSTRACT

The purpose of this curricular integration work was to prepare a menu for the encapsulation of hazardous waste in a concrete matrix, where the greatest amount of waste in the concrete aggregates was replaced and exhausted batteries were encapsulated. For this, four types of hazardous waste provided by the Hazwat company were selected: combustion ash, glass from vials and perfumes, plastic used in mining, and used batteries.

The characterization of the aggregates was carried out with the purpose of dosing a concrete with a resistance to compaction greater than 210 kg/cm<sup>2</sup> where infiltration processes are reduced, and because the concrete with the fine aggregate is replaced by waste and piles. encapsulated would cause the reduction of its resistance. It was done through physical tests such as granulometry, apparent density, specific weight, abrasion, organic content only for sand and real density for high-resistance IP cement, in which the results obtained were favorable for the elaboration of a structural concrete.

Likewise, the characterization of hazardous waste was carried out, in which parameters that could alter the resistance of the encapsulation matrix were determined, and these were pH, moisture content and sulfate content, and the concentration of As, Hg was determined. , Cr, Pb, Ni, Cd, Mn and Zinc by atomic absorption spectroscopy, pollutants whose concentrations are regulated in Municipal Ordinance No.404 with the exception of Mn. These concentrations were compared with the LMP and the excess in which they intervened at the beginning was established.

Next, four menus were made in which a part of the fine aggregate was replaced by hazardous waste (microencapsulation) with the exception of batteries, in percentages of 5%, 10%, 15% and 20% and 3 buckets of 15 cm x 15 cm for each percentage as well as two blanks, in the center of which the piles were placed, occupying a volume of 100 cm<sup>3</sup> (macroencapsulation). Once the samples were obtained, the compressive strength was determined in one of each percentage and in one of the blanks, whose value was slightly less than 210 kg/cm<sup>2</sup>. The two remaining samples of each percentage were subjected to a leaching process with the EPA method 1315, under which a semi-dynamic leaching tank was set up for each sample and a control of the pH and electrical conductivity of the leachate was carried out, measured for a period of 112 days.



Finally, the concentration of each contaminant in the leachates of each of the cubic samples was determined with the different replacement percentages, which were again compared with the LMP established in Municipal Ordinance No.404, with the absence of the most polluting as are As, Hg and Cd. A Cr concentration of 0.04 mg/L for 5%, 0.06 mg/L for 10%, 0.03 mg/L for 15% and 0.05 mg/L for 20%, values much lower than the established 5.0 mg/L. For lead, a concentration of 0.03 mg/L was obtained for 5%, 0.03 mg/L for 10%, 0.05 mg/L for 15% and 0.04mg/L for 20%. , values much lower than the established 5 mg/L. In the case of Ni, values of 0.01mg/L were obtained for 5%, 0.02 mg/L for 10%, 0.02 mg/L for 15% and 0.02 mg/L for the 20%, however, this element is not regulated. Mn was not detectable for the 5% replacement sample, it was present at 0.01 mg/L for 10%, 0.02 mg/L for 15%, and 0.03 mg/L for 20%. however, this element was not regulated either, as was Zn, which was totally absent.

Based on these results, it was concluded that the encapsulation was efficient for all the cubic samples, in addition that the piles inside the cubes did not fracture, of which the absence of Hg, Zn and Cd confirm this fact. The dosage with which the proposed objectives were achieved was the replacement of residue by 15% of the fine aggregate where the cubic sample reached the highest resistance of 199.96 kg/cm<sup>2</sup> and at the same time encapsulated the largest amount of corresponding residue was 0,610 kg per square sample.

**KEYWORDS:** aggregates, resistance, residues, encapsulation, dosage, menu.

## 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El incremento descontrolado de la generación de residuos sólidos que va de la mano del aumento de la población y la satisfacción de sus necesidades, junto con la falta de políticas y normas precisas que busquen controlar de forma eficiente la producción de residuos por parte de los ciudadanos, es una realidad que el ser humano debe afrontar a diario (AIDIS, 2018). La falta de conocimiento del daño que causa desechar de forma indiscriminada todo tipo de residuos, ha causado que aquellas sustancias con características peligrosas para la vida y cuyo efecto puede prevalecer en el tiempo, sean desechadas de la misma manera que los residuos sólidos urbanos., cuando la realidad es que estos desechos deben someterse a tratamientos especiales y específicos, que por lo general son muy costosos y pocos lo quieren asumir (Cubillos et al., 2015).

Una forma eficiente y factible de disposición final de algunos de estos residuos, es lo que el presente trabajo de integración curricular propone, cuyo resultado podría adquirir un valor agregado. Para lo cual en este proyecto se utilizará una matriz de hormigón para encapsular residuos considerados peligrosos como son: vidrio de ampollitas, plástico contaminado con residuos de minería, pilas de un solo uso, y ceniza de combustión de residuos peligrosos y especiales provenientes del Centro de Remediación Ambiental (CRA) de Hazwat localizado en Cayambe. Para lo cual se utilizaron agregados fino y grueso para luego determinar la resistencia de la matriz de encapsulamiento que reduzca la impermeabilidad.

Así mismo, se realizó una caracterización de los residuos peligrosos a través de ensayos como medición de pH, medición de sulfatos y determinación de contenido de humedad para establecer si estos parámetros influirían negativamente en la estructura del hormigón. También se determinó la concentración de ocho metales pesados existentes en las muestras de residuos los cuales están normados en la Ordenanza Metropolitana No.404 y se verificó el cumplimiento de los LMP.

A partir de estos resultados se establecieron 4 menús en las cuales se reemplazó una parte del agregado fino por 5%, 10%, 15% y 20% de residuos peligrosos disminuidos de tamaño. La ceniza, vidrio y plástico intervinieron en porcentajes de 50%, 49% y 1% respectivamente, siendo el plástico usado en minería el residuo con mayor dificultad de incorporar en la pasta del hormigón. Con cada una de estas se construyeron 3 muestras cúbicas de 15 cm x 15 cm, en cuyo interior se colocaron las pilas. Estas muestras fueron sometidas a una prueba de compresión para determinar su resistencia, y que debía encontrarse sobre los 210 kg/cm<sup>2</sup>

cuyo valor es propio de un hormigón estructural según la norma ACI 211, el cual es un indicativo de firmeza y compactación. Las muestras cúbicas fueron sometidas a un proceso de lixiviación por 8 períodos de 14 días, 120 días en total, en el interior de un tanque semidinámico el cual simuló condiciones del medio ambiente y en donde se llevó un control de pH y conductividad eléctrica.

Finalmente, el lixiviado recogido fue analizado en un espectrofotómetro de absorción atómica en el cual se cuantificó a cada uno de los elementos pesados de interés, para posteriormente ser comparados con los niveles máximos permisibles en base seca determinados en la Ordenanza Municipal ya mencionada. En última instancia, este estudio buscó generar un menú óptimo con el cual se evite la liberación de metales pesados al medio ambiente al ser capturados de forma eficiente, proporcionar una disposición final a las pilas agotadas y al mismo tiempo elaborar un procedimiento para obtener un producto útil y con valor agregado, el cual será entregado al CRA de Hazwat quienes lo implementarán para proporcionar a estos residuos una disposición final adecuada.

### **1.1. Objetivo general**

Elaborar un menú de encapsulamiento utilizando una matriz de hormigón, en la cual se reemplace la mayor cantidad de agregados por residuos peligrosos provenientes de ceniza de combustión, vidrio de ampollitas y perfumes, plástico utilizado en minería y pilas usadas, para minimizar la liberación de contaminantes hacia el medio ambiente y brindarles una disposición final adecuada.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar los residuos de ceniza provenientes de la combustión de residuos peligrosos, vidrio de ampollitas y plástico usado en minería para determinar las propiedades más influyentes en la estructura del hormigón.
- Caracterizar agregados finos y gruesos que conforman la matriz de encapsulamiento para determinar las características físicas que le otorguen mayor resistencia a la compresión.

- Comprobar si existe lixiviación de las muestras cúbicas con las diferentes dosificaciones de residuos peligrosos encapsulados, al estar expuestas a condiciones medioambientales.
- Comprobar si existe migración de los metales pesados hacia el exterior de las muestras con el material encapsulado, que puedan causar daño a los recursos agua y suelo y a la salud humana.
- Determinar el menú de encapsulamiento en el que la presencia de residuos peligrosos no alteren las características del hormigón, para que pueda ser implementado por la empresa Hazwat y darles así, una disposición final adecuada.

### **1.3. Alcance**

El presente trabajo de investigación curricular está enfocado en la disposición final adecuada de residuos de vidrio de ampollitas, plásticos utilizados en actividades mineras, pilas de una sola vida y ceniza provenientes del incinerador del centro de remediación ambiental de Hazwat. Los mismos que serán confinados en hormigón de calidad con una resistencia a la compresión mayor a  $210 \text{ kg/cm}^2$ , en cuyo valor varios estudios han demostrado que se produce una buena compactación, en la que según Arribas (2019) se minimizan los poros y espacios intersticiales y por tanto se reducen la absorción y transporte de agua en la matriz de hormigón. Como consecuencia se producirá una reducción notable de procesos de infiltración y lixiviación que liberen los contaminantes al medio ambiente.

Para esto, se escogerán los desechos antes mencionados, a continuación, se hará un reconocimiento de su lugar de almacenamiento en el centro de remediación de Hazwat ubicado en Cayambe. Se realizará una revisión bibliográfica y de la normativa respecto a estos desechos que permitieron seleccionar la técnica más apropiada a aplicar para su disposición final, en este caso será a través de encapsulamiento en una matriz de hormigón en el cual se busca obtener la solidificación y estabilización de los contaminantes provenientes de los residuos peligrosos.

No se realizó el muestreo de los residuos peligrosos, sino que fueron entregadas cantidades determinadas por la empresa Hazwat. Una vez recibidas las muestras de los residuos, se realizarán sobre estas los siguientes ensayos: determinación de contenido de humedad, medición de potencial hidrógeno y determinación de sulfatos los cuales al encontrarse en niveles altos podrían causar alteración en la estructura del hormigón. También se

cuantificarán los metales pesados (Pb, Hg, As, Ni, Cd, Cr, Zn y Mn) presentes en estos residuos a través de la técnica de espectroscopia de absorción atómica, para ser capturados en el encapsulamiento por ser algunos altamente contaminantes, cuyos límites máximos permisibles (LMP) están normados en la Ordenanza Metropolitana No. 404 del D.M.Q.

Así también, se realizarán sobre los constituyentes del hormigón ensayos físicos como densidad aparente, gravedad específica y absorción, granulometría, contenido orgánico y densidad real la cual es específica para el cemento. Esto, para determinar las propiedades mecánicas de sus componentes con las cuales se alcanzará una resistencia a la compresión mayor a  $210 \text{ kg/cm}^2$ , valor en el cual se reducen en el hormigón procesos de infiltración.

Se elaborarán 12 muestras cúbicas de  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  con residuos peligrosos reemplazando al agregado fino del hormigón en un 5%, 10%, 15% y 20%, a continuación, se aplicará sobre estos el ensayo de compresión para determinar la resistencia de la matriz encapsulante junto con los residuos peligrosos y las pilas encapsuladas en su interior. Una vez, alcanzada la resistencia óptima de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , se realizará sobre estos una prueba de lixiviación conforme a lo estipulado en el Método 1315 "Tasas de transferencia de masa de constituyentes en materiales granulares monolíticos o compactados mediante un procedimiento de lixiviación en un tanque semidinámico", desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2017), durante 112 días en ocho intervalos de 14 días.

El lixiviado de cada muestra cúbica será analizado para determinar la posible migración de metales pesados hacia el exterior que podrían causar daño al medio ambiente, para lo cual se determinó la concentración de cada uno de los contaminantes a través de espectroscopia de absorción atómica, las mismas que fueron comparadas con los LMP establecidos en la normativa local ya mencionada para determinar el cumplimiento de estos límites establecidos.

Con estos resultados se determinará un menú con el cual se logre encapsular eficientemente los contaminantes, y a partir de este se construya un producto final como es una muestra cúbica de hormigón en el cual no se produzcan lixiviados. Este procedimiento será entregado a Hazwat quienes lo utilizarán en los diversos procesos de disposición final que gestiona.

#### **1.4. Marco teórico**

La generación, recolección y disposición final de desechos sólidos son actividades que las ciudades afrontan diariamente. La acumulación de estos residuos se agudiza con el

incremento poblacional aumentando las demandas de alimentos, productos y energía, cuya satisfacción ha conllevado al desarrollo de mecanismos de mayor producción cada vez más tecnificados, y con esto, la incorporación de sustancias químicas, compuestos sintéticos, y componentes electrónicos que utilizan materiales tóxicos. Después de cumplir su vida útil, estos residuos son considerados peligrosos (al ser corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso) según el Acuerdo Ministerial No. 026 (2008), cuyas características hacen que sean nocivos para la salud humana y el medio ambiente en el cual logran permanecer durante largos períodos de tiempo debido a su compleja y baja capacidad de degradación. Este problema es agravado por una gestión y disposición final inadecuadas (Cubillos et al., 2015).

En Ecuador las generaciones de residuos peligrosos provienen principalmente de la industria agrícola, minera, petrolera, metalúrgica y mecánica automotriz, etc., cuya gestión en pocas ocasiones lo realizan gestores ambientales autorizados quienes recurren usualmente a procesos de incineración para tratar estos desechos. Sin embargo, el producto generado (ceniza) posee remanentes de metales pesados y sustancias orgánicas que necesitan ser depositados de la tal forma que no generen daño al medio ambiente (SEMANART, 2015).

En los últimos años se han desarrollado dos técnicas que han demostrado ser efectivas en prevenir o retrasar la salida de estas sustancias hacia el medio ambiente (solidificación y estabilización). En la solidificación se mezclan los residuos triturados con un agente aglutinante y otros materiales como ceniza hasta formar un sólido. El proceso de estabilización consiste en la reacción entre el residuo con el aglutinante (u otros aditivos) para generar un nuevo compuesto que logra inmovilizar en la matriz y/o prevenir la disolución sus los contaminantes (Guía del Ciudadano para la solidificación y estabilización, 2012).

#### **1.4.1. Definiciones**

##### **Residuo**

Según la Organización de las Naciones Unidas para el medio ambiente (2019), residuo es “aquel material sólido, líquido o gaseoso del cual, quien lo generó o lo posee, necesita deshacerse, y que puede ser valorizado nuevamente o tratado con responsabilidad, y proporcionarle una disposición final adecuada”.

En el caso de Ecuador, en el Acuerdo Ministerial No 026, publicado el 12 de mayo de 2008 define a los residuos como sustancias o materiales que provienen de un proceso de producción, transformación, reciclaje o consumo, de los cuales su eliminación o disposición

final se procede, propone o se está obligado a proceder según las disposiciones en la normativa ambiental que se encuentre vigente.

### **Residuos peligrosos**

De forma general “residuos peligrosos” hacen referencia a aquellos residuos que presentan características propias muy dañinas hacia la vida del ser humano y hacia el medio ambiente, cuya peligrosidad está en función de la cantidad, tiempo y toxicidad a los que se está expuesto. (Martínez et al., 2005, pp.18-19).

El TULSMA (2015), hace referencia a residuo peligroso como aquel que puede encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso y que resulta de un proceso de producción, transformación, extracción, consumo o reciclaje y que posea alguna sustancia con características: corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o biológicas, las cuales representan un peligro para el ser humano y para el ambiente. También se considera desecho peligroso a aquellos que posean alguna de las características CRETIB y que formen parte de los listados nacionales de desechos peligrosos.

### **Características CRETIB:**

La Ordenanza Metropolitana No.404, (2013) a través de su norma técnica de desechos peligrosos y especiales, hizo referencia a algunos de los criterios que pueden establecer a un residuo como peligroso, además emitió la definición de cada una de las características que forman el acrónimo CRETIB, como se describe a continuación:

- **Corrosividad:** Determina que un desecho o residuo es corrosivo si presenta una de las siguientes propiedades: ser acuso o líquido y tener un pH entre 2 a 12,5; y al estar mezclado con agua pueda corroer el acero a una temperatura de 55 °C y a una tasa de 6,35 mm al año.
- **Reactividad:** una sustancia es reactiva cuando reacciona de forma violenta con el agua, genere vapores o gases tóxicos, esté constituido de cianuros y sulfuros en cantidades suficientes para causar daño, y produzca una reacción explosiva en contacto con un estímulo en un ambiente confinado.
- **Explosividad:** es el caso de aquellas sustancias inflamables que al entrar en mínimo contacto con un punto de ignición, calor o corriente eléctrica, reacciona y se esparce

con violencia y gran ruido causando destrozos.

- **Toxicidad:** un desecho es tóxico cuando la muestra de su lixiviado al ser analizada en base seca, contiene alguno de los contaminantes (AS, Hg, Pb, Ni, Mn, Cd, Cr, Zn, etc.) enlistados en dicha norma.
- **Inflamabilidad:** un desecho será inflamable si al ser líquido tiene un punto de ignición menor a 60 °C, sí al no ser líquido a temperatura ambiente, 25 °C a 1 atmósfera produce fuego al absorber humedad o alterarse de forma química, y una vez inflamada se dificulte la extinción del fuego.
- **Biológico infeccioso:** son aquellas sustancias producidas por microorganismos patógenos (virus, parásitos, bacterias, etc.) que pueden causar enfermedades a los seres vivos. Tienen la capacidad de vivir en la mayoría de superficies y ambientes durante largos períodos de tiempo, por lo que se hace imprescindible su desinfección.
- **Radioactividad:** un residuo será radioactivo si presenta alguna de las siguientes propiedades: si reacciona de forma violenta a condiciones normales del ambiente o al contacto con agua genere vapores tóxicos, si presenta en su estructura sulfuros o cianuros que al reaccionar libere estos a través de vapores, o que al estar bajo un fuerte estímulo produzca una reacción explosiva.

#### 1.4.2. Clasificación de los residuos peligrosos

En nuestro país la clasificación como residuos peligrosos está estipulado en el Acuerdo Ministerial No. 026, del 12 de mayo y publicado en el Registro Oficial No.334 , en el cual señala que son aquellos residuos sólidos, líquidos o gaseosos que resultan de un proceso de producción, transformación o consumo teniendo en cuenta también al reciclaje, que tenga alguna de las siguientes características: reactivas, inflamables, corrosivas, tóxicas o infecciosas que represente un riesgo para la salud humana y el medio ambiente establecidas en las disposiciones de la normativa vigente. Así mismo en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, (2015) proporciona un subclasificación de residuos peligrosos que se generan en actividades de producción, elaboración, refinación y comercialización que se especifican a continuación:



- Residuos hospitalarios: resultado del diagnóstico, tratamiento o inmunización de humanos y animales.
- Residuos de actividad agropecuaria o forestal: como son fungicidas, plaguicidas o biocidas.
- Residuos de minerías: aquellas sustancias químicas como sulfuros, cianuros, solventes orgánicos, hidrocarburos y metales pesados.
- Residuos de la industria energética: tales como aceites dieléctricos que contengan bifenilos policlorados.
- Residuos de la industria petrolera: aquellos bituminosos, con alquitrán, destilados o emisiones acuosas.
- Residuos de la industria textil: colorantes, ácidos o cromo.
- Residuos de la industria militar o afines: pólvora o sustancias inflamables.
- Residuos generados de centros de investigación científica: medios de cultivo.
- Residuos generados en la industria del plástico: poliestireno extruido.
- Residuos generados en la industria

En el presente estudio se dispuso de residuos de minería en los cuales las sustancias químicas propias de esta actividad se han impregnado en un plástico resultando en un residuo peligroso, así también se cuenta con vidrios de ampollas los cuales contuvieron sustancias químicas inyectables y sensibles al aire y a la luz como las tetraciclinas o paladio, solventes higroscópicos o reactivos que funcionan como estándar para diversos análisis (Carraretto, et.al., 2011).

Se contó también con vidrio ámbar provenientes de perfumes los cuales se encuentran impregnados de sus componentes básicos como son: etanol, fragancia y propilenglicol, además en su estructura poseen óxidos de hierro y de manganeso que al ser pulverizados podrían alcanzar los suelos y su exceso tener un efecto negativo sobre los cultivos.

Se dispuso también de ceniza de fondo de cámara de la combustión de residuos peligrosos y especiales, por este motivo en su composición presenta concentraciones de algunos elementos pesados como el Pb, As y Hg, según el análisis espectrofotométrico reportado más adelante.

También se dispuso de residuos de la industria energética como son pilas usadas o agotadas, las cuales presentan en su composición además del Zn y el Mn, concentraciones de Hg, Cd y Pb de igual manera reportadas más adelante en el presente estudio.

### 1.4.3. Encapsulamiento de residuos tóxicos y peligrosos

Este tipo de tratamiento busca retener, ralentizar o inmovilizar los contaminantes de los residuos peligrosos al aglomerarlos en el interior de una matriz que puede ser de diversos materiales. El objetivo de este tratamiento es brindar una disposición final a los residuos peligrosos. Recientes investigaciones han demostrado que el hormigón de tipo estructural logra retener los contaminantes de los residuos junto con la acción de un aditivo. Esto se ha demostrado en la fabricación de adoquines y asientos de hormigón con residuos peligrosos encapsulados (Arciniegas, 2003).

Macroencapsulamiento: Esta técnica constituye en atrapar en la estructura de un material a los residuos peligrosos, los cuales quedan retenidos en los espacios formados entre los poros y de ocurrir degradación de este material encapsulante, los residuos son liberados nuevamente al exterior. En este mecanismo los productos formados por encapsulamiento deben conservarse a condiciones apropiadas, ya que factores como la humedad del suelo, congelamiento o desecación ocasionan desintegración del material (Ortiz, 2009).

Microencapsulamiento: es un método de encapsulamiento de sustancias tóxicas las cuales pueden ser emulsificables o líquidas, las cuales se incorporan a la estructura de la matriz encapsulante a nivel microscópico y pueden ocurrir reacciones químicas en las que se forme un nuevo producto que queda retenido en la matriz encapsulante.

### 1.4.4. Disposición final de residuos tóxicos y peligrosos

Este aspecto es considerado como el más complicado en la gestión de residuos peligrosos encapsulados, y esto debido al aislamiento que debe tener el depósito el cual debe cumplir con una serie de requerimientos para brindar las garantías de que los contaminantes de ninguna manera lograrán alcanzar el recurso agua o suelo.

- ***Relleno sanitario:***

Se trata de tipos rellenos en los que se depositan materiales peligrosos y domésticos los cuales se separan mediante celdas. En el caso de los residuos orgánicos y de fácil degradación este tratamiento es óptimo para la generación de abonos, pero en el caso de las sustancias inorgánicas que en su mayoría son tóxicas, la degradación conlleva decenas y hasta centenas de años en el relleno sanitario. Aquí, los elementos tóxicos de los lixiviados pueden escapar hacia el suelo y llegar a las capas freáticas (NTE

INEN 2266, 2013).

- ***Relleño de seguridad:***

Es aquel que está reservado para almacenar solo materiales peligrosos de una sola clase a lo que se llama “monodisposición”. La celda de seguridad se llena con el material peligroso de características similares para que al mezclarse no interactúen y no se produzcan reacciones indeseables (NTE INEN 2266, 2013).

Este es el tipo de disposición final que tendrán las muestras cubicas con residuos peligroso encapsulados que se elaborarán en este proyecto, en el cual luego del encapsulamiento irán a una celda de seguridad en donde serán recubiertas por una capa de hormigón.

- ***Pozos profundos:***

La construcción de un pozo profundo debe tener en cuenta de forma minuciosa la geología de la región. El alcance geográfico de estos pozos debe extenderse lo suficiente para no afectar a regiones adyacentes. Los pozos profundos deben contar con una licencia ambiental aprobada por a la autoridad ambiental competente. (NTE INEN 2266, 2013).

#### **1.4.5. Importancia de la disposición final de desechos peligrosos**

Los contaminantes producidos por los residuos peligrosos pueden alcanzar cualquiera de los sistemas suelo, agua o aire los cual depende del estado físico de estos.

El daño que puede causar los contaminantes de estos residuos cuando son liberados al medio es muy grave y muchas veces incuantificable en términos económicos e irremediable, por esto es indispensable que las diferentes legislaciones desarrollen normativas, marcos de regulación, procedimientos de control y planes de contingencia eficaces que aseguren que los desechos peligrosos van a ser gestionados integralmente hasta su disposición final adecuada, para que así sea posible reducir al mínimo las emisiones accidentales y no controladas (Martínez, 2005, pp. 25-27).

#### 1.4.6. Materiales alternativos a los agregados del hormigón

Los materiales alternativos a los agregados del hormigón, pueden reemplazar total o parcialmente a la mezcla, e inclusive se puede reemplazar al cemento Portland en el caso del óxido de calcio. También es posible incorporar a la mezcla ceniza y escorias, lo importante es que estos materiales sean adhesivos o adherentes a los otros componentes del hormigón. Los materiales ricos en  $\text{SiO}_2$  conocidos como puzolánicos, de los cuales un ejemplo es la ceniza proveniente de volcanes y algunos caolines. Las cenizas provenientes de la incineración de residuos de vegetales como el bagazo de caña, cascarillas de arroz, también presentan propiedades semejantes a los caolines. En el caso de los agregados grueso y fino que son de origen natural, pueden ser reemplazados por materiales residuales que cuenten con la suficiente resistencia a la abrasión y cumplan con las propiedades físicas que los agregados requieren, otros materiales alternativos pueden apreciarse en la Tabla 1.1 (Escalante, 2002).

**Tabla 1.1.** Algunos materiales alternativos a los componentes del hormigón

<b>Materiales alternativos a los componentes del hormigón</b>	
<b>Sílice condensada y vidrio</b>	Debe ser aglomerada para su manejo, reemplaza al agregado fino
<b>Ceniza volcánica</b>	Debe ser molido, reemplaza al agregado fino.
<b>Ceniza de cascarilla de arroz</b>	Su tamaño es muy fino, reemplaza al cemento.
<b>Caolines</b>	Requiere un tratamiento térmico adicional para ser utilizado como agregado fino.
<b>Ceniza volante</b>	Sus partículas son muy finas y adhesivas, sustituye al cemento.
<b>Escorial de alto horno activada por álcalis</b>	Reemplaza totalmente al cemento.
<b>Escoria de producción de fósforo y cobre</b>	Reemplaza totalmente al cemento

Fuente: (Escalante, 2002).

#### 1.4.7. Residuos peligrosos gestionados en el presente estudio

Los residuos peligrosos a continuación descritos, provinieron de la empresa Hazwat, los cuales fueron proporcionados en cuanto a la cantidad y disposición de estos, de los cuales

solo la ceniza es el resultado de un proceso previo de tratamiento de residuos peligroso.

### **Vidrio de ampollitas y perfumes**

El vidrio es un fluido de alta viscosidad que en general, tiene una composición totalmente mineral, constituida en su mayor parte por sílice 73% ( $\text{SiO}_2$ ), carbonato de calcio 14% ( $\text{CaCO}_3$ ) y carbonato de sodio 11% ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), el porcentaje restante está constituido por óxidos de diferentes elementos (boro, hierro, níquel, aluminio, bario, cobalto, manganeso, arsénico, selenio, etc.), que le otorgan diversos colores de acuerdo a la funcionalidad que se pretenda darle (Montes, 2017, p.16). Tal es el caso del color amarillo proporcionado por el Fe el cual suele utilizarse para envasar cervezas.

### **Vidrio de ampollitas:**

Está elaborado con los tres componentes principales del vidrio:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a los cuales se añaden óxidos de hierro y de manganeso, para darle la coloración desde el amarillo hasta el café oscuro, es un vidrio tipo II correspondiente a un vidrio tratado con óxido de cal y óxido de sodio. Con este material se fabrican envases de pequeños volúmenes de formas alargadas o de pequeñas botellas, en las cuales se envasan fármacos, inyectables, sustancias estériles o medicamentos que podrían transformarse con el paso de la luz (Calderón, 2016, p.4-5).

El vidrio de ampollitas utilizado para este trabajo curricular tuvo en su estructura óxidos de manganeso y de cromo, estos dos metales pesados fueron detectados por el equipo de espectroscopia de absorción atómica, cuya coloración se encontró entre las bandas de absorción  $300\mu\text{m}$  y  $410\mu\text{m}$  (Gago, s.f.)

### **Vidrio de frascos de perfume:**

Su composición primaria está formada en su mayor parte por óxido de silicio y óxido bórico, cuya transformación da lugar a un vidrio resistente y con un bajo coeficiente de expansión (tipo I). Se coloca un mínimo de otros óxidos que le otorgan diferentes colores conforme a la función que tendrá, si es como un frasco de vidrio para perfume de color café oscuro, se utilizará el óxido de manganeso (Montes, 2017).

El vidrio de perfumes suele ser reciclado y también se aprovecha al máximo para fabricar nuevamente frascos de perfume. En el caso del vidrio de ampollitas, en países pequeños no se realiza su reciclaje ya que la cantidad de estos residuos no se considera representativa. Son pocas las industrias que lo reciclan y la mayoría que lo hacen son las propias

farmacéuticas que las producen las cuales se encuentran instaladas en grandes países (Morales, 2022).

Este vidrio luego ser lavado y acondicionado, se tritura para convertirse en un agregado de algunos materiales de construcción como son ladrillos y morteros de hormigón (Montes, 2017, p.1).

### **Ceniza de fondo de cámara**

La incineración de residuos peligrosos es la técnica más utilizada en la industria para su gestión, combinada con un proceso de pirólisis, produce la quema de estos materiales a temperaturas entre 800 °C a 1200 °C en las cuales se garantiza su destrucción. Como resultado de esta técnica se generan gases y cenizas las cuales pueden ser volátil,(80%) es que tiene su origen en la neutralización de estos gases formados durante la combustión, y la ceniza de fondo (20%) la cual aún posee ciertas cantidades de elementos químicos y metales pesados (Ni, Cr, Hg, As y Pb), lo que está en función de la composición química de los materiales de origen que hayan sido incinerados. Esta composición sigue cumpliendo con las características CRETIB por lo que aún requiere de una disposición final adecuada (Bouzón, 2017, p.28-32).

En Hazwat su incinerador gestiona 500 kg de residuos peligrosos por hora y funciona de la siguiente manera: en la cámara 1 se combustionarán los residuos peligrosos a una temperatura aproximada de 850 °C, a la cual se destruyen y se transforman en ceniza y gases de combustión. A continuación estos gases de combustión junto con el material particulado suspendido, pasan a la cámara 2 en la cual dos quemadores los destruyen una temperatura mayor a 1200 °C. Durante la destrucción térmica de estos residuos la empresa realiza el control de emisiones de gases residuales por vía húmeda y por neutralización de vapores, el material particulado es controlado a través de un sistema de tres ciclones, y la temperatura de los gases producidos se modera con un intercambiador de calor (HAZWAT, 2023).

La ceniza tiene características físicas y mecánicas similares al agregado fino de origen pétreo, el tamaño, forma, textura, estructura del poro son similares, razón por la cual en varios proyectos se ha reemplazado ciertos porcentajes de agregado fino por ceniza en el hormigón. Los productos desarrollados han tenido comportamientos similares al del mortero con el agregado natural, aunque se evidenciaron una disminución en la densidad y resistencia, y un incremento en la porosidad y absorción (Bouzón, 2017).

De acuerdo a lo enunciado por Benavides (2015), la ceniza de fondo de incinerador de analizada en un equipo de Difracción de Rayos X, está conformada por un 58% de óxidos por lo tanto es de tipo C según lo establecido por la ASTM. Así mismo, por ensayos granulométricos y físicos, determinó las propiedades físicas como se indica en la Tabla 1.2, esta empresa gestiona desechos peligrosos y especiales por incineración lo cual es similar a la gestión que Hazwat proporciona a estos residuos, por lo que se puede tener una idea de la composición química de la ceniza proveniente del incinerador de Hazwat:

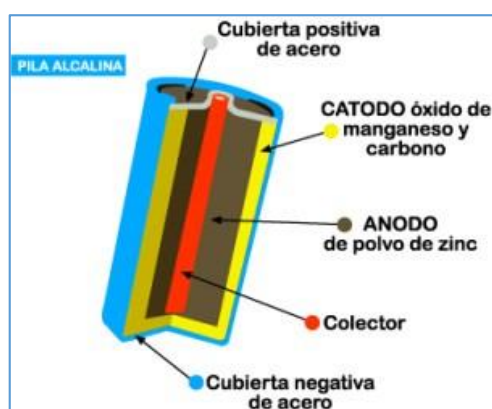
**Tabla 1.2** Composición química y propiedades físicas de la ceniza de fondo.

Ceniza de fondo del incinerador		
Composición química	Nombre	Porcentaje (%)
$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	Plagioclasa	35
$\text{SiO}_2$	Dióxido de silicio	29
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de hierro (III)	1
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Piroxeno	22
$\text{CaSiO}_3$	Silicato de calcio	6
$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Ortoclasa	5
$\text{FeO}(\text{OH})$	Oxihidróxido de hierro (III)	2

**Fuente:** (Benavides, 2015).

### Pilas agotadas o usadas

El término “pila” hace referencia a un “generador de electricidad” y destinado a almacenar energía en el caso de aquellas recargables que normalmente se les denomina “batería”. Las partes más importantes de una pila se exponen en la Figura 1.1.



**Figura 1.1** Partes de una pila alcalina

**Fuente:** (Serambiental, 2018)

Las pilas se clasifican comúnmente según la reacción química y química del ánodo, como a continuación se describe:

### **Clasificación según la reacción química.**

- **Primarias:**

Se da en su interior una reacción química irreversible por lo tanto son de una sola vida y ya no es posible recargarlas. Este tipo de pilas fueron las utilizadas en este proyecto.

- **Secundarias:**

La reacción química en su interior es reversible cuando se pone en contacto con la corriente eléctrica, por esta razón son recargables.

### **Clasificación según la química del ánodo:**

- **Salinas de carbón-zinc:**

Conocidas normalmente como pilas secas, contienen <0,025% de Hg.

- **Alcalinas de zinc-manganeso**

Conocidas como pilas de larga duración, contienen 0,1% de Hg.

- **Pilas botón:**

De óxido de mercurio (30% en peso de Hg), de ánodo de litio, de zinc-aire (1% de Hg) y de óxido de plata (1% de Hg). Desde los años 90's la cantidad de mercurio en estos tipos de pilas ha ido disminuyendo hasta en muchos productos ser eliminado, sin embargo muchas pilas utilizan metales pesados los cuales son tóxicos además del mercurio, y estos son: níquel litio, cadmio, zinc, cobalto y plata (Castells, 2012,p. 1055).

Las pilas de mayor uso son las Carbón-zinc y alcalinas que se diferencian en el electrolito que usan según se puede observar en la Tabla 1.3. Los elementos zinc y manganeso se consideran más seguros para las personas y el medio ambiente en comparación del mercurio utilizado anteriormente (Asociación Latinoamericana de Pilas y Baterías, 2015).

### **Funcionamiento de las pilas de una sola vida**

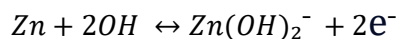
En el interior de la pila se producen reacciones de óxido-reducción que generan electricidad, en donde los electrones del elemento que se oxida, se transfiere al elemento que se reduce. Se producen dos semireacciones en los electrodos que generan energía eléctrica que se



transporta por el electrolito, la cual se descargará externamente cuando la pila esta insertada en el aparato eléctrico (Mejía, 2010).

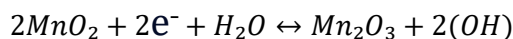
Las reacciones que se llevan a cabo en una pila alcalina son las siguientes:

Reacción de oxidación:



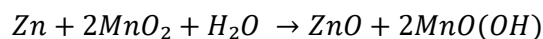
Rx.[1.1]. Reacción de oxidación

Reacción de reducción



Rx.[1.2]. Reacción de reducción

La reacción general:



Rx.[1.3]. Reacción general en una pila

### Usos

Las pilas comunes de C/Zn y Zn/Mn son utilizadas en todo equipo electrónico y eléctrico de bajo consumo.

### Disposición final de las pilas de una sola vida

El problema se centra en la liberación de los metales pesados que se encuentran en el interior de la pila desechada y que pueden ser altamente tóxicos siendo el más temido el mercurio, lo cual ocurre por una ineficiente gestión de estos residuos, que requieren de un desarmado del cuerpo de la pila y la separación de sus componentes. Una pila alcalina tiene el potencial de contaminar 175.000 litros de agua, lo cual demuestra el gran potencial de causar toxicidad a su alrededor, tanto al medio ambiente como a la salud humana. Se considera que una familia promedio produce aproximadamente al año, una tonelada de residuos del cual el 1% corresponde a pilas primarias, si no se realiza un reciclaje apropiado, en los propios rellenos sanitarios, estos contaminantes podrían alcanzar las aguas subterráneas (Mejía. 2010).

#### 1.4.8. Pilas utilizadas en el presente proyecto

En el presente proyecto se utilizaron pilas para el encapsulamiento provistas por el Centro de Remediación Ambiental HAZWAT, las cuales poseen determinadas características generales

y composición química específica. A continuación en la Tabla 1.3 y 1.4 se presentan las características generales y la composición, respectivamente:

**Tabla 1.3** Características generales de los tipos de pilas usadas utilizadas en el encapsulamiento.

Marca	Tipo	Forma	Capacidad	Cátodo	Ánodo	Electrolito
DURACELL INDUSTRIAL	Zn/Mn	Paralepí-Pedo	9V	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
DURACELL PLUSPOWER	Zn/Mn	Rectangular	4.5V	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
Energizer	Zn/Mn	Cilíndrica	D	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
Energizer	Zn/Mn	Cilíndrica	C	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
Energizer MAX	Zn/Mn	Paralepí-Peda	9V	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
GERMANTECH	C/Zn	Cilíndrica	AA	Hoja de Zn	MnO <sub>2</sub> +Grafito	NH <sub>4</sub> Cl+ZnCl <sub>2</sub>
GREENCELL	C/Zn	Cilíndrica	AAA	Hoja de Zn	MnO <sub>2</sub> +Grafito	NH <sub>4</sub> Cl+ZnCl <sub>2</sub>
Maxell	Zn/Mn	Paralepí-Pedo.	9V	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
Panasonic ULTRA HYPER	C/Zn	Cilíndrica	D	Hoja de Zn	MnO <sub>2</sub> +Grafito	NH <sub>4</sub> Cl+ZnCl <sub>2</sub>
Panasonic ULTRA HYPER	C/Zn	Cilíndrica	AA	Hoja de Zn	MnO <sub>2</sub> +Grafito	NH <sub>4</sub> Cl+ZnCl <sub>2</sub>
Polaroid	Zn/Mn	Cilíndrica	AAA	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
SONY	Zn/Mn	Cilíndrica	AA	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
SONY	Zn/Mn	Cilíndrica	AAA	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
SONY	Zn/Mn	Paralele-Pípeda.	9V	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
TOSHIBA	Zn/Mn	Cilíndrica	AAA	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO
ULTRAPLAST	Zn/Mn	Cilíndrica	C	Polvo de Zn(+Pb+Hg)	MnO <sub>2</sub> +C+KOH	KOH+6%ZnO

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 1.4.** Composición general de las pilas primarias utilizadas.

Tipo	Papel +Plast.	Zn (%)	MnO <sub>2</sub> (%)	Hg (%)	Ag (%)	C (%)	Fe (%)	Ni (%)	Cd (%)	Pb (%)	KOH/NaOH (%)	H <sub>2</sub> O (%)
C/Zn	9	18-20	28	<0,01	-	8	16	-	0,01	0,05	-	10
Zn/Mn	4	13-15	23	<0,025	-	3	35-37	-	0,025	0,05	5	8

**Fuente:** (Castells, 2012).

**C/Zn:** pila tipo carbón-zinc

**Zn/Mn:** pila tipo alcalina

#### 1.4.9. Materiales plásticos contaminados con residuos de minería

La industria minera genera subproductos contaminantes provenientes de las reacciones químicas llevadas a cabo para la extracción de los metales, pero también provenientes del uso de materiales como los plásticos usados para cubierta de piscinas de relaves. Entonces estos materiales pueden verse contaminados con sustancias químicas propias de la actividad minera como los metales pesados, solventes orgánicos, hidrocarburos (Nriagu, 1990).

En el presente estudio se contó con un plástico de polipropileno de alta densidad el cual estuvo impregnado de sustancias tóxicas propias de la actividad minera, los cuales fueron determinados por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, y estos fueron Pb, Hg, As, Cr.

#### 1.4.10. Hormigón como matriz encapsulante

El hormigón es un material que está compuesto en su mayor parte por agregado grueso (roca triturada) y agregado fino (arena), cemento en menor proporción y agua. Al entrar en contacto el cemento con el agua se produce un sistema de fases sólidas con diferentes grados de cristalinidad constituidos principalmente por calcio y son la portlandita, silicatos de calcio, aluminatos de calcio y ferrialuminatos de calcio. Muchas de las propiedades del hormigón dependen de la microestructura y la red de poros que se formó al hidratarse. Los poros que se formaron contienen en menor o mayor grado, una solución constituida por Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> iones básicos que le otorgan al hormigón la propiedad de ser muy alcalino, característica proporcionada por los cementos tipo portland. Los interiores de la microestructura del hormigón pueden darse una serie de procesos físicos y químicos que están en función de las condiciones a las que este expuesto, y al igual que la roca madre del suelo, este también puede sufrir deterioro en respuesta a condiciones ambientales que pueden o no ser adversas (Villar, 2019)

El hormigón solidificado presenta una estructura firme y compacta, la cual al albergar otros materiales, quedan bien retenidos, por este motivo en la actualidad se prueba reemplazar a los agregados por otros materiales (como es el caso del vidrio molido por el agregado fino) con los que el hormigón siga conservando sus propiedades, pero al mismo tiempo cumpla con otras funciones, como por ejemplo encapsular residuos sólidos, bloquear radiaciones electromagnéticas, etc. (Arista, 2022).

El hormigón constituye un material que posee propiedades como durabilidad, trabajabilidad, impermeabilidad y resistencia, debido a las cuales es utilizado específicamente en la construcción de diversas estructuras de gran envergadura como son edificios, puentes, carreteras, estructuras marinas, cimentaciones, ductos, tuberías, prefabricados, etc (Villar, 2019).

#### **1.4.11. Agregados para la formación del hormigón**

Los agregados que se utilizan tienen forma de grano de arena (arena) y roca triturada (ripio), los cuales al combinarse con el cemento y entrar en contacto con el agua, se forma un material con una estructura cristalina denominado hormigón o concreto cuyas cualidades dependerán de las propiedades de sus constituyentes, más la combinación de los agregados le confieren la alta resistencia característica, propiedad de la que depende la dosificación requerida.

Según la norma NTE 696 (INEN, 2011) las partículas de los agregados deben ser resistentes y presentar la granulometría apropiada que dé lugar a un hormigón que cumpla con todas las características que se requieren, y en función de estas formular una dosificación eficiente, que también proporcione la mayor resistencia a compresión.

Los agregados se pueden obtener mediante dos formas: de origen natural las cuales están en ríos, canteras, entre otros; o como producto de la trituración de rocas de características específicas para cumplir la función de agregado. Los agregados gruesos están formados por una combinación de roca triturada y grava cuyas partículas presentan un tamaño entre 5mm a 125 mm, en cambio los agregados finos están compuestos de arena natural o piedra triturada con partículas que deben ser menores a 5 mm. Para obtener partículas de este tamaño, se hace lo hace pasar por una serie de tamices, el Tamiz #4 (4.75mm) para el agregado grueso hasta el tamiz #100 (0.150mm) para conseguir el agregado fino, los cuales son los más apropiados para la formación del hormigón (Neville, 2013).

### Cemento:

El cemento es un material pulverizado con propiedades cohesivas, compuesto por altos porcentajes de óxidos de calcio (caliza) y sílice (arcilla o escoria de alto horno), específicamente sus porcentajes se exponen en la Tabla 1.5 Cuando entra en contacto con el agua, experimenta una reacción química que causa su endurecimiento por lo que se denomina hidráulico, el cual se clasifica en natural, portland y de baja albumina. El cemento se produce al calcinar la caliza y la arcilla en un horno rotatorio a una temperatura de  $1450^{\circ}\text{C}$  en donde parte del material se funde formando unas pequeñas rocas conocidas como Clinker, las cuales se tritura en un molino de bolas hasta conseguir un polvo finísimo con un tamaño de partícula entre 0,5 micras a 10 micras, que combinado con yeso da lugar al cemento portland que es comercialmente el más conocido. El cemento tiene la función de ser un aglomerante que al adicionar agua se endurece, fragua y forma compuestos estables, lo cual también ocurre al estar expuesto al vapor de agua del aire.

**Tabla 1.5** Porcentaje de composición del cemento.

<b>Composición del cemento</b>	
<b>Óxido</b>	<b>Contenido (%)</b>
CaO	60-67
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5-6,0
MgO	0,5-4,0
N <sub>2</sub> O	0,3-1,2
SO <sub>3</sub>	2,0-3,5

Fuente: (Neville, 2019)

### Cemento ARMADURO:

Se trata de un cemento Portland Puzolánico del Tipo IP, el cual cumple con los requisitos expuestos en la norma NTE INEN 49. Dichos requisitos se exponen en la Tabla 1.6 Posee una licencia ambiental y es producido por el grupo UNACEM. Este cemento tiene la característica de generar productos de alta resistencia inicial en menor tiempo desde los 7 días después de su formación, soportando hasta en 28 días entre 50 y 60 MPa de compresión. Permite generar hormigones de alta resistencia para la fabricación de postes, adoquines, bloques, bordillos, etc., optimizando su productividad, y para diseñar dosificaciones de hormigón a nivel laboratorio (UNACEM, 2021).

**Tabla 1.6** Requisitos físicos y químicos de ARMADURO

<b>REQUISITOS QUÍMICOS</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>INEN 490</b>	<b>ARMADURO</b>
Pérdida de calcinación	≤ 5%	1,4 %
Magnesio (MgO)	≤ 6%	
	≤ 4%	
<b>REQUISITOS FÍSICOS</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>INEN 490</b>	<b>ARMADURO</b>
Fraguado inicial	≤ 45-420 min	120 min
Expansión	≤ 0,8%	0,04%
Contenido de aire	≤ 12%	4,50%

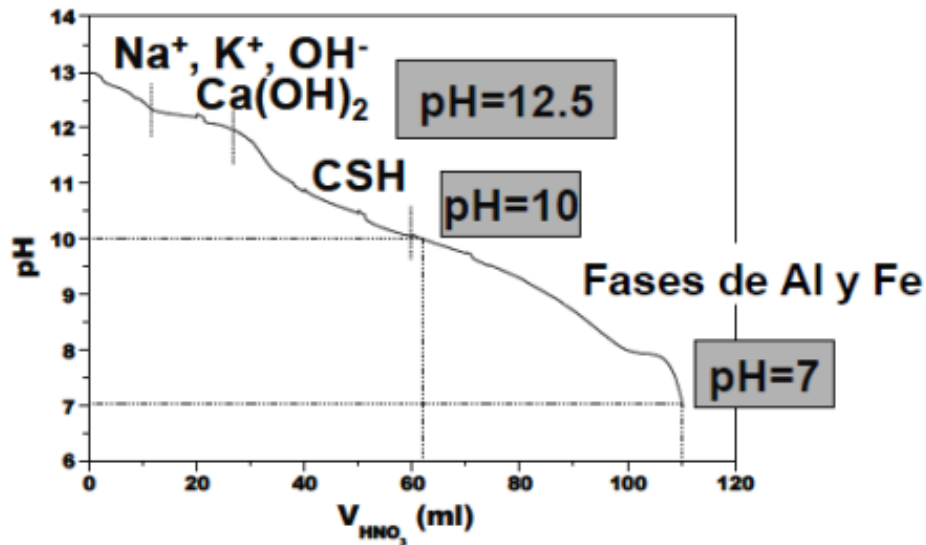
Fuente: (UNACEM, 2021)

#### 1.4.12. Lixiviación en el hormigón

El hormigón es un material estructural que al estar expuesto a la intemperie, interactúa con el medio ambiente, cuando lo hace con el agua y esta presenta bajo contenido de iones, se da lugar a la formación de un líquido conocido como lixiviado en el cual, el agua ha arrastrado o extraído elementos del hormigón que podría alterar su estructura. Esta interacción da lugar a un gradiente iónico producido entre el agua del exterior y la solución que se encuentra en el interior de los poros del hormigón, produciéndose así una difusión en la que los iones fluyen hacia el exterior del material (Villar, 2019)

Los primeros iones en lixiviarse son los de carácter alcalino,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . La lixiviación de estos iones de la solución del poro ocasionan cambios químicos de la misma, produciendo la disolución de las fases sólidas que contienen calcio que forma parte de hidróxidos y silicatos, en especial del gel silicato cálcico hidratado.

Esta solubilización depende del pH de la solución del poro, e inicia con la disolución de los hidróxidos de sodio y potasio, lo cual ocurre a un pH igual a 13. Luego de esto se disuelve el hidróxido cálcico conocido también como portlandita cuando ha descendido el pH a 12.5, a continuación cuando el pH se sitúa entre 12.5 y 10<sup>0</sup>, comienza a disolverse el silicato cálcico hidratado, y por último al descender por debajo de un pH 10<sup>0</sup>, se solubilizan las fases constituidas por hierro y aluminio. En la Figura 1.2. Se puede observar la disolución de las fases sólidas del hormigón a medida que disminuye el pH de la solución de los poros (Villar, 2019, p.6).



**Figura 1.2** Disolución de las fases sólidas del hormigón en función del pH del fluido de sus poros.

Fuente: (Villar, 2019, p.6).

#### 1.4.13. Instrumentos Normativos utilizados en el presente estudio

##### Acuerdo Ministerial No. 142

Fue publicado en el año 2012, mediante el Registro Oficial Suplemento 856, con el principal objetivo de poner a disposición de los ciudadanos el listado nacional de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos, la cual está repartida en tres anexos, cada uno de los cuales hace referencia a un listado en función de la toxicidad y otro en función de la fuente de contaminación. El Anexo A consta de tres listados que toman como referencia a las sustancias químicas peligrosas prohibidas, de toxicidad aguda y de toxicidad crónica. En el Anexo B se enlistan los desechos en función de la fuente, si esta es específica o no. En el Anexo C se enlistan los desechos especiales. Cada sustancia enlistada posee un código para ser identificada, el cual indica su característica CRETIB (MATTE, 2012).

##### Ordenanza Municipal No. 404

Esta ordenanza tiene como objetivo evaluar los diferentes impactos y riesgos ambientales que puedan ocurrir en los procesos productivos, y actividades que están sujetas al cumplimiento de la Normativa ambiental Nacional. En la misma se establecen mecanismos de seguimiento y verificación del cumplimiento de las actividades autorizadas con el fin de

garantizar un ambiente sano. Además, establece los parámetros de indicadores de calidad para la gasolina, diésel, criterios referenciales para la calidad del suelo y valores máximos permisibles para criterios de remediación del suelo, ensayos de lixiviación para metales pesados, desechos. A pesar de haber sido derogada en el año 2013, se la sigue aplicando al ser la única normativa que contempla límites para contaminantes en extracto PECT y en base seca.

#### **Acuerdo No. 026**

Contiene los procedimientos para registro de generadores de desechos peligrosos, gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental, y para el transporte de materiales peligrosos. Está vigente desde febrero de 2008 hasta la actualidad, y dirigido a personas nacionales y extranjeras que generen estos desechos, o que presten servicios de gestión integral de los mismos, o que presten servicios de transporte.

#### **1.4.14. Centro de remediación ambiental de HAZWAT**

Esta empresa está ubicada en el cantón Cayambe. Sus actividades se centran en la atención a clientes en los sectores: industrial, petrolero, alimenticio, farmacéutico, floricultor, hospitalario, público entre otros (Hazwat, 2022).

El Centro de Remediación Ambiental de HAZWAT inició sus actividades en el año 2003 como una empresa ecuatoriana dedicada en un inicio al tratamiento final de residuos especiales y peligrosos como apoyo a las diferentes industrias ecuatorianas. En la actualidad ha incrementado su cartera de servicios con: biorremediación, compostaje, encapsulación, inertización, incineración y manejo de químicos. Además cuenta con certificaciones ISO 9001, ISO 14001, ISO 14064, Carbono neutro y huella de carbono. La empresa en la actualidad gestiona residuos peligrosos y especiales de todo tipo tanto sólidos como líquidos, además de productos no alimenticios caducados, destrucción de marca, sustancias ilícitas sujetas a fiscalización, etc. (HAZWAT. 2021).

La empresa cuenta actualmente con una planta operativa en Cayambe y otra en Lago Agrio, sin embargo, tiene como visión expandirse a todas las regiones del Ecuador. (Cámara de Comercio de Quito, 2023).



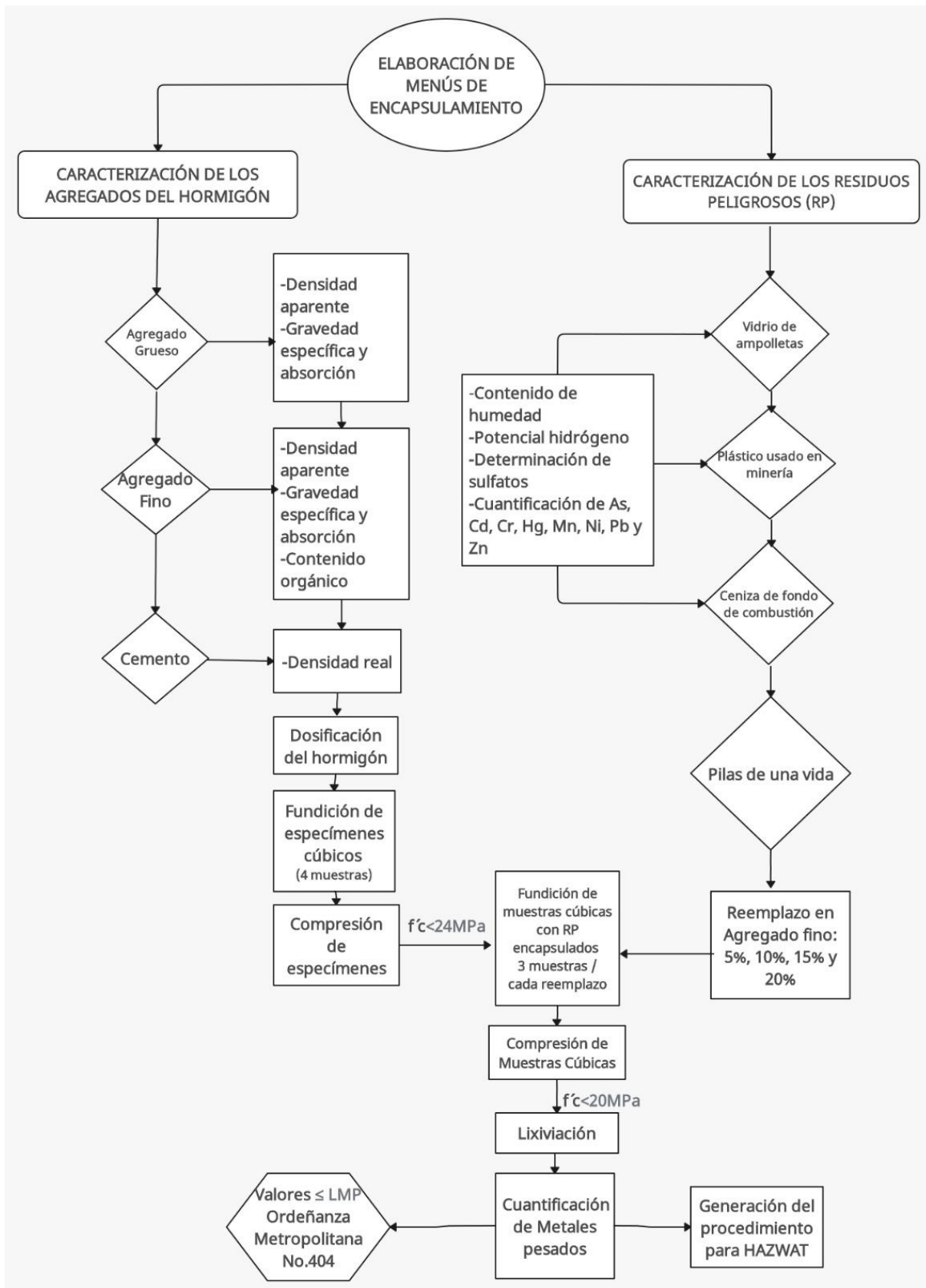
## 2. METODOLOGÍA

La formulación de cuatro menús que generen cubos de hormigón en los que se encapsule la mayor cantidad de residuos peligrosos, se introduzcan pilas usadas en su interior y al mismo tiempo se reduzcan procesos de infiltración y difusión de contaminantes hacia el exterior y que puedan afectar al suelo, al agua subterránea y a la salud humana; requirieron de la caracterización de los materiales que componen el hormigón, cuyas propiedades influyen directamente en la resistencia del mismo.

La resistencia del hormigón depende directamente de la resistencia y cualidades de sus constituyentes, por lo cual se utilizaron en este proyecto agregado grueso “ripio de Pifo” y del agregado fino “chispa” los cuales son conocidos en el mercado por generar un hormigón de una estructura muy compacta, así también del cemento “ARMADURO” el cual presenta alta resistencia en alrededor de 7 días y está indicado para la fabricación de mampuestos rígidos. Los materiales fueron sometidos a ensayos de: granulometría, densidad aparente, peso específico y tamaño máximo nominal al agregado grueso y fino. También se realizó el ensayo de abrasión al agregado grueso, ensayo de contenido orgánico al agregado fino y el ensayo de densidad real solo al cemento.

Así también, se realizó la caracterización de los residuos peligrosos seleccionados con el fin de determinar si sus características podrían afectar la resistencia del hormigón, en los que se consideró la presencia de metales pesados como As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni, Zn y Mn, pues algunos se tratan de contaminantes que podrían propiciar procesos de disolución de las fases sólidas del hormigón, inestabilidad de su estructura y por consiguiente liberar los residuos encapsulados en poco tiempo.

Para estos residuos se requirieron de ensayos como: humedad, potencial hidrógeno (pH), presencia de sulfatos y cuantificación de metales pesados para establecer su concentración inicial. Se tomaron en cuenta estos elementos contaminantes en base al origen en el que los materiales se convirtieron en residuos peligrosos. También por formar parte de los listados nacionales de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales estipulados en el Acuerdo Ministerial No.142 publicado mediante el Registro Oficial N° 856 (MAATE, 2012); y por estar determinados como contaminantes en la Norma Técnica de desechos peligrosos y especiales, Art 10 de la Ordenanza Municipal No.404 (O.M.N°.404), Resolución No.002-SA-2014 ya derogada.



R.P. residuos peligrosos;  $f'c$ : resistencia a la compresión;  
**Figura 2.1** Metodología de trabajo para el encapsulamiento de R.P.

Con los cuatro menús formulados se construyeron 3 cubos de hormigón en los que se reemplazó parte del agregado fino por 5%, 10%, 15% y 20% de residuos peligrosos y en cuyo interior se colocaron las pilas de una sola vida. Luego estas muestras fueron sometidos a pruebas mecánicas para determinar la resistencia a la compresión tanto de los encapsulados como de los testigos (blancos). Finalmente se sometieron a las muestras cúbicas a un proceso de lixiviación con el Método 1315 de la EPA, simulando condiciones del medio ambiente y cuyo lixiviado se analizó a través de espectroscopia atómica, para determinar la presencia de contaminantes, cuya concentración fue comparada con los LMP de la OM N°.404. El menú más apropiado fue el que generó la muestra que encapsuló la mayor cantidad de residuos y en el que su resistencia a la compactación se mantuvo alrededor de 210 kg/m<sup>2</sup>.

### Área de estudio

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con residuos obtenidos de la planta operativa de Cayambe ubicada en el cantón Cayambe, provincia de Pichincha en el kilómetro 37,5 de la Panamericana norte junto a la comuna de San Francisco de Otoncito. Ubicada a una altura de 2680 m sobre el nivel del mar, en donde se presentan temperaturas mensuales con un promedio entre 14,5 a 15,5 °C. El principal uso del suelo en el lugar es la producción agropecuaria (HAZWAT, 2021; GADMC, 2020).



**Figura 2.2** Ubicación del CRA de HAZWAT

Fuente: Google Earth

### Recopilación de datos- Selección de residuos

Los desechos peligrosos fueron seleccionados a partir de un listado de proyección de residuos

proporcionado por la empresa HAZWAT, el cual contenía las cantidades y código de cada desecho cómo es posible observar en el Anexo I. Se escogieron cuatro tipos de desechos peligrosos tomando en cuenta la mayor cantidad y mayor disponibilidad en la empresa. Posteriormente se realizó un reconocimiento del CRA el 01 de diciembre del año 2022. No se realizó muestreo de los residuos, pues fueron entregados en cantidades determinadas por la empresa como se puede observar en la Tabla 2.1 a continuación:

**Tabla 2.1** Listado de residuos entregados por el CRA de Hazwat

Tipo de residuo	Residuo seleccionado	Cantidad	Observación
Ceniza de fondo de cámara de combustión	Plástico usado en minería	45 kg	-
Vidrio de ampollitas o cualquier tipo de vidrio del cual haya disponibilidad	Ceniza de fondo de cámara de combustión.	50 kg	Triturado
Pilas y baterías de distintas clases	Pilas y baterías de una sola vida.	10 kg	-
Plástico usado en minería	Frascos de perfumes y vidrio de ampollitas.	40 m <sup>2</sup>	-

## Caracterización de los materiales que conforman el hormigón

Los análisis para la determinación de las propiedades físicas del agregado fino, agregado grueso y del cemento que conforman el hormigón (material encapsulante) fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Escuela Politécnica Nacional, a partir del día 20 de enero de 2023. Se realizaron estos ensayos con el fin de determinar las condiciones apropiadas de los componentes del hormigón que permitieran diseñar un hormigón de tipo estructural con una resistencia superior a 210 kg/cm<sup>2</sup> valor en el cual se reducen procesos de infiltración en su interior.

### 2.1. Propiedades físicas de los agregados

#### 2.1.1. Peso específico del agregado grueso

Este procedimiento se realizó conforme lo estipulado en la Norma ASTM C127 Método de prueba estándar para determinar la densidad, gravedad específica y absorción de agregado grueso (American Society for Testing and Materials, 2020).

- De forma anticipada se midió el peso de una canastilla sujeta a una balanza la cual se encontraba introducida en un cubo lleno de agua.
- Se colocaron 3 kg de agregado grueso previamente lavado (ripió de la marca Holcim) en el interior de una bandeja con agua durante 24 horas con el fin de que el material se sature.
- Transcurrido este tiempo se procedió a secar con una franela, 2 kg de las rocas de mayor tamaño (alrededor de 1 pulgada) hasta dejarla seca y sin brillo en la superficie, y al mismo tiempo con su interior está saturado con agua (condición SSS).
- Se colocó este material en el interior de la canastilla, se sumergió en el agua y se midió el peso el cual fue registrado.
- Se llevó este material al horno a 110°C y 24 horas, después de lo cual se pesó nuevamente.

### 2.1.2. Densidad Relativa

#### Densidad Relativa Seca

Se determinó la densidad relativa seca con la Ecuación [2.1]:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II.

$$OD = \frac{A}{B - C}$$

Ec. [2.1]

Donde

OD: densidad relativa seca del agregado grueso

A: masa del agregado secado al horno (g)

B: masa de agregado saturada con superficie seca en el aire (g)

C: masa de la muestra de prueba saturada en agua (g)

#### Densidad relativa saturada con superficie seca (SSS)

Este parámetro se determinó mediante la Ecuación [2.2]:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II.

$$SSD = \frac{B}{B - C}$$

Ec.[2.2]

#### Absorción de agua

Se calculó también el porcentaje de absorción de agua con la Ecuación [2.3]:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II.

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{B-A}{A} \right] \times 100 \quad \text{Ec.}[2.3]$$

## 2.2. Propiedades físicas del agregado fino

### 2.2.1. Peso específico

- Se sumergió 1 kg de agregado fino (arena del sector de Pifo) previamente lavado en agua durante 24 horas para saturar el material.
- Luego de este tiempo, escurrir el agua y pesarlo.
- A continuación, colocar en el horno a 110°C durante 10 minutos para eliminar el exceso de agua, medir el peso nuevamente.

#### Prueba del cono:

Se realizó la prueba del cono con el fin de determinar la absorción del agregado fino y la humedad en la superficie.

- Se secaron 300 g de este material saturado a 110°C durante 10 minutos.
- Se llenó con parte del material un molde metálico colocado sobre una bandeja.
- Se dejó caer un pisón metálico a una pequeña altura durante 7 veces, con la compactación disminuyó la altura del material y se debió agregar otra cantidad hasta que se llene el cono y se dejó caer nuevamente 7 veces el pisón.
- Este paso se repitió hasta que se completen 25 golpes con el pisón .
- Finalmente se levantó el molde hacia arriba con mucho cuidado para que no se desmorone el material con lo cual se consiguió la condición óptima de material SSS (agregado saturado con superficie seca), como es posible observar en la Figura 2.3.



**Figura 2.3** Determinación de la densidad aparente del agregado fino (prueba del cono)

Estos ensayos para el agregado fino se realizaron conforme a lo estipulado en la Norma ASTM C128 Método de prueba estándar para determinar la densidad, gravedad específica y

absorción (American Society for Testing and Materials, 2023).

También se determinó el volumen del material y su masa sin el aire en el interior de sus partículas, como se describe a continuación:

- Se colocaron 300 g de agregado fino en el interior de un matraz de 500 ml junto con 100 ml de agua.
- Se giró el matraz de forma circular para que se homogenice el agregado con el agua y se desprendan las burbujas del interior.
- Se tapó el matraz y se colocó una manguera conectada a una bomba la cual extrajo el aire del interior del matraz como se puede apreciar en la Figura 2.4, a continuación se midió la masa del agregado fino junto con el matraz y se registró este dato.



**Figura 2.4** Extracción del agua con la bomba de vacío

## 2.2.2. Densidad Relativa

### Densidad Relativa Seca

Se determinó la densidad relativa seca con la Ecuación [2.4] a continuación:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II

$$SH = \frac{A}{B + S - C}$$

Ec.[2.4]

Donde

A: masa del material secado al horno (g)

B: masa del matraz llenado con agua (g)

C: masa del matraz llenado con el agregado y agua (g)

S: masa del agregado saturado y superficialmente seco (g)

### Densidad Relativa saturada y superficialmente seca

Se determinó también la densidad relativa saturada y superficialmente seca del agregado fino con la Ecuación [2.5] a continuación:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II

$$SSS = \frac{S}{B + S - C} \quad [2.5]$$

#### 2.2.3. Absorción

Se calculó también el porcentaje de absorción de agua con la Ecuación [2.6]:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{S - A}{A} \right] \times 100 \quad [2.6]$$

Se realizó también la prueba del cono con el objetivo de determinar la humedad superficial

### 2.3. Densidad aparente

como lo estipula la Norma ASTM C29 Método de Ensayo Normalizado para determinar la densidad aparente (“peso unitario”) e índice de huecos en los áridos (American Society for Testing and Materials, 2017).

#### 2.3.1. Densidad aparente suelta del agregado grueso y el agregado fino

- Se utilizó un cuerpo cilíndrico metálico cuyo peso y dimensiones fueron registradas inicialmente con el fin de determinar el volumen de este.
- Se llenó de agregado grueso dicho cilindro y con una varilla se arrastró el material que sobresalía hasta igualar este con la altura del cilindro, como se puede apreciar en la Figura 2.5.
- Como último paso se pesó el cilindro lleno del material.

El mismo procedimiento se realizó con el agregado fino.





**Figura 2.5** Agregado grueso siendo igualado con la altura del cilindro

### **2.3.2. Densidad aparente compactada del agregado grueso y agregado fino**

Se realizó el mismo procedimiento para el agregado fino y de igual manera por duplicado como lo estipula la Norma ASTM C29 Método de Ensayo Normalizado para determinar la densidad aparente (“peso unitario”) e índice de huecos en los áridos (American Society for Testing and Materials, 2017).

- El cuerpo cilíndrico de peso ya conocido fue lleno con el agregado grueso, seguido se le dio 25 golpes con la varilla luego de lo cual el material quedó compactado y se adicionó más agregado grueso hasta que llene completamente.
- A continuación, se dio nuevamente 25 golpes con la varilla y se llenó nuevamente de material hasta que se compacte y esté a la misma altura del cilindro.
- Finalmente, se pesó el cilindro con el material lleno, se realizó este procedimiento por duplicado.

### **2.4. Densidad real del cemento**

Este ensayo se aplica exclusivamente al cemento, se ejecutó el procedimiento señalado en la Norma ASTM C188-17 Método de prueba estándar para determinar la densidad del cemento hidráulico (ASTM, 2023). El objetivo de este procedimiento fue determinar la masa del cemento sobre su volumen real cuya propiedad influye en el diseño del hormigón. La ejecución de este ensayo se describe a continuación:

- Se utilizó un frasco de Le Chatelier de capacidad de 250 ml en el cual se colocó gasolina hasta el rango marcado entre 1 y 0 en el primer cuello del embudo.
- A continuación, se colocó en una lavacara metálica agua caliente y se dejó reposar

hasta que la temperatura descendió a 23°C.

- En este punto se sumergió el embudo Le Chatelier hasta que la gasolina en su interior alcanzara los 23°C lo cual se monitoreaba con un termómetro.
- Se secó bien el embudo y se midió su peso.
- En seguida se colocó el cemento cuidadosamente dentro del frasco con la ayuda de una espátula, tratando de que el cuello no se tape hasta que llegará a 18,5 ml marcados en el mismo.
- Después de esto, se lo hizo girar sobre un paño hasta que se desprendieran las burbujas del interior del cemento que no se mezcló con la gasolina, como puede observarse en la Figura 2.6.
- Finalmente se introdujo el embudo con gasolina y cemento nuevamente en la bandeja con agua caliente hasta que la gasolina en su interior alcanzara los 23 °C, momento en el cual se retiró el embudo y se midió su peso con el frasco bien seco.

Este parámetro se calculó con la ecuación [2.7] a continuación:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II.

$$\rho = \frac{P_f - P_o}{V_f - V_o}$$

[2.7]

Donde:

P: densidad real del cemento (g/cm<sup>3</sup>)

Po: peso inicial del frasco Le Chatelier con la gasolina a 23°C (g).

Pf: peso final del frasco Le Chatelier con la gasolina y el cemento a 23°C (g).

Vo: volumen inicial de la gasolina en el primer cuello del embudo (cm<sup>3</sup>).

Vf: volumen final de la gasolina en el segundo cuello del frasco al agregar el cemento (cm<sup>3</sup>).



**Figura 2.6** Determinación de la masa del cemento y gasolina a 23 °C

## 2.5. Granulometría

Este ensayo tuvo por objetivo separar los tamaños de las partículas que constituyen al agregado, a través de procedimientos mecánicos que involucraron tamices con aberturas de diferentes tamaños, con el fin de determinar el peso de cada uno de estos.

Para su determinación en el agregado grueso y fino, se tomó en cuenta el procedimiento descrito en las Normas ASTM C136 y ASTM C33 Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos y el ensayo de Especificación estándar para agregados del concreto (American Society for Testing and Materials, 2017 y 2003).

### 2.5.1. Granulometría del agregado grueso

Se llevó a cabo este ensayo sobre el agregado grueso con el fin de separar las pequeñas rocas que constituyen el material en diferentes tamaños y determinar el tamaño máximo nominal (abertura del tamiz por donde pasará la mayor parte del agregado), para lo cual se procedió de la siguiente manera:

- Se colocaron 5 kg en la parte superior de un tamiz mecánico el cual constaba en su interior de varios tamices de medidas descritas en la Tabla 2.2.
- Se agitó el material durante 5 minutos para la respectiva separación.
- Se retiró cada uno de los tamices y se midió el peso del material retenido en cada uno de ellos como se aprecia en la Figura 2.6.
- Se registraron estos datos.

**Tabla 2.2** Número de tamices con su respectivo tamaño de abertura para el agregado grueso

No. Tamiz	Tamaño de abertura (mm)
1"	25,00
3/4"	19,00
3/8"	9,50
No. 4	4,75
No. 8	2,36
Bandeja	-

**Fuente:** ASTM C33/C33M-18 (2018).



**Figura 2.7** Tamizado mecánico del agregado grueso

### 2.5.2. Granulometría del agregado fino

Este ensayo tuvo el objetivo de separar sus partículas constituyentes y determinar el número de tamiz en donde queda retenido la mayor parte del material, se procedió de la siguiente manera:

- Se tomaron 500 g de agregado fino y se colocaron sobre una serie de tamices manuales apilados en diferentes números como se aprecia en la Tabla 2.3.
- Se agitó este sistema de tamices con movimiento circulares durante 5 minutos, como se aprecia en la Figura 2.8.
- Se procedió a retirar cada uno de los tamices y se midió el peso del material retenido en cada uno de ellos.
- Finalmente se registró el peso.

**Tabla 2.3** Gradación para agregado fino según el número de tamiz

No Tamiz	Tamaño de abertura (mm)	Porcentaje que atraviesa
3/8"	9,50	100
4	4,75	95 -100
8	2,38	80-100
16	1,19	50-85
30	0,59	25-60
50	0,30	10-30
100	0,15	2-10
200	0,075	
Bandeja	-	

**Fuente:** ASTM C33/C33M-18 (2018).



**Figura 2.8** Tamizado del agregado fino

## 2.6. Ensayo de Abrasión del agregado grueso

El ensayo de abrasión tiene el objetivo de determinar el porcentaje de desgaste del agregado grueso cuando se le aplica impacto o fricción con otros cuerpos.

### Máquina de Los Ángeles

La máquina de “Los Ángeles” tiene por objetivo analizar el desgaste del agregado grueso con un tamaño menor a una y media pulgada (37.5 mm). Esta máquina consiste en un cilindro de acero el cual es un tambor que gira alrededor de 31 a 33 rpm. En este ensayo se mide la gradación del agregado grueso que resulta de la fricción entre el material y las bolas de acero que se colocan en el interior del tambor, se lo puede apreciar en la Figura 2.9 (LABSP, 2017).



**Figura 2.9** Equipos utilizados en el ensayo de abrasión

Para este trabajo de investigación se utilizó la máquina de “Los Ángeles” según lo estipula la Norma ASTM C33M-13 Especificación estándar para agregados de concreto (American Society for Testing and Materials, 2013), como se describe a continuación:

- Se pesaron 5 kg de ripio y se colocaron en el interior del tamizador electrónico con

tamices de 3/4", 1/2", 3/8" y una bandeja en el fondo, separados en dos mitades.

- Se recogieron los 2500 g retenidos en el tamiz de 3/8", y los 2500 g restantes del material que retenidos en el de 1/2".
- Se colocó todo el agregado grueso que se retuvo en los tamices en el tambor de la máquina de "Los Ángeles" junto con las 11 bolas de acero.
- Se programó el tambor para que girara 100 revoluciones por minuto, se recogió el material en el tamizador eléctrico en donde se colocaron las bandejas N°8 y N°12 y se lo tamizó por 2 minutos.
- Se midió el peso del material retenido en los tamices N°8 y N°12 y se colocaron otra vez en el tambor de la máquina de "Los Ángeles" junto con 11 bolas de acero, como se aprecia en la Figura 2.10.
- Se programó que el tambor girara 500 revoluciones por minuto. Seguido se colocó nuevamente el material recogido en el tamizador electrónico con las bandejas N°8 y N°12 durante 2 minutos. Se obtuvo el material retenido en una sola bandeja el cual fue pesado.



**Figura 2.10** Retiro del agregado grueso retenido en el tamizador electrónico

El procedimiento descrito fue sobre la base de la Tabla V.1 de la Norma ASTM C131/C131M-20 Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina "Los Angeles", que se encuentra colocada en el Anexo V (American Society for Testing and Materials, 2020).

## **2.7. Contenido Orgánico del agregado fino**

El ensayo de contenido orgánico fue aplicado solo al agregado fino y tiene el objetivo de detectar aproximadamente la presencia de impurezas orgánicas que podrían afectar a la elaboración del hormigón. Para esto se aplicó lo señalado en la Norma ASTM C40/C40M-20 Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos

para hormigón (American Society for Testing and Materials, 2020). Se ejecutó el ensayo como se describe a continuación:

- Se colocó en un frasco transparente de vidrio y de boca ancha con capacidad de 250 ml y marcado con 130 ml y 200 ml, agregado fino hasta la etiqueta de 130 ml,
- Se agregó 200 ml de una solución de hidróxido de sodio al 3% (NaOH) hasta la etiqueta de 200 ml.
- Se tapó el frasco con la tapa esmerilada y se agitó de forma vigorosa.
- Se dejó reposar esta mezcla durante 24 horas, como se observa en la Figura 2.11.
- Transcurrido este tiempo, se colocó junto al frasco la cartilla de prueba que contenía 5 colores (N° 815 TESTER for ASTM C-40) y se realizó la comparación del color del líquido sobrenadante con los colores reflejados en la cartilla.



**Figura 2.11** Mezcla del hidróxido de sodio con el agregado fino

## **2.8. Caracterización de los residuos peligrosos a encapsular**

Estos conjuntos de procedimientos se llevaron a cabo en el Laboratorio docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la EPN a partir del 26 de enero de 2023, con el objetivo de determinar pH, humedad y contenido de sulfatos, parámetros que podrían afectar a la estructura del hormigón.

Para el encapsulado de los residuos peligrosos, se tomaron en cuenta solo a los tres tipos: plástico usado en minería, vidrio de perfumes y ampollitas y ceniza de combustión de residuos peligrosos y especiales; los cuales habrían de ser parte de la mezcla de agregados fino y grueso, cemento, agua y residuos peligrosos fragmentados como se puede apreciar en la Figura 2.12. Las pilas no fueron abiertas ni trituradas debido a la gran cantidad de elementos tóxicos que posee, por lo que se consideró sería apropiado que permanecieran intactas en el interior del cubo a fin de que en el encapsulamiento continuaran retenidos en

el interior de su cuerpo.



**Figura 2.12** Residuos peligrosos pulverizados

### 2.8.1. Ensayo de contenido de humedad

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la cantidad de agua presente en las muestras de cada uno de los residuos, para reportar su peso en base seca y para que el agua no interfiriera en el resto de ensayos a realizar sobre las muestras de residuos peligrosos. Para la ejecución de este ensayo, se procedió de la siguiente manera:

- Se utilizaron 5 crisoles pequeños y limpios y se midió el peso de cada uno.
- Se los colocó en un horno (marca: DURANT; modelo: SP 7-1-L-CL) a temperatura de 110 °C durante 2 horas.
- A continuación, se colocaron en el desecador durante 1 hora. Una vez fríos se midió el peso de cada uno manipulándolos con una pinza para no afectar su peso. Se realizó este paso debido a que el material de los crisoles absorbe humedad del ambiente y esto podría afectar los resultados.
- Se pulverizaron las dos muestras de residuos peligrosos: vidrio de ampollitas y perfumes y ceniza de combustión de residuos peligrosos y especiales, mientras que el plástico usado en minería fue fragmentado en pedazos de 0,5 cm aproximadamente.
- Se pesaron 2 g de cada uno de los residuos.
- Se colocaron en el horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas.
- Transcurrido este tiempo se midió su peso y se registraron los valores respectivos.

Se calculó el porcentaje de humedad para cada uno de los residuos con la Ec.[2.7]:

El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo II.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(Pr - Pf)}{(Pr)} \times 100$$

Ec. [2.7]



Donde:

Pi: peso del crisol antes de ingresar al horno.

Pr: peso del crisol más la muestra de residuo peligroso húmedo

Pf: peso del crisol más la muestra de residuo peligroso después de salir del horno

### 2.8.2. Ensayo de potencial hidrógeno (pH)

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la concentración de iones hidrógeno, cuya presencia podría influir en la movilidad de los metales pesados que se encuentran en los residuos peligrosos que se trataron (Antonadis et al., 2017).

- Se colocaron 2 g del vidrio de ampollitas y perfumes pulverizado en un vaso de precipitación de 100 ml, a continuación, se agregaron 6 ml de agua destilada y se revolvió la mezcla.
- Se midieron el pH con el medidor multiparámetros y se registró el valor, como se observa en la Figura 2.13.
- Se realizó el mismo procedimiento para la muestra de ceniza. Para el plástico de minería se colocaron 2 g en 60 ml, debido al gran volumen de la muestra la cuál por sus características requirió de mayor cantidad de disolvente.



**Figura 2.13** Determinación del pH de las muestras de residuos

### 2.8.3. Ensayo de determinación de sulfatos

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la posible presencia de sulfatos en las muestras, ya que unas altas concentraciones de estas sales habrían podido interferir en el correcto fraguado del hormigón (NTE INEN 2503: 2009). Esto pudo haber restado resistencia a la matriz encapsulante y como consecuencia causar un ineficiente encapsulado. El ensayo fue llevado a cabo en el LDIA, el día 30 de enero de 2023. Para la ejecución de este ensayo

se procedió de la siguiente manera:

- Se colocaron 3 g de vidrio pulverizado junto con 100 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer de 250 ml de capacidad.
- Se colocó esta mezcla sobre una plancha de agitación a velocidad constante, durante una hora.
- En el espectrofotómetro se seleccionó el programa *680 Sulfate*, el cual está señalado para la determinación de radicales sulfato.
- Se colocaron 10 ml de la muestra en una celda que se utilizaría como blanco y se insertó en el espectrofotómetro para encerrar el equipo.
- Se llenó otra celda con otros 10 ml de la mezcla en la cual se disolvió el contenido de un sobre de reactivo *Sulfaver 4* y se agitó vigorosamente la celda hasta disolver el reactivo.
- Se insertó la celda en el espectrofotómetro y se midió la concentración de sulfatos.
- Se realizó un duplicado y se repitió este paso con las muestras de ceniza y plástico de minería.

## 2.9. Cuantificación de metales pesados existentes en las muestras de residuos peligrosos

Los metales pesados analizados fueron considerados de acuerdo al origen o a la actividad en las que se originaron estos residuos como desechos peligrosos y especiales, y conforme a sus características CRETIB indicadas en la Resolución No.002 de la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales perteneciente a la Ordenanza Metropolitana No.404 (Municipio del distrito Metropolitano de Quito, 2014, p.67-74). Estas sustancias también fueron tomadas en cuenta por encontrarse en los Listados Nacionales de Sustancias Químicas Peligrosas, Desechos Peligrosos y Especiales establecidos en el Acuerdo Ministerial No. 142 (MAE, 2012).

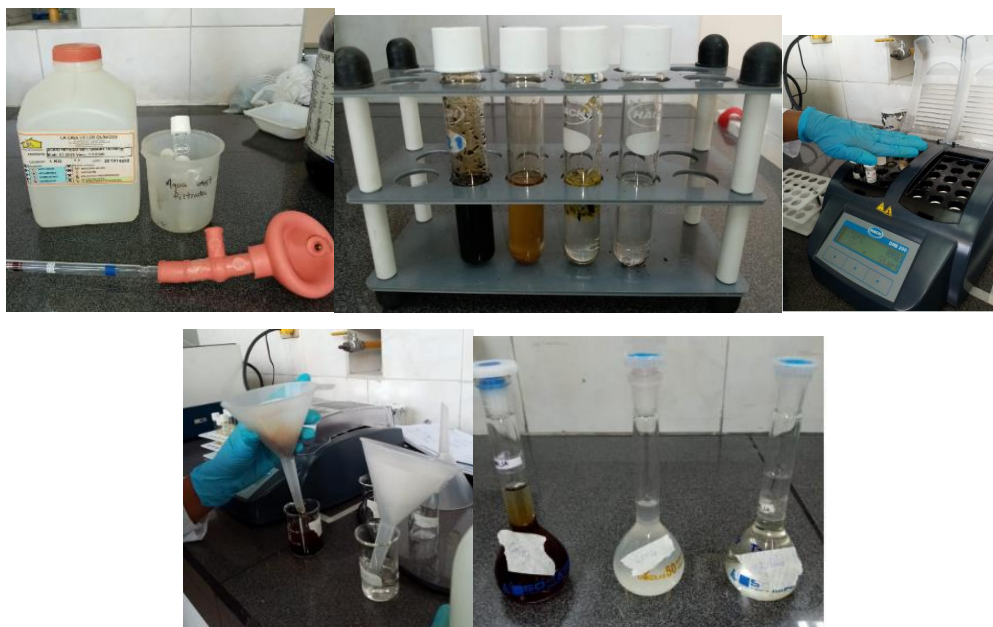
Los metales a cuantificar se encuentran enlistados en la Tabla 2.4 a continuación:

**Tabla 2.4** Metales pesados a cuantificar en las muestras digeridas de RP

Código	Tipo de muestra	Metales pesados a cuantificar
M1	Ceniza de incinerador	As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni, Zn
M4	Vidrio de perfumes y ampollitas	Cr y Mn
M5	Plástico usado en minería	As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni, Zn

La cuantificación de los metales presentes en cada una de las muestras, requirió de una digestión ácida para ser analizadas en líquido en un espectrofotómetro de Absorción Atómica. Se ejecutó el método de Digestión por ácido nítrico/perclórico (NIOSH, 2003, p.1-3) sin utilizar ácido perclórico debido a que podía dañar el equipo. Se procedió de la siguiente manera:

- Se pesaron 0,25 g de la muestra pulverizada de vidrio de perfumes y ampollitas.
- Se colocó esta cantidad dentro de un vial y se añadieron 5 ml de ácido nítrico al 68%.
- Se tapó bien el vial y se homogenizó la mezcla.
- Se agregaron 5 ml de este ácido en otro vial el cual serviría de blanco.
- Se colocó el vial en un digestor y se fue programado a una temperatura de 150 °C durante 30 minutos.
- Se dejaron enfriar los viales, y se filtró el digestado a través de un papel de filtro cualitativo (membrana de celulosa) con un diámetro de poro de 11  $\mu\text{m}$ .
- Se agregaron 40 ml de agua destilada para facilitar el proceso de filtración y finalmente se aforó a 150 ml que fue la cantidad mínima requerida para ser leída por el espectrómetro, como se observa en la Figura 2.14. Se repitió este procedimiento para las muestras de plástico y ceniza.
- Finalmente para cada metal pesado se reportaron los resultados en mg/kg en base seca.



**Figura 2.14** Proceso de digestión de las muestras de residuos peligrosos

Finalmente, las muestras de los tres residuos fueron entregadas al Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional, en donde fueron

analizadas en un espectrómetro de Absorción Atómica de marca Perkin Elmer y modelo Analyst 300. Se reportaron las concentraciones de los contaminantes y elementos pesados.

## 2.10. Elaboración de la matriz de encapsulamiento (hormigón)

El hormigón como matriz de encapsulamiento presenta ventajas tales como maleabilidad y versatilidad a la hora de encapsular residuos, y una vez solidificado presenta resistencia a la compresión, la cual está directamente relacionada a la compactación del material, en donde los poros internos son muy pequeños, limitando así el flujo de agua en su interior.

La resistencia a la compresión ( $f'c$ ) es un parámetro de mucho interés en el presente estudio, debido a que a un valor de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , la resistencia es ideal para evitar no solo el flujo de agua, sino también mantener encapsuladas las pilas en su interior y al mismo tiempo retenidos a los contaminantes.

Se define como la capacidad del material de soportar una carga por unidad de área.

### 2.10.1. Dosificación de cilindros de hormigón

Sobre la base de los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre los agregados grueso, fino y el cemento, se determinaron las condiciones de dosificación de los materiales que conforman el hormigón, para obtener una resistencia a la compresión ( $f'c$ ) en la Tabla 2.5:

**Tabla 2.5** Condiciones de dosificación de los materiales utilizados para la formación de hormigón

<b>CONDICIONES DE DOSIFICACIÓN <math>f'c = 24 \text{ MPa}</math></b>		
<b>Condiciones ambientales</b>	<b>Materiales</b>	<b>Inclusión de aire y aditivos</b>
Temperatura: $17 \text{ }^\circ\text{C}$ Humedad: 30 %	Agregados: Arena: Pifo-ripio Ripio: Holcim Cemento: Armaduro Tamaño máximo nominal: $3/4''$ (19 mm) Estado: seco	Sin inyección de aire Sin aditivo Asentamiento: 75-100 mm

La dosificación para la elaboración de 4 cilindros de tamaño estándar junto con un blanco, fue realizada según la Norma ACI 211.1-91 Práctica Estándar para la Selección de Proporciones para Hormigón Pesado Normal y en Masa y reaprobadado en 1997 (ACI, 1997), y entregada por el LEMSUR en el respectivo informe ubicado en el Anexo III, Figura III.5 y

resumida en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6** Dosificación requerida para la elaboración de los cilindros de prueba

r

<b>Dosificación para 4 moldes cilíndricos</b>	
<b>Constituyentes</b>	<b>Cantidad (kg)</b>
Agua	1,88
Cemento	2,84
Arena	6,08
Ripio	5,52

Conforme a dicha norma se realizó el ensayo del cono de Abrams a continuación:

### **Ensayo del cono de Abrams**

Este ensayo tiene por objetivo medir la consistencia y el aspecto de un hormigón recién formado, el valor del asentamiento se ubica en una serie de rangos que le identifican como blando o plástico. Este procedimiento fue realizado según lo estipulado en la Norma ASTM C143/C143M-20 Método de prueba estándar para el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico, (ASTM, 2020).

La descripción del ensayo fue de la siguiente manera:

- Se mezclaron los materiales junto con el agua y una vez formada la mezcla se midió la temperatura.
- En el cono de Abrams se colocó el hormigón hasta llenarlo completamente.
- Se compactó la mezcla dejándole caer una varilla en algunas ocasiones.
- Se alzó el cono y el hormigón se hundió un poco como se puede observar en la Figura 2.15 y en ese instante se midió la distancia entre la parte superior del cono y el hundimiento en el centro del cuerpo, se registró este valor.



**Figura 2.15** Determinación del asentamiento del hormigón

### 2.10.2. Fundición de los cilindros de hormigón

- Luego del ensayo del cono de Abrams, se engrasó los moldes cilíndricos.
- Se procedió a llenar cada uno de los 4 con la mezcla de hormigón.
- Se introdujo la varilla para que se compacte un poco y se los dejó fraguar hasta el siguiente día como se observa en la Figura 2.16.
- Al siguiente día se los depositó en una bañera con agua como puede observarse en la Figura 2.16 para que se llevara a cabo el proceso de curado por 7 días.



**Figura 2.16** Fundición de los cilindros de hormigón



**Figura 2.17** Curado de los cilindros de hormigón

### 2.10.3. Compresión de los cilindros de hormigón

Una vez transcurridos los 7 días de curado, los 4 cilindros de prueba estuvieron listos y se midió el diámetro, área y peso de cada uno antes de ser sometidos a la prueba de compresión. En este ensayo el objetivo fue determinar si la estructura de los mismos alcanzaría la resistencia especificada ( $210 \text{ kg/cm}^2$ ) para los que fueron diseñados, como se encuentra estipulado en la Norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021) mencionada anteriormente.

- Para esto se utilizó una máquina universal de prueba o máquina multiensayos de marca SHIMADZU y con capacidad 500 kN en la cual se ubicó el cilindro en un cabezal que sujetó al espécimen en la parte inferior, y en la parte superior se aplicó una fuerza que se incrementó de forma progresiva hasta que el cilindro mostrará algún tipo de falla (despostillado o partido), momento en el cual se detuvo la fuerza de compresión, lo cual se puede apreciar en la Figura 2.18.
- El equipo ejerció una fuerza a través de las placas circulares las cuales fueron accionadas con una mordaza o rodillo hidráulico. Estas cargas controladas se registraron en un ordenador en el cual se grafica la deformación y la carga cuando el equipo detecta el momento en que se da una deformación o ruptura (Gallego y Ferney, 2007).
- Este paso se repitió para cada uno de los cilindros y se registraron los valores de carga máxima y resistencia.



**Figura 2.18** Compresión sobre un cilindro en la máquina universal de prueba



**Figura 2.19** Especímenes cilíndricos luego del ensayo

Este paso se repitió para cada uno de los cilindros y se registraron los valores de carga máxima y resistencia.

## **2.11. Elaboración de los especímenes cúbicos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados**

La elaboración de los especímenes cúbicos o muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados se llevó a cabo en el LEMSUR, el día 01 de marzo de 2023.

### **2.11.1. Menús de encapsulamiento**

Se propuso diseñar un hormigón como matriz de encapsulamiento que supere la resistencia a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$  establecida en la norma ACI 211, debido a que la presencia de los residuos y las pilas insertadas en la mitad de cada uno de los cubos, reduciría este valor bajo el cual el hormigón se presentaría menos compacto, el tamaño de sus poros sería mayor y por tanto se favorecerían en su interior procesos de infiltración. En base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores se obtendrá un hormigón con una resistencia superior a  $240 \text{ kg/cm}^2$ .

El tamaño de las partículas de ceniza y vidrio tiene similitud con el tamaño de grano del agregado fino el cual es  $< 5 \text{ mm}$  como se puede apreciar en la Tabla 2.7, y el plástico por su flexibilidad no podría reemplazar al agregado grueso, por estos aspectos se reemplazarían estos residuos únicamente por una parte del agregado fino, en un porcentaje máximo del 20%.



**Tabla 2.7** Tamaño de partícula requerido de los residuos peligrosos utilizados

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Tamaño requerido</b>
Plástico usado en minería	Pedazos pequeños < 1 cm
Ceniza de fondo de cámara de combustión	Material pulverizado
Pilas de una sola vida	Unidades sin fraccionar
Vidrio de perfumes y de ampollitas	Vidrio granulado < 5 mm

Se determinó este porcentaje, según lo recomendado por Escalante (2002), quien manifiesta que el hormigón con ceniza o polvo de sílice reemplazado en un 20% de los agregados, alcanza resistencias de 40 MPa (408 kg/cm<sup>2</sup>) solo con ceniza y 50 % solo con sílice.

De esta manera se formularon 4 dosificaciones en los que se reemplazó el 5%, 10%, 15% y 20% de residuos en el agregado fino.

Una vez establecidos los porcentajes de reemplazo en el agregado fino también se asignaron porcentajes en los que los residuos estarían presentes en cada dosificación, así se determinó que la ceniza intervendría en un 50%, el vidrio en un 49% y el plástico en solo 1% debido a la gran cantidad de agua que absorbía y que causaba que el hormigón recién formado adquiriera una consistencia seca.

A continuación, el LEMSUR proporcionó una dosificación para la elaboración del hormigón para 4 cubos con el material encapsulado como se muestra en la Tabla 2.8 a continuación:

**Tabla 2.8** Dosificación del hormigón para la construcción de los cubos

<b>Muestra patrón de dosificación</b>		
<b>Componente</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Agua	2,93	11,5
Cemento	4,51	17,7
Arena	9,39	36,9
Ripio	8,59	33,8
Total	25,42	100

En esta dosificación se reemplazaron los residuos en el agregado fino o arena. A los 9,39 kg de arena se restaron los 5%, 10%, 15% y 20 % de residuos. Para la dosificación de 5% se multiplicaron 9,39 por 0,05 cuyo resultado fueron 0,467 kg correspondiente al peso de los

residuos que intervendrían en la mezcla, a continuación se restaron de la cantidad de arena el peso de los residuos 9,39 kg menos 0,467kg de lo cual se obtuvieron 8,92 kg que fue la nueva cantidad con la que la arena intervino en la dosificación del 5%.

Los 0,467 kg que correspondieron al peso de los residuos que intervendrían en la mezcla del hormigón fueron distribuidos en los 50%, 49% y 1% de ceniza, vidrio y plástico, respectivamente; para lo cual se multiplicaron 0,467 kg por 0,50 y se obtuvieron 0,234 kg de ceniza, se multiplicaron 0,467 kg por 0,49 y se obtuvieron 0,229 kg de vidrio y se multiplicaron 0,467 kg por 0.01 y se obtuvieron 0,0047 kg de plástico.

Con estas cantidades se construyeron por cada menú 3 muestras cúbicas y dos blancos de 15 cm x 15 cm en cuyo interior se encapsularon las pilas enteras ocupando un volumen aproximado de 80 cm<sup>3</sup>, el peso de cada paquete fue de 0,140 kg. Se generaron un total de 14 muestras.

En la Tabla 2.9 es posible apreciar para cada porcentaje de reemplazo de agregado fino por residuos peligrosos, las cantidades en kg en las que intervinieron cada uno de los materiales para formar la mezcla de hormigón. Con la cantidad de cada dosificación se generaron 3 muestras cúbicas, cada una con un peso aproximado de 8,6 kg.

**Tabla 2.9** Dosificación para los porcentajes de reemplazo de agregado fino

Materiales	Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3		Dosificación 4	
	Porcentaje (%)	Peso (kg)	Porcentaje (%)	Peso (kg)	Porcentaje (%)	Peso (kg)	Porcentaje (%)	Peso (kg)
<b>Residuos</b>	<b>5</b>	0,469	<b>10</b>	0,939	<b>15</b>	1,409	<b>20</b>	1,878
<b>Pilas</b>	-	0,420	-	0,420	-	0,420	-	0,420
<b>Arena</b>	31,94	8,92	26,94	8,45	21,94	7,98	16,94	7,51
<b>Ripio</b>	33,8	8,59	33,8	8,59	33,8	8,59	33,8	8,59
<b>Cemento</b>	17,74	4,51	17,74	4,51	17,74	4,51	17,74	4,51
<b>Agua</b>	11,52	2,93	11,52	2,93	11,52	2,93	11,52	2,93
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>

### 2.11.2. Fundición de cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados

- Se construyeron 14 muestras cúbicas con los residuos peligrosos incorporados en la mezcla del hormigón, en cuyo interior se colocaron las pilas en el centro. En cuanto al número de muestras de este tipo que deban elaborarse no existe una normativa específica, por tanto el número estuvo en función de los ensayos de compresión y lixiviación, para los que se destinaron 1 muestra para compresión y 2 muestras para el ensayo de lixiviación. Se procedió como se describe a continuación:
- Se pesaron cada uno de los materiales tanto agregados como residuos correspondientes a cada dosificación, y se colocaron en una bandeja en donde se mezclaron minuciosamente hasta que las partículas de residuos peligrosos se distribuyan homogéneamente por toda la mezcla, como se observa en la Figura 2.20.
- A continuación, se colocó la mezcla hasta la mitad de los moldes en el encofrado hasta una altura de 7 cm y en ese momento se ubicaron en el centro cada tipo de pilas, así en el caso de las pilas AAA se colocaron 11 apiladas, para las de tipo AA se colocaron 6 pilas, para el tipo D se colocaron 2 y para el tipo 9V se colocaron 4 (Figura 2.21).
- Posteriormente, se cubrieron las pilas con la mezcla hasta llenar los moldes a una altura de 15 cm que es lo que midió la arista de cada cubo, como se muestra en la Figura 2.22.



**Figura 2.20** Formación de la mezcla para la dosificación del 5%



**Figura 2.21** Pilas apiladas por cada tipo para el encapsulamiento



**Figura 2.22** Encapsulamiento de las pilas y baterías

- Una vez fundidas las muestras cúbicas, se las dejó fraguar el hormigón por 24 horas. Al siguiente día se retiró el encofrado, luego de lo cual los cubos fueron depositados en la bañera para proceder con el curado por 7 días, como puede apreciarse en las Figuras 2.23 y 2.24.



**Figura 2.23** Desencofrado de los cubos de hormigón con residuo encapsulado



**Figura 2.24** Curado de los cubos de hormigón con residuo encapsulado

### 2.11.3. Compresión de las muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados

Una vez transcurridos los 7 días de fraguado, el día 8 de marzo de 2023, se realizó el ensayo de compresión sobre las muestras cúbicas.

El objetivo del ensayo fue determinar la resistencia a la compresión que cada uno de los cubos

o muestras con los residuos peligrosos encapsulados alcanzaron, ya que de esa manera se pudo evaluar que muestra con su respectiva dosificación, presentó mayor compactación en su estructura, lo que significa menor capacidad de infiltración. Se procedió como se describe a continuación:

- Se midieron las dimensiones de cada uno de los cubos con un calibrador electrónico, para el cálculo del área de los mismos.
- Se realizó el ensayo en la misma máquina universal de prueba que se utilizó para los cilindros de hormigón.
- Se midió la resistencia de un solo ejemplar de cada dosificación, iniciando por el de menor reemplazo de residuos y continuando en forma ascendente: 5%, 10%, 15% y 20%.

## **2.12. Ensayo de lixiviación de las muestras cúbicas con RPE**

### **2.12.1. Determinación del contenido de humedad en los cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados**

La determinación del contenido de humedad en las muestras con el material encapsulado, se hizo necesaria para retirar la masa de agua en exceso que pudo haber sido absorbida por estas luego del curado. Se calculó el contenido de humedad en base seca, según como está determinado en el método de prueba 1315 de la EPA (2017) denominado "Tasas de transferencia de masa de constituyentes en materiales granulares monolíticos o compactados mediante un procedimiento de lixiviación en un tanque semidinámico", como se describe a continuación:

- Después de transcurrido el tiempo de curado (7 días), se secó el exterior de las muestras cúbicas más un blanco, se rotularon y se registró su valor.
- Se colocaron los cubos en un horno por 24 horas a una temperatura de 110 °C para eliminar la humedad.
- Transcurrido este tiempo, se retiraron los cubos del horno con la ayuda de un par de guantes, luego se colocó cada uno en un desecador y se tapó herméticamente. Se dejó enfriar a temperatura ambiente por el lapso de 12 horas a temperatura ambiente.
- A continuación se midió la masa de cada uno y se registró el valor, como se aprecia en la Figura 2.25.
- Se determinó el contenido de agua al restar la masa de cada espécimen antes de ser

secado, de la masa de los especímenes después de haber sido secados y enfriados, se registraron estos datos.

- Se realizó un duplicado para cada espécimen según lo indica el método EPA (2017) a excepción del blanco del cual se dispuso de uno solo, en total se ensayaron 9 cubos.



**Figura 2.25** Secado de los cubos y determinación del peso

Para la determinación del porcentaje de humedad en las muestras antes del secado, se utilizó la Ecuación [2.8] a continuación:

$$CHE (\%) = \frac{Mep - Mes}{Mes} \times 100 \quad [2.8]$$

Donde:

*CHE*: Contenido de humedad de los especímenes

*Mep*: masa de la muestra antes del secado (g)

*Mes*: masa de la muestra después del secado (g)

### **2.12.2. Prueba de lixiviación sobre los cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados**

Se inició con este ensayo el día 6 de abril del 2023 y fue llevado a cabo en el Laboratorio de Recuperación de Suelos del edificio de Hidráulica de la EPN.

Como se mencionó anteriormente en el ensayo de compresión se utilizó un ejemplar de cada dosificación y un blanco, los ejemplares restantes fueron destinados al ensayo de lixiviación, dos muestras para cada dosificación y un blanco, en total 9 muestras.

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la probable salida de los metales pesados (descritos en la Tabla 3.9) contenidos en los residuos peligrosos encapsulados, a través de la

matriz sólida (hormigón). Esto, al haber estado en contacto continuo con agua destilada (eluyente) en un tanque semidinámico que simuló condiciones medioambientales.

El método seleccionado para ejecutar este ensayo fue el método de prueba 1315 denominado “Tasas de transferencia de masa de constituyentes en materiales granulares monolíticos o compactados mediante un procedimiento de lixiviación en un tanque semidinámico” desarrollado por la Agencia ambiental de los Estados Unidos (2017).

### **Método 1315**

Este método ha sido diseñado para generar la velocidad de transferencia de masa de elementos inorgánicos capturados en un material sólido de una sola pieza o de un material granular compactado. Esto ocurre al proporcionar al cuerpo en estudio, las condiciones para que ocurra una liberación controlada de estos elementos en el flujo de agua a través de una difusión, en varios intervalos de tiempo (EPA 2017)

Para la ejecución del ensayo de lixiviación se procedió como se describe a continuación

- Las muestras cúbicas corresponden a un material monolítico de una sola pieza por lo que no fue necesario aplicarle más compactación (EPA, 2017).
- Se lavaron los baldes con ácido perclórico y se enjuagaron tres veces con agua destilada.
- Se colocó en el fondo de cada balde un soporte de PVC de 5 cm de altura cuya geometría hueca permitió a la muestra estar en contacto con el agua destilada en un 98% (EPA 2017).
- Se colocó en el interior de cada recipiente sobre el soporte, cada uno de los cubos con las diferentes cantidades de residuos encapsulados. Se procuró que el espacio entre la pared del recipiente y del cubo sea de al menos 2 cm. La distancia vertical entre la parte superior del recipiente y la parte superior del cubo fue de 5 cm.
- Se llenó completamente cada uno de los recipientes con agua destilada y se rotularon.
- Se midió el pH y la conductividad eléctrica de cada sistema y se registraron estos valores, como se puede observar en la Figura 2.26.
- Se cubrió herméticamente la parte superior de cada recipiente con el film plástico para reducir la pérdida de agua a la atmosfera por evaporación.
- Se realizó un duplicado para cada una de las dosificaciones (9 en total).
- Para este ensayo no hubo cambio de eluyente (agua destilada).
- Se midió el pH y la conductividad eléctrica de cada uno de los sistemas en 8 intervalos de tiempo de 14 días, y se registraron los valores para la respectiva tabulación.

- Después de cada medición, se tapó herméticamente la superficie del recipiente.



**Figura 2.26** Preparación del sistema para la lixiviación en el laboratorio

### **2.13. Análisis de concentraciones de metales pesados en los lixiviados de las muestras cúbicas**

Durante el tiempo de este ensayo se llevó un control del pH y de la conductividad eléctrica, siendo medidos cada 14 días.

Una vez completados los 112 días de prueba se filtró el eluyente de cada uno de los 9 sistemas de lixiviación. Se utilizó un papel de filtro cualitativo de 11  $\mu\text{m}$  y se recogieron 200 ml de muestra de cada sistema: 2 muestras para la dosificación de 5%, 2 muestras para 10%, 2 para 15 %, 2 muestras para 20 % y una muestra para el blanco.

Las muestras fueron entregadas al DEMEX para la respectiva cuantificación de los metales pesados en cuestión por espectrofotometría de Absorción Atómica.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Recolección de muestras de residuos peligrosos a encapsular

Las muestras de residuos proporcionados por Hazwat, se pueden observar en la Tabla 3.1 en donde se observan las cantidades y características presentadas a la hora de entrega.

**Tabla 3.1** Listado de residuos entregados por el CRA de Hazwat para la ejecución del TIC

Tipo de residuo	Características	Cantidad entregada (kg)	Observación
Ceniza de fondo de cámara de combustión	Cenizas de fondo de cámara de combustión	45	-
Vidrio de ampollitas o en su defecto, cualquier tipo de vidrio del cual haya disponibilidad	Combinación de sus estructuras trituradas, con diámetros de grano de 2 a 10 mm.	50	Triturado
Pilas y baterías de distintas clases	Pilas enteras usadas de diferentes capacidades.	10	-
Plástico usado en minería	Pliego grande de plástico sin lavado ni tratamiento previo.	5	-

Las muestras recibidas se encontraban almacenadas en las diferentes bodegas del centro de remediación ambiental, el vidrio de ampollitas y perfumes fueron triturados antes de la entrega en trozos de 3 a 5 cm, pero aún requirieron triturarse para obtener un área más pequeña y combinarse con el agregado fino. El plástico tuvo que ser recortado en varias partes debido a su extensión de alrededor de 40 m<sup>2</sup>, y luego trozado en pedazos de 1 cm x 1 cm para integrarse posteriormente en la mezcla de hormigón.

#### 3.2. Resultados de la caracterización de los materiales que conforman el hormigón.

##### 3.2.1. Resultados del ensayo de densidad relativa, densidad aparente y absorción del agregado grueso y agregado fino.

**Tabla 3.2.** Resultados de los ensayos de gravedad específica y densidad aparente del agregado grueso y fino

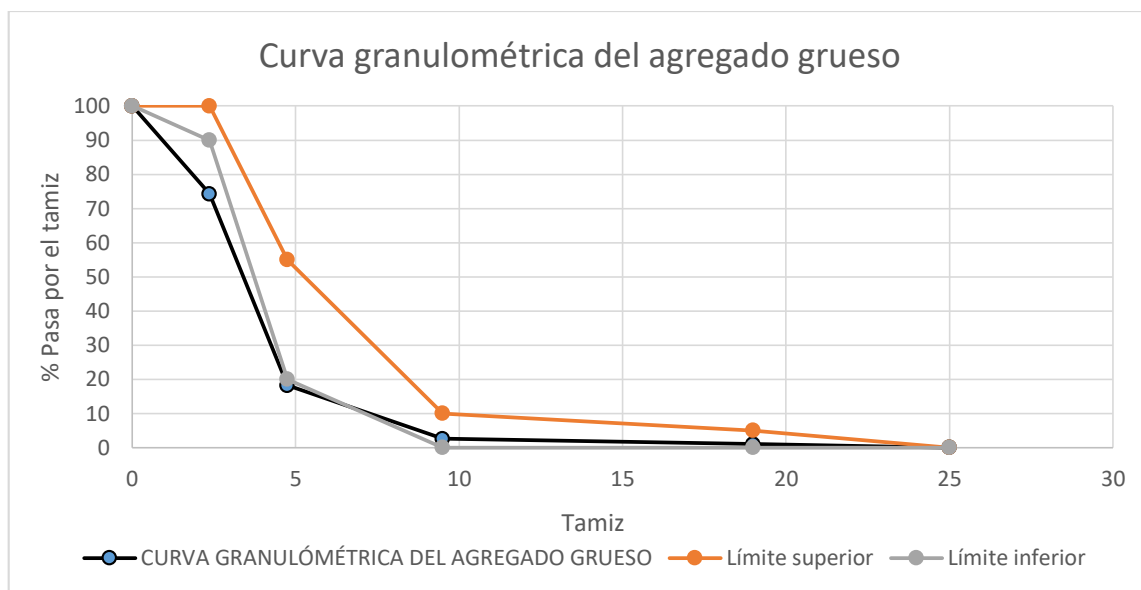
<b>Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C127)</b>	
Densidad relativa	2,39
Densidad relativa SSS	2,49
Absorción de agua	4,0 %
<b>Densidad aparente (ASTM C29)</b>	
Densidad suelta	1260 kg/cm <sup>3</sup>
Densidad compactada	1360 kg/cm <sup>3</sup>
<b>Gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTMC128)</b>	
Densidad relativa	2,48
Densidad relativa SSS	2,57
Absorción de agua	3,50 %
<b>Densidad aparente (ASTM C29)</b>	
Densidad suelta	1570 kg/cm <sup>3</sup>
Densidad compactada	1760 kg/cm <sup>3</sup>

En la Tabla 3.2 se encuentran registrados los valores obtenidos en los ensayos físicos respectivos sobre el agregado grueso y el agregado fino, y se observa que la densidad aparente y relativa del agregado fino se encuentran dentro del valor establecido en norma NTE INEN 856:2010, por lo tanto este material fue aceptable para formar parte del hormigón. Para el agregado grueso, el valor obtenido para cada uno de estos dos parámetros se encuentra dentro de lo establecido en las normativas ASTM C127 y ASTM C29, por lo tanto este material fue apto para integrarse en la mezcla de hormigón y generar un material de alta resistencia para el encapsulamiento.

### **3.3. Resultados del ensayo de granulometría**

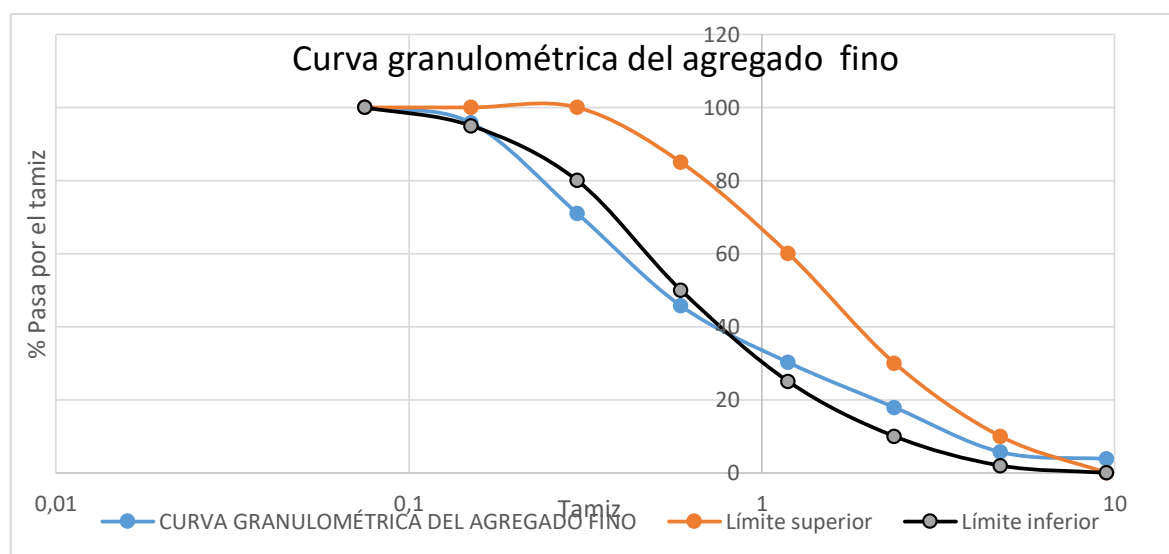
#### **3.3.1. Resultados del ensayo granulometría del agregado grueso**

En la Figura 3.1 se puede observar la distribución de los diferentes tamaños de partícula que presentó la masa de agregado grueso y que están graficados formando una curva granulométrica. Esta curva se encuentra dentro de la faja granulométrica formada por los límites superior e inferior cuyos valores están establecidos en la Norma ASTM C33, por tanto, este material cumple con los requerimientos para formar un hormigón de tipo estructural, que es el ideal para el encapsulamiento de los RP.



**Figura 3.1** Curva granulométrica del agregado grueso

### 3.3.2. Resultado del ensayo de granulometría del agregado fino



**Figura 3.2** Curva granulométrica del agregado fino

La Figura 3.2 muestra la distribución de los diferentes tamaños de partícula que presentaron la masa de agregado fino ensayado expresado como una curva granulométrica. Se observa en la curva que para los tamices número 3/8", 4, 30, 50 y 100 esta se encontró dentro de los límites de la faja granulométrica conforme se encuentra establecido en la norma NTE INEN 872 (2011), y para los tamices 8 y 16 la curva sobresalió ligeramente del límite inferior de la faja. Sin embargo el porcentaje retenido de agregado entre estos dos puntos fue mínimo, por lo que se consideró que la curva cumple con los tamaños de partícula para ser considerada apta para formar parte de la mezcla de hormigón para encapsulamiento.

### 3.4. Resultados del ensayo de abrasión del agregado grueso

**Tabla 3.3** Resultados obtenidos en el ensayo de abrasión para el agregado grueso

RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN	
Tipo de muestra	Ripio
Tamaño máximo nominal	3/4"
Gradación	B
Número de esferas	11
Peso inicial (g)	5000,0
Peso retenido en el tamiz #12	4781,40
Luego de 100 revoluciones (g)	
Peso retenido en el tamiz #12	3991,20
Luego de 500 revoluciones (g)	
Pérdida por abrasión e impacto (100 revoluciones) %	4,37
Pérdida por abrasión e impacto (500 revoluciones) %	20,18

En el ensayo para 500 revoluciones se obtuvo un valor de 20,18 % el cual se observa en la Tabla 3.3. La Norma ASTM C131 (2022) utilizada para realizar este ensayo no establece un rango con el cual comparar el resultado. Si se toma en cuenta lo señalado por AASHTO (2006) que para agregados con tamaño máximo nominal de 3/4", debería existir un porcentaje de pérdidas entre inferior a 20% y el valor obtenido de 20,18% está dentro de este rango. Esto significa que el agregado grueso le otorgará al hormigón buena resistencia a impactos o abrasión. Conforme a lo expuesto por Villar (2012) quien manifiesta que una alta resistencia de los materiales reduce procesos de infiltración en el hormigón, y con esto se reduce el riesgo de que se den procesos de infiltración que movilicen los contaminantes al medio ambiente.

### 3.5. Resultados obtenidos en el contenido orgánico del agregado fino



**Figura 3.3** Comparación de la mezcla con la cartilla de color

Se tomó en cuenta el Procedimiento de Color de Vidrio Estándar estipulado en la Norma ASTM C40/C40M-20, cuya numeración se puede observar en la Tabla 3.4 a continuación:

**Tabla 3.4** Colores estándar de plato orgánico

Color Estándar Gardner No.	Plato Orgánico No.
5	1
8	2
11	3 (Estándar)
14	4
16	5

Fuente: (Norma ASTM C40/C40M-20)

En la misma Tabla se encuentra la escala de coloración que indica la presencia de materia orgánica en el agregado fino, se determinó un color más claro que el color del plato orgánico No.3 definido como estándar, con respecto al cual la Norma indica que si la coloración del líquido sobrenadante es más oscura que el color de este, se debe concluir que no existe contenido orgánico en el agregado fino. y como el líquido fue casi transparente, se pudo concluir la ausencia de impurezas orgánicas que no afectarán a la resistencia del hormigón (IMCYC, s.f.).

### 3.6. Resultado del ensayo de densidad real del cemento

Para la conformación de la matriz encapsulante se utilizó un cemento portland puzolánico tipo IP UNACEM, 2021), el cual cumple con los requerimientos establecidos en la Norma NTE INEN 490 y que fue considerado por la alta resistencia que ofrece a la mezcla y por su mayor velocidad de fraguado. Este ensayo tuvo como objetivo determinar la masa por unidad de volumen de los sólidos que constituyen el cemento hidráulico de alta resistencia. Se ejecutó el procedimiento estipulado en la Norma ASTM C188 (2023), cuyo resultado se observa en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Datos obtenidos en el ensayo de densidad real del cemento

<b>Cemento Armadura Tipo IP (ASTM C188)</b>						
No. muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Volumen inicial del frasco( $cm^3$ )	Volumen final del frasco ( $cm^3$ )	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
1	329,8	387,0	0,7	18,4	22	22
2	329,8	386,7	0,5	18,5	23	23
3	329,8	386,5	0,4	18,1	22	22
<b>Densidad real</b>			3,18 g/cm <sup>3</sup>			

En la Tabla 3.5 se observa los resultados de este ensayo, en donde se obtuvo una densidad real de 3,18 g /cm<sup>3</sup>, la densidad real óptima para el cemento portland se encuentra entre 3.00 y 3,20 g /cm<sup>3</sup> y varía ligeramente de una marca comercial a otra. En este rango se consigue un diseño y control apropiados de la pasta de hormigón (Fernández, 2021, p.23), y el valor obtenido se encuentra dentro de este, por lo que fue conveniente incorporar este material para la formación de la matriz que encapsuló a los residuos peligrosos.

### 3.7. Resultados de la caracterización de los residuos peligrosos a encapsular

#### 3.7.1. Resultado del ensayo de contenido de Humedad

**Tabla 3.6** Datos recolectados de las muestras de RP después de salir del horno

Tipo de Residuo	Peso del crisol Pi (g)	Peso de crisol + muestra de R.P. Pr (g)	Peso del crisol + R.P. secos Pf (g)	Humedad (%)
Plástico usado en minería	2,0075	39,9373	37,9250	5,04
Ceniza	2,0080	40,6908	39,2228	3,61
Vidrio de ampollitas y perfumes	2,0050	42,5444	40,5455	4,70

Se aprecia en la Tabla 3.6 el porcentaje de humedad de las tres muestras de residuos, el cual fue mayor para el caso del plástico usado en minería con un porcentaje de 5,04, debido a la capacidad de absorción de agua que tiene este material. A continuación, el vidrio triturado de ampollitas y perfumes presentó un porcentaje de humedad de 4,70 % debido a la buena capacidad de conducir el calor en donde el vapor de agua del aire suele adherirse a su estructura sobre la cual se condensa (Vélez, 2001). Y la ceniza tuvo un porcentaje de humedad menor debido al tratamiento previo de incineración en el cual se originó. Debido a la pequeña cantidad de residuos a encapsular, la humedad de estos no influye significativamente en la resistencia del hormigón, por lo que se puede concluir que este parámetro no afectará a su estructura.

### 3.7.2. Resultados del ensayo de Potencial Hidrógeno (pH)

**Tabla 3.7.** Valores de pH medidos en las muestras de RP

<b>Potencial Hidrógeno en las muestras de R.P.</b>	
Muestra de residuo	pH
Plástico usado en minería	6,98
Ceniza de cámara de combustión	9,34
Vidrio de ampollitas y perfumes	8,05

Fue necesaria la determinación del pH en las muestras de residuos peligrosos debido a la posible influencia que este parámetro podría causar al hormigón en donde a valores de pH inferiores a 8,3 podría causar disolución de iones de Fe y Al que se encuentran en la estructura del mismo, y por tanto habría disolución del hormigón, lo que podría liberar los contaminantes al exterior. por el método gravimétrico. En la Tabla 3.7 es posible observar que las muestras de ceniza y vidrio de ampollitas presentaron un pH alcalino, mientras que para la muestra de plástico se mantuvo alrededor de 7. Para la medición del pH la muestra de plástico de minería necesitó ser disuelta en una cantidad de agua destilada seis veces mayor que en el caso de las otras muestras, debido a la gran capacidad de absorción que esta presentó.

### 3.7.3. Resultados del ensayo de determinación de sulfatos:

**Tabla 3.8.** Concentración de sulfatos presentes en las muestras de RP

<b>MEDICIÓN DE SULFATOS</b>	
<b>RESIDUO PELIGROSO</b>	<b>CONCENTRACIÓN (mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>
Lona	0,0
Ceniza	20,0
Vidrio	0,0

Se midió la concentración de sulfatos con un duplicado para cada una de las muestras de los residuos peligrosos. En la Tabla 3.8 se puede observar que existieron sulfatos únicamente en la ceniza en donde se obtuvieron valores de 21mg/L y 18 mg/L, los cuales comparados con el valor de 150 mg/L (150 ppm) se concluye que este valor es insignificante para exposición a sulfatos, y por tanto no alterarán al fraguado del hormigón ni a su estructura.

### 3.8. Resultados de la cuantificación de metales pesados existentes en las muestras de residuos peligrosos

En la Tabla 3.9 se enlistan las concentraciones de los contaminantes leídas por un espectrofotómetro de absorción atómica y han sido comparadas con los límites máximos permisibles para el lixiviado establecidos en la Ordenanza Municipal No. 404, Norma técnica de residuos peligrosos, en base a los cuales se pudo establecer el cumplimiento de las mismas.

Es posible observar en la misma tabla que en la muestra de vidrio de ampollitas y perfumes la concentración de Cr cumple con la norma, en la muestra de plástico de minería las concentraciones de los elementos Cd, Pb, Ni, Zn, Cr y Hg se encuentran por debajo de las concentraciones establecidas por lo tanto cumplen con lo estipulado en la norma, y en el caso del As este fue no detectable por estar probablemente bajo los límites de detección.

**Tabla 3.9.** Concentración de metales pesados existentes en las muestras de RPE

Muestra de Residuo peligroso	Parámetro	Concentración de metales pesados en base húmeda (mg/L)	Concentración de metales pesados en base seca (mg/Kg)	LMP O.M. No.404 (mg/kg)	Comparación de valores
<b>M1</b> Ceniza de incinerador	Cd	0,02	3,911	85	Cumple
	Pb	0,37	72,350	4300	Cumple
	Ni	0,64	125,147	57	Excede
	Zn	4,50	879,937	420	Excede
	Cr	0,61	119,280	3000	Cumple
	As	1,06	207,274	75	Excede
	Hg	0.0025	0,4889	840	Cumple
<b>M4</b> Vidrio de ampollitas y perfumes	Cr	0,03	5,955	3000	Cumple
	Mn	0,35	69,472	NN	-
<b>M5</b> Plástico usado en minería	Cd	0,01	1,957	85	Cumple
	Pb	10,78	2109,589	4300	Cumple
	Ni	0,25	48,924	57	Cumple
	Zn	0,15	29,354	420	Cumple
	Cr	2,73	534,247	3000	Cumple
	As	No detectable	-	75	-
	Hg	0.0122	2,3875	840	Cumple

LMP: límite máximo permisible ; NN: no normado; OM: Ordenanza Municipal



Escala de color: naranja (no cumple); verde(cumple); (-) valor no determinado

En la muestra de ceniza los elementos Cd, Pb, Cr, Hg y Cr presentaron concentraciones inferiores a los límites máximos permisibles (LMP) por lo tanto cumplieron con lo estipulado en la norma, pero en el caso de los metales Ni y Zn las concentraciones presentes exceden a los LMP en más del doble por lo tanto no cumplen con la misma, así también, el As cuya concentración excede en casi el triple al LMP por lo tanto tampoco cumple con este parámetro.

Si bien el Ni, Zn y Mn no se consideran tan peligrosos como el Hg o Pb, los excesos de estos podrían causar alteración del recurso en el que se encuentren. En el caso del suelo el Mn causaría clorosis, el Zn deficiencia de nutrientes y el Ni toxicidad a las plantas. El As en exceso en el suelo podría destruir la clorofila en el follaje de las plantas, el Hg reduciría la actividad microbiológica del suelo y el Pb alteraría los ciclos vitales de las plantas.

### 3.9. Resultados de la elaboración del hormigón (matriz de encapsulamiento)

#### 3.9.1. Dosificación de cilindros de hormigón

En la Tabla 3.13 se encuentran las cantidades que intervinieron de cada uno de los materiales para cada porcentaje de reemplazo de residuos peligrosos, también se realizó la dosificación para un saco de cemento y para un metro cúbico de hormigón, como se puede observar en el ANEXO III.

El ensayo de Abrams realizado sobre la pasta de hormigón se midió el asentamiento de la pasta de hormigón el cual fue 75 mm, lo que determina una consistencia blanda con un aspecto levemente fluido lo cual se puede visualizar en la Tabla 3.10. (Inacap, s.f.).

**Tabla 3.10.** Consistencia del hormigón en relación con los valores de asentamiento

<b>Consistencia del hormigón</b>	<b>Aspecto</b>	<b>Asentamiento [cm]</b>
A-1 Seca	Suelto y sin cohesión	1,0 a 4,5
A-2 Plástica	Levemente cohesivo	5,0 a 9,5
A-3 Blando	Levemente fluido	10,0 a 15,0
A-4 Superfluido	Fluido	15,5 a 22,0

Fuente: (Inacap, s.f.)

Esta consistencia es ideal para lograr una resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup>, un hormigón superfluido tendría dificultades en generar esta resistencia.

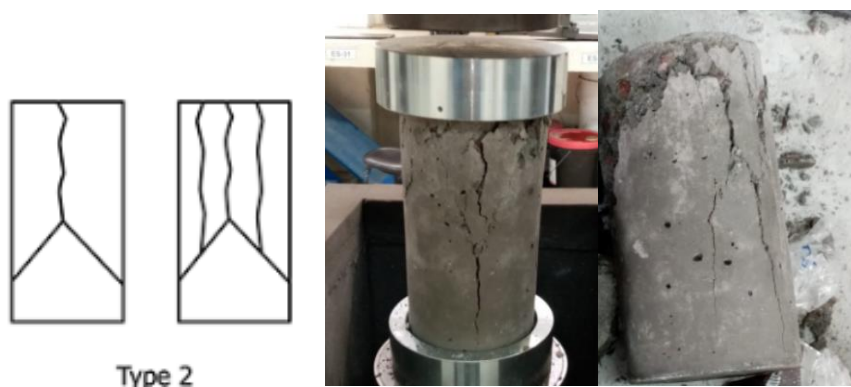
**Tabla 3.11** Dosificación requerida para la elaboración de los cilindros de prueba

Material	Dosis en peso para 1m <sup>3</sup> (kg)	Proporción en peso (%)	Proporción en volumen (%)
Agua	266	0,65	0,58
Cemento	410	1,0	1,0
Agregado fino	854	2,08	1,19
Agregado grueso	781	1,91	1,36

Sobre la base a los resultados obtenidos en los diferentes ensayos sobre los componentes del hormigón, el LEMSUR proporcionó un menú con la dosificación específica para la elaboración del hormigón, la cual fue diseñada para alcanzar una resistencia de 24 MPa equivalente a 244,7 kg/cm<sup>2</sup> que es superior al valor establecido en la norma ACI 210. Esto se debió a que el reemplazo de los residuos en parte de los agregados así como también el encapsulado de las pilas en el centro del cubo (muestra cúbica) podía reducir la resistencia a la compresión del mismo.

### 3.9.2. Resultados de la compresión de los cilindros de hormigón

Todos los especímenes cilíndricos mostraron un tipo de falla correspondiente al tipo 2, el cual se describe en la Norma ASTM C39/C39M-21 (2021) como un cono bien formado en un extremo y otro no bien formado en el otro extremo junto con la presencia de grietas verticales, lo cual se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4** Fisuras presentadas durante la compresión

**Tabla 3.12** Valores obtenidos en la compresión de los cilindros de hormigón

Muestra No.	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm) <sup>2</sup>	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Carga máxima (kN)	Tipo de falla	Defecto	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
1	7	102,75	8292	2256	190,5	2	A	23,0	234,54
2	7	102,75	8292	2245	206,0	2	A	24,8	252,89
3	7	102,75	8131	2271	188,0	2	A	23,1	235,55
4	7	102,50	8252	2262	187,8	2	A	22,8	232,50

En la Tabla 3.12 se pueden observar los valores de resistencia que alcanzaron los cilindros o patrones de hormigón y que superaron los 210 kg/cm<sup>2</sup> propuestos en un inicio, siendo el número 2 el que alcanzó el mayor valor. Como resultado se obtuvo un material encapsulante lo suficientemente resistente para la construcción de las muestras cúbicas.

### 3.10. Elaboración de las muestras cúbicas de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados

#### 3.10.1. Menús de encapsulamiento

**Tabla 3.13** Porcentajes y pesos requeridos para cada uno de los materiales de encapsulamiento en las proporciones 5%, 10%, 15% y 20%

Componentes del hormigón	Residuos peligrosos	Porcentaje que interviene C/R.P. (%)	Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3		Dosificación 4	
			Reemplazo del 5% (%)	Peso (kg)	Reemplazo del 10% (%)	Peso (kg)	Reemplazo del 15% (%)	Peso (kg)	Reemplazo del 20% (%)	Peso (kg)
Arena	Ceniza de fondo de cámara de combustión.	50	5	0,235	10	0,470	15	0,705	20	0,939
	Vidrio de perfumes y ampollitas	49		0,230		0,460		0,690		0,920
	Plástico usado en minería	1		0,0047		0,0094		0,015		0,019
	Arena	-	31,94	8,92	26,94	8,45	21,94	7,98	16,94	7,51
Ripio	-	-	33,8	8,59	33,8	8,59	33,8	8,59	33,8	8,59
Cemento	-	-	17,74	4,51	17,74	4,51	17,74	4,51	17,74	4,51
Agua	-	-	11,52	2,93	11,52	2,93	11,52	2,93	11,52	2,93
Pilas	-	-	-	0,420	-	0,420	-	0,420	-	0,420
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>	<b>100</b>	<b>25,84</b>
									<b>TOTAL</b>	<b>102,24</b>

En la Tabla 3.13 se puede observar el porcentaje en que fueron distribuidos los materiales componentes del hormigón y la cantidad de residuos peligrosos que intervinieron en cada una de las dosificaciones para elaborar 3 cubos expresado en kilogramos. En cada una de las dosificaciones se distribuyeron 50% de ceniza, 49% de vidrio de ampollitas y perfumes y el 1% de plástico triturado usado en minería. Este último residuo fue poco utilizado debido a la gran cantidad de agua que absorbía durante la mezcla ocasionando que la pasta de hormigón se reseca y perdiera su consistencia blanda y levemente fluida.

Así también en la misma tabla es posible visualizar la cantidad con la que intervinieron las pilas, cada paquete de pilas de diferente capacidad pesó alrededor de 0,140 kg, y debido a que la dosificación está formulada para 3 elaborar 3 cubos, el peso total con que intervinieron las pilas fue de 0,420 kg.

Durante la construcción de los cubos se insertaron las pilas en el centro de cada molde, en total se generaron 12 muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados (RPE) y tres muestras cúbicas sin RPE, de las cuales, una fue utilizada para el ensayo de compresión y las otras dos se utilizaron en el ensayo de lixiviación, las muestras cúbicas formadas se observan en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** Pilas siendo encapsuladas en el centro del molde

### **3.10.2. Resultados de la compresión de las muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados**

Durante la compresión de los cilindros se midió la resistencia de un solo ejemplar de cada dosificación, iniciando por el que poseía el menor reemplazo de residuos y continuando en forma ascendente: 5%, 10%, 15% y 20%.

En la Tabla 3.14 es posible observar que todas las muestras cúbicas ensayadas experimentaron una disminución de su resistencia a la compresión, siendo la muestra con el 20% de RPE quien

presentó la resistencia más baja con  $173,35 \text{ kg/cm}^2$ . Esto se debe a la mayor cantidad de residuos peligrosos encapsulados que no permitieron estabilidad en su estructura cristalina y en especial por el espacio ocupado por las pilas en su interior. La muestra que alcanzó mayor resistencia fue la que encapsuló el 5% de RP alcanzando una resistencia de  $205,98 \text{ kg/cm}^2$ . Se observa que la mejor muestra es aquella con el 15% de RPE que presenta una resistencia de  $199,86 \text{ kg/cm}^2$  cuyo valor es muy cercano al planteado inicialmente de  $210 \text{ kg/cm}^2$ . y también capturó la mayor cantidad de residuos peligrosos incluidas las pilas. Los ensayos de compresión de las muestras cúbicas se pueden observar en las Figuras 3.6 y 3.7.

**Tabla 3.14** Valores obtenidos en la compresión de las muestras cúbicas con RPE

No.	Dosificación	Edad (días)	Área ( $\text{mm}^2$ )	Peso específico ( $\text{kg/m}^3$ )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)		Resistencia ( $\text{kg/cm}^2$ )	
						Cúbica	Cilíndrica	Cúbica	Cilíndrica
1	5%	7	22896	2162	462,2	20,2	17,2	205.98	175.39
2	10%	7	23076	2130	405,7	17,6	14,9	179.47	151.94
3	15%	7	22880	2156	449,1	19,6	16,7	199.86	170.29
4	20%	7	22652	2137	384,2	17,0	14,4	173.35	146.84
5	BLANCO	7	11002	2187	235,7	21,4	18,2	218.22	185.59



**Figura 3.6** Ensayo de compresión sobre los cubos con residuos encapsulados



**Figura 3.7** Cubos de hormigón con daño luego de la compresión

### 3.11. Resultados del ensayo de lixiviación

#### 3.11.1. Resultados del contenido de humedad en los cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados

**Tabla 3.15.** Resultados del porcentaje de humedad presente en los especímenes cúbicos con los RP encapsulados

<b>Espécimen cúbico con los RP encapsulados</b>	<b><i>M<sub>ep</sub></i> (g)</b>	<b><i>M<sub>es</sub></i> (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>
Blanco (B2)	7680,4	7559,4	1,6
Menú (5%)	7605,8	7153,7	6,22
Menú (10%)	7566,3	7288,8	3,74
Menú (15%)	7570,1	7105,6	6,64
Menú (20%)	7462,8	6913,2	7,42

En cuanto al contenido de humedad en las muestras cúbicas con el material encapsulado, es posible observar en la Tabla 3.15 que el menú con el 20% de RPE presentó el mayor valor correspondiente a 7,42% lo que podría deberse a que al tener el mayor porcentaje de residuos en su interior los espacios que se forman entre poro y poro del hormigón fueron más grandes y por este hecho absorbió más humedad. A continuación, el menú con el 15% de obtuvo también un valor alto de humedad. Sin embargo, el menú con el 10% de RPE obtuvo el menor valor de humedad comparado con el del menú 5% de RPE. Se puede observar también en la misma Tabla que el porcentaje de humedad en el blanco fue de 1.60% el menor valor debido a que el hormigón sin RPE fue más compacto, por lo tanto a mayor cantidad de residuos encapsulados, mayor porcentaje de humedad absorbido.

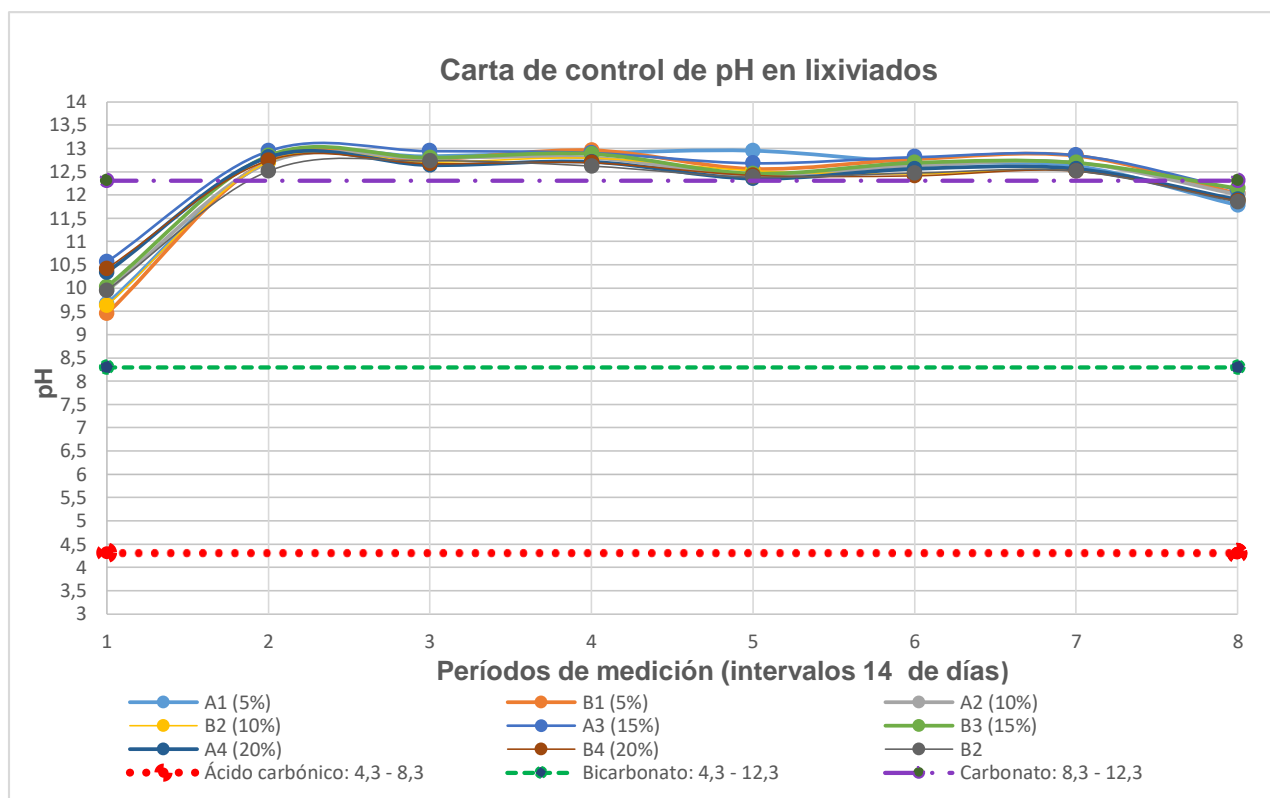
Se consideró la Norma ASTM E1907 Guía estándar para evaluar las condiciones de humedad de los pisos de concreto para recibir revestimientos de pisos resilientes (ASTM, 2021) en la cual se estipula las condiciones de humedad aceptables, es la única que hace referencia al concreto sobre el suelo, y esta considera que el porcentaje de humedad óptimo para este tipo de hormigón se encuentra entre 2,5 % a 4,5% para recibir materiales plásticos y menos de un 10,0% para recibir revestimientos como pintura. Los valores obtenidos de porcentaje de humedad en las muestras fueron inferiores al 8,0%, por lo tanto, cumplieron con este parámetro. Se recalca este punto debido al confinamiento que tendrán las muestras cúbicas sobre el suelo en el cual la humedad podría causarles deterioro y alto riesgo de que los materiales encapsuladas se liberen

hacia el medio ambiente.

### 3.11.2. Resultados del control de pH en los lixiviados

En la Figura 3.8 se observa que el pH en las muestras se presentó en un rango entre 9,45 y 12,98. Los menores valores de pH corresponden a la primera medición en donde las muestras entraron en contacto con el agua destilada la cual tenía un pH de 5,40, y en los períodos posteriores se observa que el pH se mantuvo entre 12,00 a 12,98 y descendió ligeramente en la última medición correspondiente al período 8 (112 días). El blanco presentó un valor de pH que rondaba los 12,50 y descendió también en la última medición a un valor de 11,85.

Estos valores de pH se explican con la disolución de las fases sólidas del hormigón, en la que el hormigón una vez endurecido posee en sus poros una solución compuesta por  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  que le otorgan un ambiente muy alcalino en donde el contenido de calcio es bastante elevado saturando los poros del material con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en forma cristalina, con un pH inicial entre 12,6 y 14,0 y luego manteniéndose alrededor de 12,6. La disolución del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se lleva a cabo en un pH entre 12,6 a 10,0 en el cual empieza la disolución de los silicatos cálcicos hidratados de la estructura del hormigón reduciendo el pH a 10,0 a partir del cual se disuelven las fases de aluminio y hierro (García, 2012, p12).



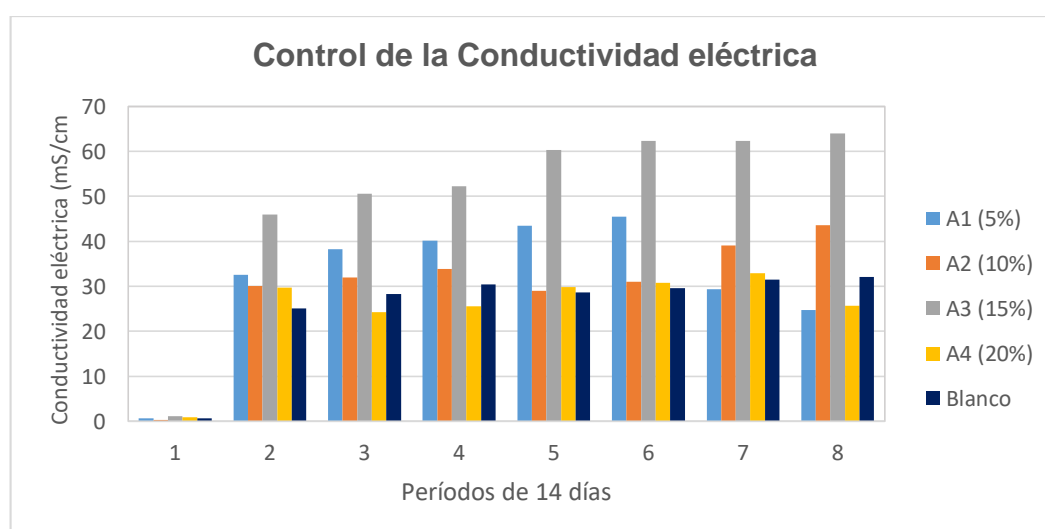
**Figura 3.8** pH presentado en los especímenes cúbicos y sus duplicados con las diferentes dosificaciones durante el tiempo de lixiviación



Así mismo puede observarse en la Figura V.1 ubicada en el Anexo V en donde se visualiza las formas carbonatadas en función del pH que se presenta en el agua natural, se observa que este valor de pH comprendido entre 9,45 y 12,98 es muy básico y presenta iones bicarbonato entre 8,3 a 10,3 y la presencia de iones carbonato a partir del valor de 10,3 hacia adelante, en esta fase no se genera ácido carbónico ni dióxido de carbono. El pH muy básico de los lixiviados muestra que la presencia de metales pesados es nula o muy poca y tampoco existe el ambiente para que se produzca la oxidación de los mismos. También la ausencia de estos contaminantes en los lixiviados se puede atribuir a la alta resistencia alcanzada por el hormigón como matriz encapsulante que le otorgó buena compactación al material y redujo procesos de lixiviación (García, 2012, p12).

De producirse este lixiviado de las muestras cubicas en la celda de confinamiento sobre el suelo, este aportará carbonatos y bicarbonatos que elevarán en gran medida su pH causando basicidad del mismo. Si comparamos estos valores de pH obtenidos en este ensayo con los valores estipulados en la tabla No. 1 de la Norma Técnica del Suelo establecido en la Ordenanza Municipal No.404, el valor establecido de pH es de 6,0 a 8,0 por lo que no cumple con este criterio. Según García (2012) la zona de saturación del agua subterránea presenta un pH ligeramente básico entre 7,0 a 8,0 y luego se vuelve ácido en aguas más profundas, por lo que un aumento de pH entre 12,0 y 13,0 proveniente de lixiviados podría otorgar un ambiente alcalino en donde las rocas carbonatadas experimentarían disolución.

### 3.11.3. Resultados del control de Conductividad Eléctrica en lixiviados



**Figura 3.9** CE en función de los períodos de medición

En la Figura 3.9 se pueden observar los valores de conductividad eléctrica medidos en los lixiviados de las muestras cúbicas con los residuos peligroso encapsulados, y se pudo determinar que los mismos se encuentran en el rango entre 0,34 y 64,0 (mS/cm), en donde los rangos inferiores corresponden al primer día en los que se armó el sistema de lixiviación y entraron las muestras en contacto con el agua. También se puede observar que la muestra cúbica A3 (15%) presentó en el lixiviado el mayor valor de conductividad eléctrica de 62 mS/cm y es seguido por el espécimen A1(5 %) que en el período 6 (84 días) comenzó a descender. La C.E. de la muestra A2 (10%) sufrió su mayor incremento desde el período 7 (98 días) y la muestra A4 (20%) se mantuvo alrededor de 30 (mS/cm) y luego descendió ligeramente, también el blanco se encuentra alrededor de este valor.

Esto se explica debido a que la conductividad eléctrica (C.E.) se relaciona directamente con los sólidos disueltos totales (TDS), por lo que a mayor C.E. existe mayor cantidad de sales disueltas. El pH de 62 mS/cm en este ensayo permitió entender que existe buena cantidad de carbonatos y bicarbonatos disueltos en el lixiviado, y de producirse en las muestras cúbicas confinadas sobre el suelo, podrían alcanzar las aguas subterráneas. Este parámetro no se encuentra normado en el Texto unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica y tampoco en la Ordenanza Municipal No.404 tanto para agua y suelo. Sin embargo, según lo manifestado por Solís, et.al (2017) en aguas subterráneas la C.E. suele presentar un valor entre 0,1 a 2,0 mS/cm, si se comparan estos valores con los obtenidos en los lixiviados es evidente que se encuentran sobre estos, por lo que podrían alcalinizar el ambiente que rodea a las aguas subterráneas y comenzarían procesos de solubilidad de materiales que en este caso sería de agregados finos y gruesos.

En el caso del suelo, según lo estipula la Norma Técnica del Suelo establecido en la Ordenanza Municipal No.404 en la Tabla No.1 el valor establecido es de 2,0 dS/cm que equivale a 200,0 mS/cm, y como los valores de CE presentes en los lixiviados no sobrepasaron los 60 mS/cm, se puede determinar que no provocaran procesos de solubilidad que altere la calidad del suelo en el lugar en que se encuentren confinados. Los resultados obtenidos para los duplicados fueron similares y son visibles en la Figura V.9, Anexo V. Se concluye que los duplicados tuvieron el mismo comportamiento que las muestras patrón.

### 3.11.4. Resultados del análisis de concentraciones de metales pesados en los lixiviados de las muestras cúbicas

**Tabla 3.16.** Comparación de la concentración de metales pesados en el lixiviado con los LMP establecidos en la O. M. No.404

Muestras de Lixiviados	Cd LMP (1,0mg/L)	Cr LMP (5,0 mg/L)		Pb LMP (5,0 mg/L)		Ni LMP (NN)		Zn LMP (NN)	Mn LMP (NN)		As LMP (5,0 mg/L)	Hg LMP (0,2 mg/L)	Cumple
Blanco	ND	0,01	Pro-medio	0,02	Pro-medio	ND	Pro-medio	ND	ND	Pro-medio	ND	ND	Sí
		IL		IL									
A1 (5%)	ND	0,06	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	ND	ND		ND	ND	Sí
		IL		IL									
B1 (5%)	ND	0,02	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	ND	ND		ND	ND	Sí
		IL		IL									
A2 (10%)	ND	0,03	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	ND	0,01	0,01	ND	ND	Sí
		IL		IL									
B2 (10%)	ND	0,08	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	ND	0,01	0,01	ND	ND	Sí
		IL		IL									
A3 (15%)	ND	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,02	ND	0,02	0,02	ND	ND	Sí
		IL		IL									
B3 (15%)	ND	0,02	0,03	0,06	0,05	0,02	0,02	ND	0,02	0,02	ND	ND	Sí
		IL		IL									
A4 (20%)	ND	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	ND	0,02	0,03	ND	ND	Sí
		IL		IL									
B4 (20%)	ND	0,05	0,05	0,04	0,04	0,01	0,02	ND	0,03	0,03	ND	ND	Sí
		IL		IL									

ND: No detectable; NN: no normado; Color verde: cumple; IL:inferior al límite

En la Tabla 3.16 se observa que los contaminantes que se encuentran normados en la OM No.404, los cuales son cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), arsénico (As) y mercurio (Hg) sus concentraciones se encuentran en niveles muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos. En el caso del arsénico y el mercurio las concentraciones fueron no detectables lo cual muestra que las pilas usadas encapsuladas en el interior del cubo de hormigón no sufrieron ruptura y los contaminantes se quedaron totalmente atrapados en la estructura de estas.

Así mismo el zinc que también es parte de la composición química de las pilas, fue no detectable, en el caso del manganeso la concentración detectada fue de 0,01 mg/L para las muestras con la dosificación del 10%, de 0,02 mg/L para las muestras con dosificación del 15 % y 0,03 mg/L y para las muestras con dosificación del 20%, es muy probable que este elemento provenga de los vidrios de ampollitas y perfumes y a medida que incrementó el porcentaje de residuos peligrosos encapsulados también lo hizo su concentración, aunque en cantidad muy pequeña.

En el caso del níquel, este metal presente en la ceniza y en la lona de minería se presentó en el lixiviado en una concentración de 0,01 mg/L para las muestras con la dosificación del 5%, y presentó una concentración de 0,02 mg/L para las muestras con 10%,15% y 20%. En el caso del níquel, zinc y manganeso estos elementos no se encuentran normados a nivel nacional y local por lo que no se podría manifestar que cumplan con niveles permisibles de concentración, sin embargo, están presentes en las muestras de ceniza del incinerador y en el plástico de minería.

Sobre la base de las concentraciones obtenidas de los contaminantes, las cuales estuvieron bajo los niveles máximos permisibles, se puede afirmar que los residuos se encontraron confinados de manera eficiente en el interior de los cubos de hormigón en todos los porcentajes de reemplazo de agregado fino por los residuos peligrosos.

Se pudo determinar que el valor de la resistencia del hormigón se redujo a medida que se sustituyó mayor cantidad de residuos por el agregado fino, lo cual se presentó en las muestras con las dosificaciones de 5% (205,98 kg/cm<sup>2</sup>) 10% (179,97%) y la menor cantidad con 20% de reemplazo (173.35 kg/cm<sup>2</sup>), en cambio la muestra con el 15% obtuvo un valor de 199,98 kg/cm<sup>2</sup> el cual es cercano al valor de resistencia a la compresión fijado en un inicio lo cual nos permite concluir que este fue el menú más apropiado en donde se presentó una resistencia alta a la compresión, al mismo tiempo se logró capturar la mayor cantidad de residuos peligrosos y los contaminantes confinados en su interior no fueron liberados al exterior por las condiciones simuladas del medio ambiente (método 1315 EPA). La cantidad de residuos que encapsularon las 3 muestras cúbicas con el 15% de reemplazo de agregado fino por residuos fue de 1,409 kg

de vidrio, ceniza y plástico, y las pilas encapsuladas en su interior aportaron con un peso de 0,420 kg, dando un total de 1,830 kg de residuos. En cada cubo de esta dosificación se logró encapsular aproximadamente 0,610 kg.

Los parámetros pH y C.E. que presenta el hormigón o matriz encapsulante los cuales son propios de este material, presentan niveles altos, según lo consultado en la OM No.404 en el caso del pH para suelo podría alcalinizarlo de forma extrema, así también al agua subterránea cuyo parámetro no está normado, pero se conoce de bibliografía que puede alcalinizar en el interior y causar procesos de disolución de la parte carbonatada de las rocas. En el caso de la C.E. no causaría disolución en la matriz del suelo, pero si en la parte rocosa de las aguas subterráneas. Es importante considerar estos dos últimos parámetros debido a que los lixiviados que genere el cubo de hormigón están directamente en contacto con el suelo y también podrían causar una alteración al suelo y al agua subterránea. Por lo tanto se puede concluir que este método de encapsulamiento confina de forma eficiente los contaminantes tratados, pero se debe llevar un control de los altos niveles de pH y conductividad eléctrica que puedan afectar al suelo y agua subterránea.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- El menú más apropiado que se obtuvo de los diferentes porcentajes de reemplazo del agregado fino por los residuos peligrosos, fue el de 15 %, ya que encapsuló la mayor cantidad de estos 1,550 kg, y al mismo tiempo el material encapsulante obtuvo una resistencia a la compresión de 199,98 kg/cm<sup>2</sup> cercana al valor referencial de 210 kg/cm<sup>2</sup>, en cuyo valor se reducen los procesos de lixiviación de contaminantes hacia el exterior. En el caso de la muestra cúbica con el 20 % de reemplazo la resistencia a la compresión obtuvo un valor menor correspondiente a 173.75 kg/cm<sup>2</sup> por lo que no se consideró a pesar de haber encapsulado la mayor cantidad de residuos, y precisamente este punto fue lo que le restó resistencia en su estructura.
- Las bajas concentraciones de Ni, y Mn y el Zn y Hg no detectables para todas las muestras con los diferentes porcentajes de reemplazo, permiten entender que no existió ruptura de las pilas en el ensayo de compresión y tampoco migración de componentes durante los 112 días de lixiviación, por lo que se puede concluir que el encapsulamiento de este residuo en el cubo de hormigón con las dimensiones de 15 cm x 15 cm, fue óptimo.
- Los 4 menús propuestos presentaron un encapsulado eficiente de los contaminantes presentes en los residuos peligrosos seleccionados, debido a la ausencia y baja concentración de estos en las muestras de los lixiviados analizada. Fueron comparadas con los límites máximos permisibles establecidos en la O.M. No,404 bajo la cual el Cr presentó una concentración de 0,05 mg/L muy por debajo de los 5,0 mg/L normados; el As, Hg y Cd estuvieron ausentes y el Ni, Zn y Mn estuvieron en bajas concentraciones a pesar de no estar normados.
- Los cuatro menús de encapsulamiento se elaboraron en base a la máxima cantidad de agregado fino que se podía reemplazar (20%) y de este se dividió en tres proporciones para los tres residuos peligrosos conforme a la favorabilidad de su estructura, en donde la ceniza representó un 50%, los vidrios molidos de ampollitas y perfumes fueron en un 49% y el plástico utilizado en minería en un 1%.
- Se pudo concluir que una alta resistencia a la compresión por parte del hormigón, le

confirió ser más compacto , reducir procesos de infiltración y difusión lo que se pudo comprobar con las mínimas concentraciones de metales pesados en el agua de lixiviado después de 112 días de ensayo.

- Los valores de potencial hidrogeno que se presentaron en el lixiviado de todas las muestras son altos y para el único recurso en donde está normado el pH y conductividad eléctrica, que es el suelo el pH fue 12,6 siendo un ambiente muy alcalino, lo que puede generar una concentración excesiva de carbonatos en los suelos. No obstante, para el parámetro de la conductividad eléctrica, el mayor valor obtenido en los lixiviados de 60 mS/cm, fue muy inferior al valor establecido de 200 mS/cm, por lo que si cumplió con este parámetro. En el caso del agua subterránea no se encuentran normados estos dos parámetros, pero según García (2012) debe encontrarse entre 7 a 8 y ninguno de los valores obtenidos en los lixiviados cumplen con las condiciones de equilibrio en la que debe permanecer el suelo y el agua subterránea.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar las mismas pruebas de calidad que se realiza a los agregados y cemento a los residuos peligrosos a encapsular, para determinar mayores características que los residuos puedan otorgar a la estructura de la matriz encapsulante.
- Ampliar el análisis de pH y de conductividad eléctrica y de cómo estos pueden afectar no solamente al hormigón como matriz encapsulante, sino también a los contaminantes presentes en los residuos peligrosos.
- Se recomienda extender el tiempo de prueba del proceso de lixiviación a los 9 períodos de 14 días como está estipulado en el Método 1315 (EPA, 2013), y así comprobar la eficiencia del encapsulamiento de residuos peligrosos al utilizar como matriz encapsulante hormigón de resistencia 210 kg/cm<sup>2</sup>.
- Se recomienda esta técnica aplicada para el encapsulamiento de residuos como el vidrio, ceniza y pilas, el plástico no es recomendable gestionarlo de esta manera debido a la gran cantidad de agua que absorbe.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuerdo No.026 de 2008 [Ministerio del Ambiente]. Expídense los procedimientos para registro de generadores de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental, y para el transporte de materiales peligrosos. 12 de mayo de 2008

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2012). *Guía del Ciudadano para la Solidificación y Estabilización*. Obtenido desde [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/a\\_citizens\\_guide\\_to\\_solidification\\_and\\_stabilization.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/a_citizens_guide_to_solidification_and_stabilization.pdf)

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2017). *Método de prueba 1315 Tasas de transferencia de masa de constituyentes en materiales granulares monolíticos o compactados mediante un procedimiento de lixiviación en tanque semidinámico*. EPA. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-10/documents/method\\_1315\\_-\\_final\\_8-3-17.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-10/documents/method_1315_-_final_8-3-17.pdf)

AIDIS. (2018).” *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*”. (pp.36-37). Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria. Obtenido de <http://.aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/08/GESTION-INTEGRAL-DE-RESIDUOS-SOLIDOS-URBANOS-LIBRO-AIDIS.pdf>

American Concrete Institute. (2005). *ACI 318S-05 & ACI 318SR-05 Requisitos de Reglamentos para Concreto Estructural y Comentario*. [https://www.oaxaca.gob.mx/sinfra/wpcontent/uploads/sites/14/2016/02/ACI\\_318\\_2005.pdf](https://www.oaxaca.gob.mx/sinfra/wpcontent/uploads/sites/14/2016/02/ACI_318_2005.pdf)

American Society for Testing and Materials. (2020). *Método de prueba estándar para el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico (ASTM C143/C143M-20)*. ASTM. [https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM|C0143\\_C0143M-20|es-ES](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM|C0143_C0143M-20|es-ES)

American Concrete Institute. (1997). *Práctica Estándar para la Selección de Proporciones para Hormigón Pesado Normal y en Masa (ACI 211.1-91)*. ACI. <https://dokumen.tips/documents/aci-2111-91-norma.html?page=2>

American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C33/C33M-13 Standard Specification for Concrete Aggregates*. [https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0033\\_C0033M-13%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0033_C0033M-13%7Cen-US)



American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates*.  
[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0033\\_C0033M-18%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0033_C0033M-18%7Cen-US)

American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C29M-17 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.  
[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0029\\_C0029M-17%7Cen-USk](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0029_C0029M-17%7Cen-USk)

American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM C39/C39M-21 Standard Test Method of Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.  
[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0039\\_C0039M-21%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0039_C0039M-21%7Cen-US)

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C188-17 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*.  
<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0188-17R23%7Cen-US>

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C40/C40M-20 Standard Test Method for Organic Impurities in fine Aggregates for Concrete*.  
[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0040\\_C0040M-20%7Ces-ES](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0040_C0040M-20%7Ces-ES)

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of fine Aggregate*.  
<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0128-22%7Cen-US>

American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*.  
<https://compass.astm.org/content-search/?content=ASTM%20C128-15&stype=A>

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C131/C131M-20 Standard Test Method for Resistance to Degradation on Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*.  
[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0131\\_C0131M-20%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0131_C0131M-20%7Cen-US)

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C143/C143M-20 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.

[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0143\\_C0143M-20%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0143_C0143M-20%7Cen-US)

- Antonadis, V., Levizou, R., Shaheen, S., Ok, Y., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, V., Wenzel, W., Rinklebe, J. (2017). Oligoelementos en la interfaz suelo-planta: fitodisponibilidad, translocación y fitorremediación: una revisión. *Reseñas de Ciencias de la Tierra*. 171: 621-645. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825216303518>
- Arista, J. (2022). *fibra de vidrio para mejorar las propiedades mecánicas del cemento* [Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Ricardo Palma]. [https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/6078/T030\\_70336055\\_T%20%20%20ARISTA%20ORDINOLA%20JESUS%20EDUARDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/6078/T030_70336055_T%20%20%20ARISTA%20ORDINOLA%20JESUS%20EDUARDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- ASSHTO. (2006). Resistance to Degradation of Small-size Coarse Aggregate by abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. <https://es.scribd.com/doc/201891820/AASHTO-T-96>
- Benavides, G. (2015). Diseño de una planta para la fabricación de mampuestos de uso peatonal con cenizas de incineración provenientes de la empresa GPOWERGROUP S.A". [Proyecto previo a la obtención de Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital epn. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11847/1/CD-6554.pdf>.
- Benavides, L. (1997). Guía para definición y clasificación de residuos peligrosos. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Obtenido desde <https://www.icesi.edu.co/blogs/manejousorsi201002/files/2010/08/GUIA-PARA-LA-DEFINICION-Y-CLASIFICACION-DE-RESIDUOS.pdf>
- Blakemore, E. (2019). El desastre de Chérbobil: qué ocurrió y cuáles fueron sus efectos a largo plazo. Obtenido de <https://www.nationalgeographicla.com/historia/2019/05/el-desastre-de-chernobil-que-ocurrio-y-cuales-son-sus-efectos-largo-plazo>
- Bouzón, E. (2017). *Cenizas de fondo de carbón: problemática, caracterización y uso como árido en morteros y hormigones* [Trabajo Fin de Máster Máster Universitario en Tecnologías de la Edificación Sostenible, Universidad de Coruña]. Tecnologías de edificación sostenible. <http://hdl.handle.net/2183/19579>
- Calderón, A. (2016). *Procedimiento para el manejo adecuado de los desechos de vidrio provenientes de ampollas, generados en el Área de Producción de Líquidos Estériles Inyectables de un Laboratorio Farmacéutico de Guatemala*. [Maestría en Administración

Industrial y de Empresas de Servicios, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA]. biblioteca-farmacia.usac.edu.gt. <https://biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/tesis/MAIES201.pdf>

Cubillos, J., González, Y., Ruíz, A., Vélez, M., & Paredes, D. (2015). Estrategias de Producción Más Limpia para el Adecuado Manejo y Reducción en el Origen de Residuos Peligrosos: Caso de Estudio de Industrias Litográficas y Tintorerías. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 20(04), 396-405. Obtenido desde <https://www.redalyc.org/pdf/849/84946834011.pdf>

Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su eliminación. (Adoptadas las enmiendas hasta el 27 de mayo de 2005). *Protocolo sobre responsabilidad e indemnización por daños resultantes de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación*. PNUMA, 2005. Obtenido desde <https://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-s.pdf>

Enríquez, C. T. (2017). *Estudio comparativo del manejo ambiental de las canteras de la mitad del mundo* [trabajo previo a la obtención del título de ingeniera ambiental y manejo de riesgos naturales, Universidad Tecnológica Equinoccial]. Repositorio.ute. [https://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/15953/1/68581\\_1.pdf](https://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/15953/1/68581_1.pdf)

Escalante, J. (2002). *Materiales alternativos al cemento portland* (2ª ed.). Geocities. [https://www.geocities.ws/rosenberg\\_rd/tema2-3-7.pdf](https://www.geocities.ws/rosenberg_rd/tema2-3-7.pdf) (Obra original publicada en 2002)

Fernández, R. (2021). *“Estudio comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos del cantón Guayaquil para sustitución parcial del cemento portland IP”* [Trabajo Experimental Previo A La Obtención Del Título De Ingeniero Civil, Universidad Técnica De Ambato]. Repositorio uta.edu.ec. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/31996/1/Tesis%20I.%20C.%201419%20-%20Fernández%20Álvarez%20Ramiro%20Paúl.pdf>

Gallego, A & Claros, R. (2007). *Diseño Mecánico de una máquina universal de ensayos para polímeros* [Proyecto de grado para optar por el título de Tecnólogo Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira].

143. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/c2a290bc-1770-49dd-8268-2f391ca888f5/content>

HAZWAT. (2023). *Incineración*. <https://www.hazwat.com/>.

Herrera, A.(2007). Manejo seguro de residuos. Normativas a cumplir. [http://cmas.siu.buap.mx/portal\\_pprd/work/sites/didesi/resources/LocalContent/97/2/PRESENTACION\\_NORMATIVA\\_A\\_CUMPLIR\\_17Ago12.pdf](http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/didesi/resources/LocalContent/97/2/PRESENTACION_NORMATIVA_A_CUMPLIR_17Ago12.pdf)

Inacap. (s.f.). *Unidad de Aprendizaje N°2: Hormigón Fresco y Endurecido*. [http://www.inacap.cl/web/material-apoyocedem/alumno/Construccion/G01Asentamiento\\_de\\_Conono.pdf](http://www.inacap.cl/web/material-apoyocedem/alumno/Construccion/G01Asentamiento_de_Conono.pdf)

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. requisitos. (NTE INEN 2266). Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/NTE-INEN-2266-Transporte-almacenamiento-y-manejo-de-materiales-peligrosos.pdf>

Instituto mexicano del cemento y del concreto A.C. (s.f.). *Agregados. Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino*. <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdfs/problemas45.pdf>

Inacap. (s.f.). *Unidad de Aprendizaje N°2: Hormigón Fresco y Endurecido*. [http://www.inacap.cl/web/material-apoyocedem/alumno/Construccion/G01Asentamiento\\_de\\_Conono.pdf](http://www.inacap.cl/web/material-apoyocedem/alumno/Construccion/G01Asentamiento_de_Conono.pdf)

Instituto Nacional para la Seguridad y. Salud Ocupacional (NIOSH). (2003). ELEMENTOS (ICP); MÉTODO 7300. *Manual de métodos analíticos de NIOSH, cuarta edición (versión 3)*, 1–3. <https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/pdfs/7300-sp.pdf>

Martínez., J., Malo, M., Lucas, R., Álvarez, J., Salvarrey, A., & Gristo, P. (2005). *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos*. Montevideo, Uruguay: Centro Coordinador del Convenio Basilea para América Latina y el Caribe. Obtenido desde [https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia\\_para\\_la\\_gestion\\_integral\\_residuos/gestion\\_respel01\\_fundamentos.pdf](https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia_para_la_gestion_integral_residuos/gestion_respel01_fundamentos.pdf)

Ministerio del Ambiente. Texto Unificado de la Legislación ambiental (TULAS). Libro VI de la Calidad Ambiental. Anexo 2. Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación Para Suelos Contaminados. Registro Oficial Edición Especial 2. 31 de marzo del 2003.

- Ministerio del Ambiente. (2012). *Listados nacionales de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales* (Acuerdo Ministerial No.142). [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_Listado-desechos-sustancias-peligrosas-142.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Listado-desechos-sustancias-peligrosas-142.pdf)
- Montes, Y. (2017). *Evaluación del comportamiento de mezclas de gabros y vidrio reciclado en la producción de ladrillos macizos* (Publicación n.º 284) [Tesis En opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales, Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Nínive. <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2599/Yudita.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morales, D. (2022). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas en ladrillos de concreto con adición de residuo sílice-sodocálcico tipo II, Lima 2022* (Publicación n.º 429) [Tesis para obtener el título profesional de: Ingeniera Civil, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/114093>
- Municipio del distrito Metropolitano de Quito. (2013). *Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales perteneciente a la Ordenanza Metropolitana No.404* (Título V, Resolución No.002). <https://www.cip.org.ec/attachments/article/2096/RESOLUCIÓN%20No%20002-SA-2014.pdf>
- Neville, A. (2013). *Tecnología del concreto* (2ª ed.). M. en V. Soledad Moliné Venanzi. <https://www.udocz.com/apuntes/66641/tecnologia-del-concreto-neville> (Obra original publicada en 1999)
- ONU Medio Ambiente. (2019, 7 de febrero). *Taller Regional: Instrumentos para la implementación efectiva y coherente de la dimensión ambiental de la agenda de desarrollo*. [cepal.org. https://www.cepal.org/sites/default/files/presentations/gestion\\_de\\_residuos\\_-\\_jordi\\_pon.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/presentations/gestion_de_residuos_-_jordi_pon.pdf)
- Orenta Technologies. (s.f.) *“CO<sub>2</sub> y el pH: La ley de Henry”*. <https://blog.orendatech.com/es/co2-y-ph-ley-de-henry>
- Secretaría del Convenio de Basilea. (2002). *Manual en Gestión de formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*. Obtenido desde <https://www.icesi.edu.co/blogs/manejousorsi201002/files/2010/08/GUIA-PARA-LA-DEFINICION-Y-CLASIFICACION-DE-RESIDUOS.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). Guía para la Elaboración de la Cédula de Operación Anual, Tratamiento de Residuos Peligrosos. Obtenido desde [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/guias/g\\_trat.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/guias/g_trat.pdf)

Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente., Libro VI: De la calidad ambiental. (2017). *Decreto Ejecutivo 3516. Registro Oficial, Edición Especial2 de 31 de marzo de 2003*. Ecuador.

UNACEM. (2021). *Ficha técnica ARMADURO*. El constructor. <https://www.elconstructorcayambe.com/wpfconstructor/wp-content/uploads/2021/02/Armadero.pdf>

Vélez, V. (2001). *Diseño y Construcción de un sistema de medición de humedad en fibra de vidrio* [Previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Control]. biblioteca digital epn.

Villar, K. (2019). *Durabilidad del hormigón bajo la acción combinada de procesos de lixiviación y hielo/deshielo*. [Trabajo de fin de Máster, Universidad Autónoma de Madrid]. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/215091/1/durabihielodes.pdf>

## 6. ANEXOS

## ANEXO I: INVENTARIO ENTREGADO POR HAZWAT

No. de desecho	Desechos Peligrosos	COD	Cant	UND	Observaciones de calidad (No deben venir mezclados los residuos o materiales en un mismo recipiente)	Observaciones operativas (transporte, tendido de cargue y embalaje, enviar registro fotográfico del material antes del desecho)
					Potencialmente no susceptibles de mezcla	
					Se debe investigar la posibilidad de mezclarlos	
					Requieren acondicionamiento previo	
11	Materiales plásticos contaminados con hidrocarburos o productos químicos peligrosos	C.19.17	388,3	T	Deben ser plásticos (OJO identificar muy bien la procedencia, ya que pueden haber contenido eje: ácidos, hidróxido, algún peróxido etc. el material debe <b>NO debe estar liqueando</b>	Se pasaría a proceso de trituración, preferiblemente al granel, o tulas
14	Desechos sólidos que contienen sustancias peligrosas	C.25.05	77,9	T	Enviar muestra, identificar procedencia, proceso que lo generó y revisar caso específico,	
21	Envases contaminados con materiales peligrosos	NE-27	301,1	T	Deben ser plásticos (OJO identificar muy bien la procedencia, ya que pueden haber contenido eje: ácidos, hidróxido, algún peróxido etc. el material debe estar <b>NO debe estar liqueando</b> (Paletizados,	Se pasaría a proceso de trituración, preferiblemente al granel, o tulas
4	Aceites minerales usados o gastados	NE-03	332,9	T	guía de aceite	se compran
5	Aceites dieléctricos sin PCB	D.35.02	0,0	T	Enviar una muestra, se recibe a costo cero,	a cero

## ANEXO II: EJEMPLOS DE CÁLCULO

### II.1. Densidad Relativa Seca del agregado grueso

Se calculó la densidad relativa seca con la Ecuación [2.1]:

$$OD (\%) = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

OD: Densidad relativa seca (%)

SSD: densidad relativa de agregado grueso saturado con superficie seca (g)

A: masa del agregado secado al horno (g)

B: masa de agregado saturada con superficie seca en el aire (g)

C: masa de la muestra de prueba saturada en agua (g)

**Tabla II.1** Datos obtenidos en los ensayos de gravedad específica y absorción para agregado grueso.

AGREGADO GRUESO (ASTM C127-15)	PESO (g)
A	2913,2
B	3029,6
C	1810,61

Ejemplo de cálculo:

$$OD = \frac{2913,2 (g)}{3029,6(g) - 1810,61(g)} = 2.39\%$$

### II.2 Densidad Relativa del agregado grueso saturado con superficie seca (SSS)

Se calculó también la densidad relativa de agregado grueso saturado con superficie seca mediante la Ecuación [2.2]:

$$SSD = \frac{B}{B - C}$$

Ejemplo de cálculo:



$$SSD(\%) = \frac{3029,6 (g)}{3029,6 (g) - 1810,61 (g)} = 2,49 (\%) \quad [2.21]$$

### II.3 Absorción de agua del agregado grueso

Se calculó también el porcentaje de absorción de agua con la Ecuación [2.3]:

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{B-A}{A} \right] \times 100 \quad [2.3]$$

Ejemplo de cálculo:

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{3029,61 (g) - 2913,2 (g)}{2913,2 (g)} \right] \times 100 = 4\%$$

### II.4 Densidad Relativa Seca del agregado fino

Se determinó la densidad relativa seca con la Ecuación [2.4] a continuación:

$$SH = \frac{A}{B + S - C} \quad [2.4]$$

Donde:

SH: Densidad relativa seca del agregado fino (%)

SSS: densidad relativa saturada y superficialmente seca del agregado fino (%)

A: masa del material secado al horno (g)

B: masa del matraz llenado con agua (g)

C: masa del matraz llenado con el agregado y agua (g)

S: masa del agregado saturado y superficialmente seco (g)

**Tabla II.2** Datos obtenidos en los ensayos de gravedad específica y absorción para agregado fino.

AGREGADO GRUESO (ASTM C127-15)	PESO (g)
A	289,9
B	662,9
C	846,2
S	300,0

Ejemplo de cálculo:

$$SH = \frac{289,9 (g)}{662,9 (g) + 300(g) - 846,2(g)} = 2,48 \%$$

## II.5 Densidad relativa saturada y superficialmente seca del agregado fino

Se determinó también la densidad relativa saturada y superficialmente seca del agregado fino con la Ecuación [2.5] a continuación:

$$SSS = \frac{S}{B + S - C}$$

Ejemplo de cálculo:

[2.5]

$$SSS = \frac{300 (g)}{662,9 (g) + 300(g) - 846,2(g)} = 2,57\%$$

## II.6 Absorción del agregado fino

Se calculó también el porcentaje de absorción de agua con la Ecuación [2.6]:

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{S - A}{A} \right] \times 100$$

Ejemplo de cálculo:

[2.6]

$$\% \text{ Absorción} = \left[ \frac{300 (g) - 289,9(g)}{289,9 (g)} \right] \times 100 = 3,48 \%$$

## II.7 Densidad real del Cemento

**Tabla IV.3** Datos obtenidos en el ensayo.

<b>Densidad Real del Cemento</b>	
<i>Po</i>	329,9 (g)
<i>Pf</i>	387 (g)
<i>Vo</i>	0,7 (cm <sup>3</sup> )
<i>Vf</i>	18,5 (cm <sup>3</sup> )

Se utilizó un tipo de cemento Portland tipo IP de alta resistencia para que al fraguarse alcance la misma en el menor tiempo posible, lo cual se estipuló sería a los siete días.

$$\rho = \frac{Pf - Po}{Vf - Vo} \quad [2.7]$$

Donde:

P: densidad real del cemento (g/ cm<sup>3</sup>)

Po: peso inicial del frasco Le Chatelier con la gasolina a 23°C (g).

Pf: peso final del frasco Le Chatelier con la gasolina y el cemento a 23°C (g).

Vo: volumen inicial de la gasolina en el primer cuello del embudo (cm<sup>3</sup>).

Vf: volumen final de la gasolina en el segundo cuello del frasco al agregar el cemento (cm<sup>3</sup>).

Ejemplo de cálculo:

$$\rho = \frac{387 (g) - 329,9 (g)}{18,5 (cm^3) - 0,7 (cm^3)} = 3,18 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$$

## II.8 Ensayo de contenido de humedad

Se calculó el porcentaje de humedad para cada uno de los residuos con la siguiente Ecuación [2.7]:

$$\% Humedad = \frac{(Pr - Pf)}{(Pr)} \times 100 \quad [2.7]$$

Donde:

% de humedad

Pi: peso del crisol antes de ingresar al horno.

Pr: peso del residuo peligroso

Pf: peso del crisol después de salir del horno

Ejemplo de cálculo:

$$\% Humedad = \frac{(39,9373 - 37,9250)}{(39,9373)} \times 100$$

$$\% Humedad = 5,04\%$$

## II.9 Ensayo de humedad en las muestras de residuos peligrosos.

**Tabla IV.4** Datos Recolectados de las muestras de R.P. después de salir del horno.

Muestra de Residuo	$P_i$ (g)	$P_r$ (g)	$P_f$ (g)	Humedad (%)
Plástico usado en minería	37,9250	2,0075	39,9373	5,04
Ceniza	39,2228	2,0080	40,6908	3,61
Vidrio de ampollitas y perfumes	40,5455	2,0050	42,5444	4,70

Ejemplo de Cálculo:

$$\% \text{ Humedad. ceniza} = \frac{(39,9373 - 37,9250)g}{(39,9373)g} \times 100$$

$$\% \text{ Humedad. ceniza} = 0,0504 \times 100\% = 5,04\%$$

## II.10 Determinación del contenido de humedad de las muestras cúbicas

Para la determinación de la cantidad de agua desprendida en las muestras antes del secado, se utilizó la Ecuación [2.8] a continuación:

$$CHE (\%) = \frac{M_{ep} - M_{es}}{M_{ep}} \times 100$$

Donde:

[2.8]

$CHE_{A1}$ : Contenido de humedad de los especímenes

$M_{ep}$ : masa del espécimen antes del secado (g)

$M_{es}$ : masa del espécimen después del secado (g)

Ejemplo de Cálculo:

Determinación del contenido de humedad en el espécimen cúbico con la dosificación del 5%

$$CHEA1 (\%) = \frac{(7605,8) g - (7153,7)g}{(7605,8)g} \times 100$$

$$CHEA1 (\%) = 0,0594 \times 100 = 5,94 \%$$

## ANEXO III. INFORMES ENTREGADOS POR EL LEMSUR



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Código de Informe: Dosif-23-001-I

Hoja 02 de 04

Fecha de Informe: 2023-06-23

PROYECTO: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa

Hazwat

NORMAS: Indicadas

FECHA DE ENSAYO: 2023-01-24

#### a. AGREGADO FINO

DENSIDADES APARENTES		NORMA: ASTM C29
DENSIDAD SUELTA:	1570	kg/m <sup>3</sup>
DENSIDAD COMPACTADA:	1780	kg/m <sup>3</sup>

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN		NORMA: ASTM C128
DENSIDAD RELATIVA SECA:	2,48	-
DENSIDAD RELATIVA SSS:	2,57	-
ABSORCIÓN DE AGUA:	3,50	%

ENSAYO CONTENIDO ORGÁNICO		NORMA: ASTM C40
ESCALA PLACA ORGÁNICA	0	

MÓDULO DE FINURA		NORMA: ASTM C136
	3,34	

DENSIDADES APARENTES		NORMA: ASTM C29
DENSIDAD SUELTA:	1260	kg/m <sup>3</sup>
DENSIDAD COMPACTADA:	1380	kg/m <sup>3</sup>

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN		NORMA: ASTM C127
DENSIDAD RELATIVA SECA:	2,39	-
DENSIDAD RELATIVA SSS:	2,49	-
ABSORCIÓN DE AGUA:	4,00	%

#### c. CEMENTO

DENSIDADES		NORMA: ASTM C188
DENSIDAD REAL :	3,18	g/cm <sup>3</sup>

  
 X Ing. Mercedes Villacís  
 JEFE DE LABORATORIO



**Figura III.1.** Resultados obtenidos en las propiedades físicas de los materiales



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO

Código de Informe: Dosif-23-001-I

Hoja 03 de 04

Fecha de Informe: 2023-06-23

PROYECTO: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat

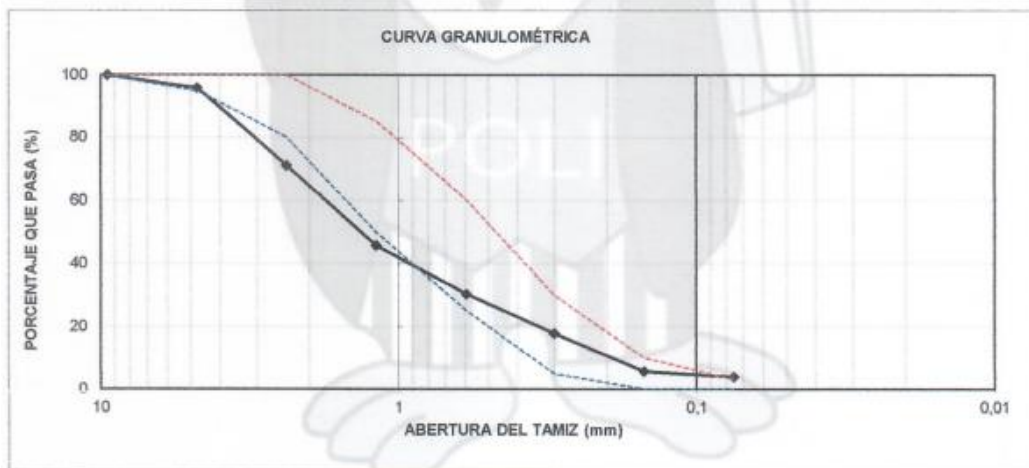
MUESTRA: Agregado fino

MINA: \*\*\*

NORMA: ASTM C136, ASTM C33

FECHA DE ENSAYO: 2023-02-14

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA
3/8"	9,5	0,0	0,0	0,0	100,0
4	4,75	20,9	4,2	4,2	95,8
8	2,38	124,2	24,8	29,0	71,0
16	1,19	126,6	25,3	54,3	45,7
30	0,59	77,4	15,5	69,8	30,2
50	0,3	61,8	12,4	82,1	17,9
100	0,15	60,9	12,2	94,3	5,7
200	0,075	9,4	1,9	96,2	3,8
BANDEJA	-	19,1	3,8	100,0	0,0
	TOTAL	500,3	M. FINURA	3,34	



  
X Ing. Mercedes Villacis  
JEFE DE LABORATORIO



Figura III.2. Resultados obtenidos del análisis granulométrico sobre agregados finos.



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO

Código de Informe: Dosif-23-001-I

Hoja 04 de 04

Fecha de Informe: 2023-06-23

PROYECTO: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat

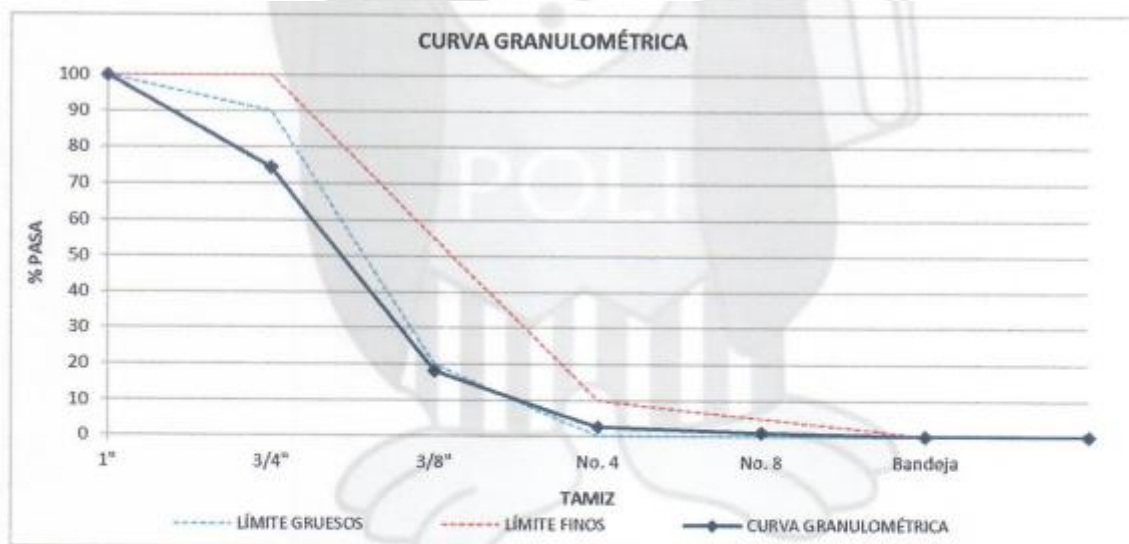
MUESTRA: Agregado grueso

MINA: \*\*\*

NORMA: ASTM C136, ASTM C33

FECHA DE ENSAYO: 2023-02-14

PESO INICIAL (g)		5001,30	Número de Tamaño		67
TAMIZ	TAMAÑO	PESO	PORCENTAJE	PORCENTAJE RET.	PORCENTAJE
No.	ABERTURA	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	QUE PASA
	(mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
1"	25,00	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,00	1285,4	25,7	25,7	74,3
3/8"	9,50	2804,3	56,1	81,8	18,2
No. 4	4,75	779,6	15,6	97,4	2,6
No. 8	2,36	82,2	1,6	99,0	1,0
Bandeja	-	49,8	1,0	100,0	0,0
TOTAL		5001,3	100,0		



  
 Ing. Mercedes Villacís  
 JEFE DE LABORATORIO



**Figura III.3.** Resultados obtenidos del análisis granulométrico sobre agregados grueso.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
 LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**ENSAYO DE ABRASIÓN**

Código de Informe: ABR-23-001-I  
 Fecha de informe : 2023-06-23

Hoja 01 de 01

**DATOS DEL CLIENTE**

Razón social: Verónica Jacqueline Atahualpa Mortea  
 Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía  
 Teléfono: 0994281217

**DATOS DEL PROYECTO**

Proyecto: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat  
 Contratante: \*\*\*  
 Contratista: \*\*\*  
 Fiscalizador: \*\*\*  
 TIPO DE MUESTRA: Ripio  
 PROCEDENCIA: Holcim Pifo  
 FECHA DE ENSAYO: 2023-01-24  
 NORMA: ASTM C131

RESULTADOS DEL ENSAYO	
Código de muestra:	Ripio
Tamaño máximo nominal:	3/4"
Gradación:	B
Número de esferas:	11
Peso Inicial (g)	5000,0
Peso retenido en el tamiz #12	4781,40
Luego de 100 revoluciones (g):	
Peso retenido en el tamiz #12	3991,20
Luego de 500 revoluciones (g):	
Pérdida por abrasión e impacto (%) (100 revoluciones)	4,37
Pérdida por abrasión e impacto (%) (500 revoluciones)	20,18

**Observaciones:**

La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

X Ing. Mercedes Villacis  
 JEFE DE LABORATORIO



**Figura III.4** Resultados obtenidos en el ensayo de abrasión.





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



#### DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

Código de informe: Dosif-23-001-I  
Fecha de informe: 2023-06-23

Hc

#### DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Verónica Jacqueline Atahualpa Moreta  
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía  
Teléfono: 0994281217; 0983796937

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ACI 211  
FECHA DE ENSAYO: 2023-01-24

#### CONDICIONES DE DOSIFICACIÓN $f'c = 24$ MPa

#### Condiciones ambientales

Temperatura: 17 °C  
Humedad: 30 %

#### Materiales

Agregados: Arena: Pifo - Ripio: Holcim  
Cemento: Armaduro  
Tamaño máximo nominal agregado grueso 19 mm - 3/4"  
Materiales en estado seco

#### Inclusión de aire y aditivos

Sin inyección de aire

Sin aditivo

#### Asentamiento

75-100 mm

#### RESUMEN DE RESULTADOS

DOSIS EN PESO PARA 1 m <sup>2</sup>	
Material	Peso (kg)
Agua	266
Cemento	410
Agregado fino	854
Agregado grueso	781

DOSIS PARA 1 SACO DE CEMENTO (50 kg)	
Material	Cantidad
Agua (l)	32
Cemento (saco)	1
Agregado fino (cajonetas)	3 de (30 x 30 x 25) cm
Agregado grueso (cajonetas)	3 de (30 x 30 x 28) cm

PROPIEDADES MEDIDAS	
Resistencia 7 días (MPa)	24
Asentamiento (mm)	75
Temperatura hormigón (°C)	19

PROPORCIÓN EN PESO				PROPORCIÓN EN VOLUMEN			
Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso
0,65	1	2,08	1,91	0,58	1	1,19	1,36

**OBSERVACIONES:** La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y condiciones de dosificación, involucra su total responsabilidad.  
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.  
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.  
La dosificación presentada fue comprobada experimentalmente, obteniendo las propiedades medidas reportadas.

Ing. Mercedes Villacis  
JEFE DEL LABORATORIO



Figura III.5 Dosificación de los materiales componentes del hormigón.



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

Código de Informe: CC-23-003-I  
Fecha de informe: 2023-06-23

Hoja 01 de 01

#### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Verónica Jacqueline Atahualpa Mortea  
Dirección: Ladrón de Guevara E 11-253 y Andalucía  
Teléfono: 0994281217

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
ELEMENTO: Dosificación 240 kg/cm<sup>2</sup> Orden OS-23-006-I  
NORMA: ASTM C39

No.	Identificación	Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Peso* específico (kg/m <sup>3</sup> )	Carga Máxima (kN)	Tipo de falla	Defectos	Resistencia	
											(MPa)	± U
1	006-I-H-04	2023-02-15	2023-02-22	7	102,75	8292	2256	190,5	Tipo 2	A	23,0	0,02
2	006-I-H-05	2023-02-15	2023-02-22	7	102,75	8292	2245	206,0	Tipo 2	A	24,8	0,02
3	006-I-H-06	2023-02-15	2023-02-22	7	101,75	8131	2271	188,0	Tipo 2	A	23,1	0,02
4	006-I-H-07	2023-02-15	2023-02-22	7	102,50	8252	2262	187,8	Tipo 2	A	22,8	0,02

Tipo de falla					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6
Conos en ambos extremos razonablemente bien formados,	Cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales	Fisura vertical columnar a través	Fractura diagonal sin fisuras a través de los bordes, golpear	Fracturas a los lados en el extremo superior o en el fondo	Similar al Tipo 5, pero el extremo del cilindro está

Descripción de defectos: A = Ninguno ; B = Segregado ; C = Porosidad ; D = Fisuras preexistentes ; E = Otra.

Observaciones: Todos los datos del ítem de ensayo (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones del Laboratorio. U, expresada en MPa, representa la incertidumbre expandida de los resultados.

El tipo de falla y defectos corresponde a lo especificado en la norma ASTM C39.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

  
Ing. Mercedes Villacís  
JEFE DE LABORATORIO



Figura III.6 Resistencia obtenida en la compresión de los cilindros de hormigón.



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### COMPRESIÓN CÚBICA DE HORMIGÓN

Código de Informe: OCH-23-001-I

Hoja 01 de 01

Fecha de informe : 2023-06-23

#### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Verónica Jacqueline Atahualpa Moreta  
 Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía  
 Teléfono: 0994281217

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat  
 Contratante: \*\*\*  
 Contratista: \*\*\*  
 Fiscalizador: \*\*\*  
 Fábrica: \*\*\*  
 Muestra: Cubo de hormigón con inclusión de residuo y encapsulamiento  
 NORMA: Nch 1037

Nº	Descripción	Código	Fecha	Fecha	Edad	Área	Peso específico	Carga	Resistencia (MPa)		Defectos
			Fábrica	Rotura					(días)	(mm <sup>2</sup> )	
1	5%	006-I-H-08	2023-03-02	2023-03-09	7	22896	2162	462,2	20,2	17,2	***
2	10%	006-I-H-09	2023-03-02	2023-03-09	7	23076	2130	405,7	17,6	14,9	****
3	15%	006-I-H-10	2023-03-02	2023-03-09	7	22880	2156	449,1	19,6	16,7	****
4	20%	006-I-H-11	2023-03-02	2023-03-09	7	22852	2137	384,2	17,0	14,4	****
5	BLANCO	006-I-H-12	2023-03-03	2023-03-10	7	11002	2187	235,7	21,4	18,2	****

#### Observaciones:

La información proporcionada por el cliente, tal como, descripción y fecha de fábrica, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

  
 Ing. Mercedes Villacis  
 JEFE DE LABORATORIO



**Figura II.7** Resistencia obtenida en la compresión de los especímenes cúbicos de hormigón

## ANEXO IV: INFORMES DE RESULTADOS ENTREGADOS POR EL DEMEX



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



#### RESULTADO DE ANALISIS

**Solicitante:** Verónica Atahualpa  
**Referencia:** RM - 10540  
**Fecha:** 23-02-23  
**Muestra:** 3 muestras líquidas

La cuantificación de los metales se lo realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300. A continuación los resultados:

Muestra	Determinación	Resultados
M1 Ceniza de incinerador	Cadmio Plomo Níquel Zinc Cromo Arsénico Mercurio	0,02 mg/L 0,37 mg/L 0,64 mg/L 4,50 mg/L 0,61 mg/L 1,06 mg/L 2,5 ug/L
M4 Vidrio de perfumes	Cromo Manganeso	0,03 mg/L 0,35 mg/L
M5 Lona de minería	Cadmio Plomo Níquel Zinc Cromo Arsénico Mercurio	0,01 mg/L 10,78 mg/L 0,25 mg/L 0,15 mg/L 2,73 mg/L no detectable 12,2 ug/L

Ing. Diana Endara D. PhD.  
**Jefe de Departamento**

MSc. Evelyn Criollo T.  
**Jefe de Laboratorio**

Pasaje Andalucía 134 E12A y A. Mena Caamaño - Telefax (593-2)2236 562 - Casilla 17-01-2759  
 Quito-Ecuador

**Figura IV.1** Resultado de la cuantificación de contaminantes en los residuos peligrosos.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



**Resultados de análisis por Absorción Atómica**

**Solicitante** : Verónica Atahualpa / Nicole Males  
**No. Referencia** : RM - 10649  
**Fecha** : 03/08/2023  
**Muestra recibida** : 18 soluciones (lixiviados)

La cuantificación de metales presentes en las muestras se realizó empleando el Espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 300. A continuación, los resultados obtenidos:

Metales	B1 (%)	P1 (%)	P2 (%)	P3 (%)	P4 (%)
Cadmio (Cd)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Cromo (Cr)	No detectable	0,05	0,05	0,02	0,03
Plomo (Pb)	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Níquel (Ni)	No detectable	0,02	0,02	0,02	0,01
Zinc (Zn)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Manganeso (Mn)	No detectable	0,02	0,01	0,02	0,02
Arsénico( (As)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Mercurio (Hg)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable

Metales	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M4 (%)
Cadmio (Cd)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Cromo (Cr)	0,01	0,05	0,02	0,03
Plomo (Pb)	0,02	0,02	0,03	0,04
Níquel (Ni)	0,01	0,02	0,01	0,01
Zinc (Zn)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Manganeso (Mn)	No detectable	0,03	0,02	0,02
Arsénico( (As)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
Mercurio (Hg)	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable

Ing. Diana Endara D. PhD.  
Jefe de Departamento

MSc. Evelyn Criollo T.  
Jefe de Laboratorio

**Figura IV.2** Resultados de la concentración de metales no pesados de los lixiviados.

## ANEXO V: TABLAS Y FIGURAS

### V.1 Granulometría del agregado grueso

**Tabla V.1** Número de tamices con su respectivo tamaño de abertura para el agregado grueso.

Tamiz (No.)	Tamaño de abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25,00	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,00	1285,4	25,7	25,7	74,3
3/8"	9,50	2804,3	56,1	81,8	18,2
No. 4	4,75	779,6	15,6	97,4	2,6
No. 8	2,36	82,2	1,6	99,0	1,0
Bandeja	-	49,8	1,0	100	0,0
<b>TOTAL</b>			5001,3	100,0	

**Tabla V.2** Valores de la faja granulométrica del agregado grueso.

<b>Granulometría del agregado grueso</b>			
Peso inicial (g)	5001,30	Número de tamaño	67
<b>Norma ASTM C33</b>			
Límite superior		Límite inferior	
100		100	
100		90	
55		20	
10		0	
5		0	
0		0	

### V.II Granulometría del agregado fino:

**Tabla V3.** Valores de la faja granulométrica del agregado grueso

<b>Granulometría del agregado grueso</b>			
Peso inicial (g)	500,30	Módulo de finura	3.34
<b>Norma NTE INEN 872</b>			
Límite superior		Límite inferior	
100		100	
100		95	
100		80	
85		50	
60		25	
30		10	
10		2	

**Tabla V.4** Graduación para agregado fino según el número de tamiz.

Tamiz (No)	Tamaño de abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9,5	0,0	0,0	100,00
4	4,75	20,9	4,2	95,8
8	2,38	124,2	24,8	71,0
16	1,19	126,6	25,3	45,7
30	0,59	77,4	15,5	30,2
50	0,3	61,8	12,4	17,9
100	0,15	60,9	12,2	5,7
200	0,075	9,4	1,9	3,8
Bandeja	-	19,1	3,8	0,0
<b>TOTAL</b>		500,3	100	

**Tabla V.5** Graduaciones de las muestras de prueba para agregados con tamaño menor a 1½"

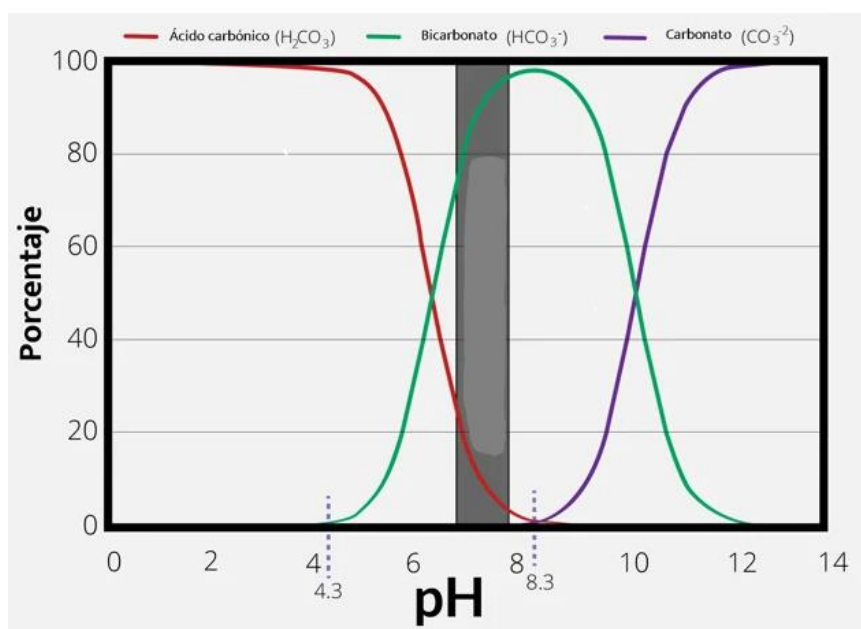
Tamaño del tamiz		Masas (g) y graduación			
		Revoluciones/minuto			
Menor a 1½"		A	B	100 y 500	Total 500
Pasan	Retenidos en			C	D
1½"	1"	1250±25			
1"	¾"	1250±25			
¾"	½"	1250±25	1250±25		
½"	⅜"	1250±25	1250±25		
⅜"	¼"			1250±25	
¼"	N°4			1250±25	
N°4	N°8				5000±10
<b>TOTAL</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
<b>N° ESFERAS</b>		12	11	8	6

Fuente: ASTM C131/C131M-20

**Tabla V.6** Resultados del porcentaje de humedad presente en los especímenes cúbicos con los R.P. encapsulados.

Espécimen cúbico con los R.P. encapsulados	$M_{ep}$ (g)	$M_{es}$ (g)	Humedad (%)
Blanco (B2)	7680,4	7559,4	1,60
A1 (5%)	7605,8	7153,7	6,32
A2 (10%)	7566,3	7288,8	3,81
A3 (15%)	7570,1	7105,6	6,54
A4 (20%)	7462,8	6913,2	7,95
DUPLICADO			
B1 (5%)	7613,2	7173,2	6,13
B2 (10%)	7484,6	7219,0	3,68
B3 (15%)	7639,2	7157,2	6,73
B4 (20%)	7450,5	6969,5	6,90

### Curva de carbonatos del agua



**Figura V.1** Curva de carbonatos del agua natural

Fuente: Orenda Technologies, s.f.



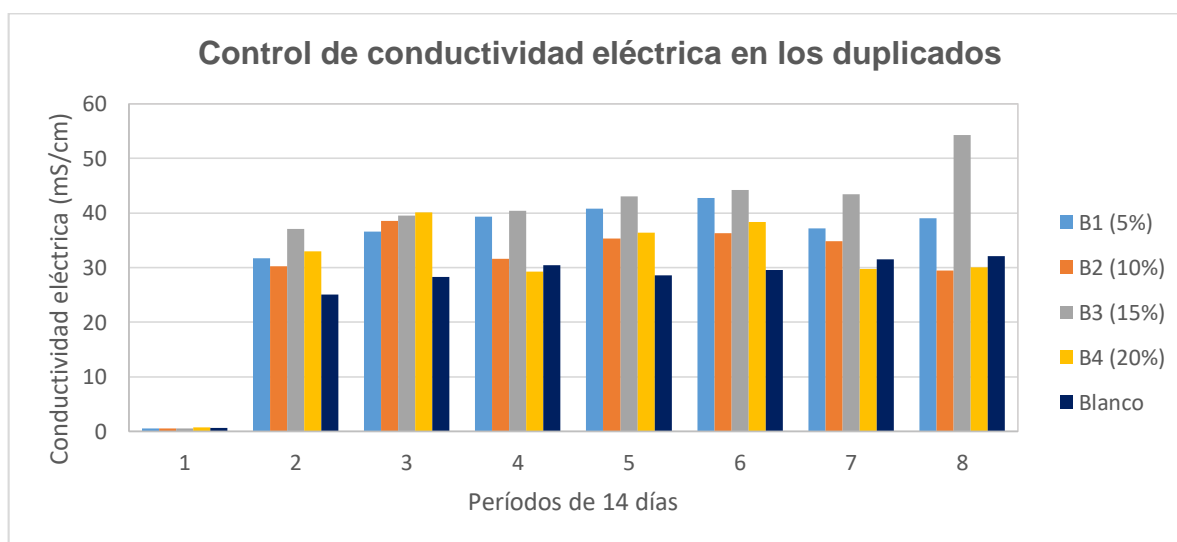
## Datos del ensayo de lixiviación

**Tabla V.7** Datos de pH tomados durante el ensayo

		pH								
		A1 (5%)	B1 (5%)	A2 (10%)	B2 (10%)	A3 (15%)	B3 (15%)	A4 (20%)	B4 (20%)	Blanco (B2)
1	6/4/2023	9,66	9,45	9,94	9,62	10,56	10,03	10,34	10,42	9,95
2	21/4/2023	12,72	12,74	12,69	12,71	12,94	12,84	12,81	12,74	12,51
3	5/5/2023	12,83	12,76	12,79	12,7	12,94	12,8	12,64	12,67	12,73
4	19/5/2023	12,9	12,96	12,8	12,79	12,9	12,88	12,71	12,69	12,62
5	2/6/2023	12,95	12,56	12,43	12,52	12,68	12,46	12,35	12,42	12,38
6	15/6/2023	12,7	12,77	12,63	12,45	12,81	12,69	12,56	12,41	12,47
7	30/6/2023	12,62	12,84	12,69	12,52	12,85	12,69	12,56	12,51	12,51
8	14/7/2023	11,78	12,03	12,01	11,89	12,11	12,14	11,9	11,87	11,85

**Tabla V.8** Datos de conductividad eléctrica tomados durante el ensayo

		Conductividad eléctrica								
		A1 (5%)	B1 (5%)	A2 (10%)	B2 (10%)	A3 (15%)	B3 (15%)	A4 (20%)	B4 (20%)	Blanco (B2)
		(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)	(mS/cm)
1	6/4/2023	0,604	0,527	0,342	0,546	1,127	0,551	0,831	0,721	0,69
2	21/4/2023	32,6	31,7	30	30,3	46	37,1	29,7	33	25,1
3	5/5/2023	38,2	36,6	31,9	38,6	50,6	39,5	24,2	40,1	28,3
4	19/5/2023	40,1	39,3	33,9	31,6	52,2	40,4	25,6	29,3	30,4
5	2/6/2023	43,5	40,8	29	35,3	60,3	43	29,8	36,4	28,6
6	15/6/2023	45,5	42,8	31	36,3	62,3	44,2	30,8	38,4	29,6
7	30/6/2023	29,4	37,2	39,1	34,8	62,3	43,4	32,9	29,8	31,5
8	14/7/2023	24,7	39	43,6	29,5	64	54,3	25,7	30,1	32,1



**Figura V.9** C.E. en función de los períodos de medición en los duplicados.

En la Figura V.9 se observa la C.E. presentada por los lixiviados de los duplicados de las muestras cúbicas con R.P. encapsulados, en los cuales se puede observar un comportamiento similar al presentado por las muestras en la Figura 3.9. El mayor valor de C.E. se presentó en la muestra B3(15%) correspondiente a 64, a continuación la muestra B1(5%) presentó también un valor mayor de 45,5. En el resto de especímenes la C.E. se mantuvo entre 30 y 40 mS/cm y luego en el período de medición 8 (112 días) se redujo ligeramente. Se concluye que el valor máximo que presentó el lixiviado de la muestra B3 (15%) de 55 mS/cm, no sobrepasa el límite de 200 mS/cm establecido en la Ordenanza Municipal No.404.

## ANEXO VI: REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Figura VI.1** Almacenamiento de residuos plásticos impregnados con sustancias peligrosas e hidrocarburos



**Figura VI.2** Residuos peligrosos entregados por Hazwat para ser encapsulados.



**Figura VI.3** Preparación de los agregados para la determinación del peso específico.



**Figura VI.4** Determinación de la densidad aparente del agregado grueso.



**Figura VI.5** Materiales utilizados y periodo de reposo de la muestra.



**Figura VI.6** Determinación de contenido de humedad en las muestras de residuos peligrosos.



**Figura VI.7.** Fundición de los cilindros de hormigón



**Figura VI.8** Filtrado y envasado del lixiviado de cada una de las dosificaciones con su duplicado.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
INGENIERÍA AMBIENTAL



---

**ANEXO VII: MANUAL DEL PROCESO DE ENCAPSULAMIENTO**

**MANUAL DEL PROCESO DE ENCAPSULAMIENTO**

**ENCAPSULAMIENTO DE RESIDUOS DE CENIZA, VIDRIO DE  
AMPOLLETAS, PILAS Y PLÁSTICO USADOS EN MINERÍA**

**Responsable:** Verónica Atahualpa

**Directora:** Ing. Lucía Montenegro

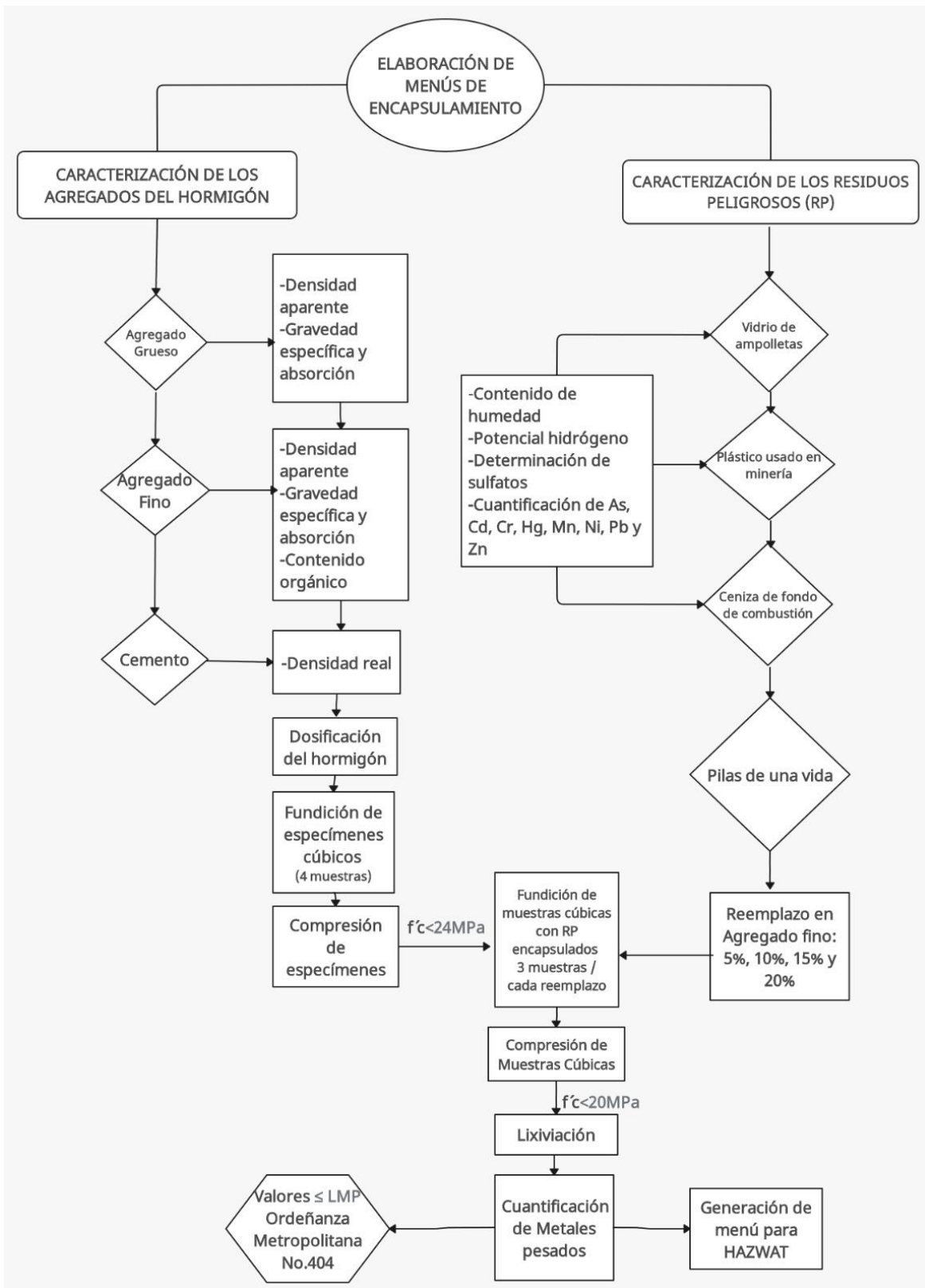
**Objetivo General:**

Evaluar diferentes composiciones de residuos peligrosos encapsulados en una matriz de hormigón, con el fin de establecer el menú más apropiado en el que se reemplace la mayor cantidad de agregado fino del hormigón por tres tipos de residuos peligrosos, tales como vidrio de ampollitas y perfumes, ceniza proveniente de la combustión de desechos peligrosos y especiales y plástico usado en minería para la elaboración de una muestra en cuyo interior se encapsulen pilas usadas y dar así a estos residuos, una disposición final adecuada.

**Objetivos Específicos:**

1. Caracterizar los residuos de ceniza proveniente de la combustión de residuos peligrosos, vidrio de ampollitas y plástico usado en minería para determinar sus propiedades más influyentes en la estructura del hormigón.
2. Caracterizar los materiales que conforman la matriz de encapsulamiento para determinar las características físicas que le otorguen mayor resistencia a la compresión,
3. Comprobar si existe lixiviación de las muestras cúbicas con las diferentes proporciones de residuos peligrosos encapsulados, al estar expuestas a condiciones medioambientales.
4. Determinar el menú de encapsulamiento más eficiente en los que las presencias de

residuos peligrosos no alteren las características del hormigón.



**Figura 4.2** Diagrama de trabajo del procedimiento de lixiviación de las muestras cúbicas.

## 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES QUE CONFORMAN EL HORMIGÓN

### 1.1 Gravedad y Peso específico y absorción de agua:

#### Materiales:

- Agregado fino (Pifo-ripio)
- Agregado grueso (Holcim)
- Agua
- Franela

#### Equipos:

- Horno
- Balanza con canastilla

#### Procedimiento

##### Agregado grueso

- De forma anticipada se midió el peso de una canastilla sujeta a una balanza la cual se encontraba introducida en un cubo lleno de agua, se esperó algunos minutos.
- Se colocaron 3 kg de agregado grueso previamente lavado (ripio de la marca Holcim) en el interior de una bandeja con agua durante 24 horas con el fin de que el material se sature.
- Transcurrido este tiempo se procedió a secar con una franela, 2 kg de las rocas de mayor tamaño (alrededor de 1 pulgada) hasta dejarla seca y sin brillo en la superficie, y al mismo tiempo con su interior está saturado con agua (condición SSS).
- Se colocó este material en el interior de la canastilla, se sumergió en el agua y se midió el peso el cual fue registrado.
- Se llevó este material al horno a 110°C y 24 horas, después de lo cual se pesó nuevamente.

##### Agregado fino

- Se sumergió 1 kg de agregado fino (arena del sector de Pifo) previamente lavado en agua durante 24 horas para saturar el material.
- Luego de este tiempo, escurrir el agua y pesar este material saturado.
- A continuación, colocar en el horno a 110°C durante 10 minutos para eliminar el exceso de agua y se midió el peso nuevamente.

#### Prueba del cono:

Se realizó la prueba del cono con el fin de determinar la absorción del agregado fino y la humedad en la superficie.

- Se secaron 300 g de este material saturado a 110°C durante 10 minutos.
- Se llenó con parte del material un molde metálico en forma de cono truncado colocado



sobre una bandeja.

- Se dejó caer un pisón metálico a una pequeña altura durante 7 veces, con la compactación disminuyó la altura del material y se debió agregar otra cantidad hasta que se llene el cono y se dejó caer nuevamente 7 veces el pisón.
- Este paso se repitió hasta que se completen 25 golpes con el pisón.
- Finalmente se levantó el molde hacia arriba con mucho cuidado para que no se desmorone el material con lo cual se consiguió la condición óptima de material SSS (agregado saturado con superficie seca).

## 1.2 Densidad aparente

### Materiales

- Agregado grueso
- Agregado fino
- Agua

### Equipos

-Cuerpo cilíndrico con varilla

### Procedimiento:

- Se utilizó un cuerpo cilíndrico metálico cuyo peso y dimensiones fueron registradas inicialmente con el fin de determinar el volumen de este.
- Se llenó de agregado grueso dicho cilindro y con una varilla se arrastró el material que sobresalía hasta igualar este con la altura del cilindro.
- Como último paso se pesó el cilindro lleno del material.

### Densidad aparente compactada del agregado grueso

- El cuerpo cilíndrico de peso ya conocido fue lleno con el agregado grueso, seguido se le dio 25 golpes con la varilla luego de lo cual el material quedó compactado y se adicionó más agregado grueso hasta que llene completamente el cilindro.
- A continuación, se dio nuevamente 25 golpes con la varilla y se llenó nuevamente de material hasta que se compacte y esté a la misma altura del cilindro.
- Finalmente, se pesó el cilindro con el material lleno, se realizó este procedimiento por duplicado.

## 1.3 Granulometría y abrasión

### Materiales

- Agregado grueso
- Agregado fino
- Agua

### Equipos

-Tamiz mecánico  
 -Tamices de varias medidas  
 -Tambor mecánico  
 -Máquina de "Los Ángeles"

### **Agregado grueso**

Se llevó a cabo este ensayo sobre el agregado grueso con el fin de separar las pequeñas rocas que constituyen el material en diferentes tamaños y determinar el tamaño máximo nominal (abertura del tamiz por donde pasará la mayor parte del agregado), para lo cual se procedió de la siguiente manera:

- Se tomaron 5 kg de muestra y se colocaron en la parte superior de un tamiz mecánico el cual constaba en su interior de varios tamices de medidas descritas en la Tabla 2.2.
- Se agitó el material en su interior durante 5 minutos para la respectiva separación.
- Se retiró cada uno de los tamices y se midió el peso del material retenido en cada uno de ellos.
- Se registraron estos datos.

### **Agregado fino**

De igual forma que para el agregado grueso, este ensayo tuvo el objetivo de separar sus partículas constituyentes del agregado fino y determinar el número de tamiz en donde queda retenido la mayor parte del material, se procedió de la siguiente manera:

- Se tomaron 500 g de agregado fino y se colocaron sobre una serie de tamices manuales apilados en diferentes números como se aprecia en la tabla 2.3.
- Se agitó este sistema de tamices con movimiento circulares durante 5 minutos.
- Se procedió a retirar cada uno de los tamices y se midió el peso del material retenido en cada uno de ellos.
- Finalmente se registró el peso.

### **1.4 Ensayo de abrasión para agregado grueso**

Para este trabajo de investigación se utilizó la máquina de “Los Ángeles” según lo estipula la Norma ASTM C33M-13 Especificación estándar para agregados de concreto (American Society for Testing and Materials, 2013). Para la ejecución de este ensayo se procedió de la siguiente manera:

- Se pesaron 5 kg de ripio y se colocaron en el interior del tamizador electrónico con tamices de 3/4", 1/2", 3/8" y una bandeja en el fondo, este material se separó en dos mitades.
- Recoger los 2500 g que atravesaron por el tamiz de 1/2" y se retuvo en el de 3/8", y los 2500 g restantes del material que atravesaron por el tamiz de 3/4" y se retuvo en el de 1/2".
- Se colocó todo el agregado grueso que se retuvo en los tamices en el tambor de la máquina de “Los Ángeles” junto con las 11 bolas de acero.

- Se programó el tambor para que girara 100 revoluciones por minuto y recoger el material.
- Se colocó el material recogido en el tamizador eléctrico en donde se colocaron las bandejas N°8 y N°12 y se lo tamizó por 2 minutos.
- Se midió el peso del material retenido en los tamices N°8 y N°12 y se colocaron otra vez en el tambor de la máquina de “Los Ángeles” junto con las 11 bolas de acero.
- Se programó que el tambor girara 500 revoluciones por minuto. Seguido se colocó nuevamente el material recogido en el tamizador electrónico con las bandejas N°8 y N°12 durante 2 minutos.
- Se obtuvo el material retenido en una sola bandeja el cual fue pesado.

### 1.5 Contenido orgánico del agregado fino

#### Materiales

- -Agregado fino
- -Hidróxido de sodio
- -Cartilla de color (N° 815 TESTER for ASTM C-40)

#### Procedimiento

señalado en la Norma ASTM C40/C40M-20 Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para hormigón (American Society for Testing and Materials, 2020). Se procedió de la siguiente manera:

- Se colocó en un frasco transparente de vidrio y de boca ancha con capacidad de 250 ml y marcado con 130 ml y 200 ml, agregado fino hasta la etiqueta de 130 ml,
- Se agregó una solución de hidróxido de sodio al 3% (NaOH) hasta la etiqueta de 200 ml.
- Se tapó el frasco con la tapa esmerilada y se agitó de forma vigorosa.
- Se dejó reposar esta mezcla durante 24 horas.
- Transcurrido este tiempo, se colocó junto al frasco la cartilla de prueba que contenía 5 colores (N° 815 TESTER for ASTM C-40) y se realizó la comparación del color del líquido sobrenadante con los colores reflejados en la cartilla. En este caso el color claro del hidróxido de sodio indicó la total ausencia de contenido orgánico.

### 1.6 Densidad Real del cemento

#### Materiales:

- -Cemento
- -Gasolina
- -Frasco de Le Chatelier

- -Termómetro

### **Procedimiento:**

Este ensayo se aplica exclusivamente al cemento, se ejecutó el procedimiento señalado en la Norma ASTM C188-17 Método de prueba estándar para determinar la densidad del cemento hidráulico (ASTM, 2023). El objetivo de este procedimiento fue determinar la masa del cemento sobre su volumen real (sin tomar en cuenta los espacios entre las partículas de cemento) cuya propiedad influye en el diseño del hormigón. Para la ejecución de este ensayo se procedió de la siguiente manera:

- Se utilizó un frasco de Le Chatelier de capacidad de 250 ml en el cual se colocó gasolina hasta el rango marcado entre 1 y 0 en el primer cuello del embudo.
- A continuación, se colocó en una lavacara metálica agua caliente y se dejó reposar hasta que la temperatura descendió a 23°C.
- En este punto se sumergió el embudo Le Chatelier hasta que la gasolina en su interior alcanzara los 23°C lo cual se monitoreaba con un termómetro.
- Se secó bien el embudo y se midió su peso.
- En seguida se colocó el cemento cuidadosamente dentro del frasco con la ayuda de una espátula, tratando de que el cuello no se tapara hasta que llegará a 18,5 ml marcados en el mismo.
- Después de esto, se lo hizo girar sobre un paño hasta que se desprendieran las burbujas del interior del cemento que no se mezcló con la gasolina .
- Finalmente se introdujo el embudo con gasolina y cemento nuevamente en la bandeja con agua caliente hasta que la gasolina en su interior alcanzara los 23 °C, momento en el cual se retiró el embudo y se midió su peso con el frasco bien seco.

## **2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS**

### **2.1 Ensayo de humedad**

#### **Materiales**

- -Residuos de ceniza de fondo de cámara de combustión
- -vidrio de ampollitas y perfumes
- -Plástico usado en minería
- -Mortero
- -Crisoles

#### **Equipos**

- Horno
- Balanza

### **Procedimiento**

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la cantidad de agua presente en las

muestras de cada uno de los residuos, para reportar su peso en base seca y para que el agua no interfiriera en el resto de ensayos a realizar sobre las muestras de residuos peligrosos.

Para la ejecución de este ensayo, se procedió de la siguiente manera:

- Se utilizaron 5 crisoles pequeños y limpios y se midió el peso de cada uno.
- Se los colocó en un horno (marca: DURANT; modelo: SP 7-1-L-CL) a temperatura de 110 °C durante 2 horas.
- A continuación, se colocaron en el desecador durante 1 hora. Una vez fríos se midió el peso de cada uno manipulándolos con una pinza para no afectar su peso. Se realizó este paso debido a que el material de los crisoles absorbe humedad del ambiente y esto podría afectar los resultados.
- Se pulverizaron las dos muestras de residuos peligrosos: vidrio de ampollitas y perfumes y ceniza de combustión de residuos peligrosos y especiales, mientras que el plástico usado en minería fue fragmentado en pedazos de 0,5 cm aproximadamente.
- Se pesaron 2 g de cada uno de los residuos.
- Se colocaron en el horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas.
- Transcurrido este tiempo se midió su peso y se registraron los valores respectivos.

## 2.2 Ensayo de pH

### Materiales

- -Residuos de ceniza de fondo de cámara de combustión
- -vidrio de ampollitas y perfumes
- -Plástico usado en minería
- -Vasos de precipitación
- -Agua destilada

### Equipos

- Medidor de pH
- Balanza

### Procedimiento

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la concentración de iones hidrógeno, cuya presencia podría influir en la movilidad de los metales pesados que se encuentran en los residuos peligrosos que se trataron (Antonadis et al., 2017). Para la ejecución de este ensayo se procedió de la siguiente manera:

- Se colocaron 2 g del vidrio de ampollitas y perfumes pulverizado en un vaso de precipitación de 100 ml, a continuación, se agregó 6 ml de agua destilada y se revolvió la mezcla.
- Se midió el pH con el medidor multiparámetros HACH (modelo HQ 30 d) y se registró el valor.
- Se realizó el mismo procedimiento para la muestra de ceniza, y para la muestra de plástico de minería se colocaron 2 g en 60 ml, debido al gran volumen de la muestra

la cuál por sus características requirió de mayor cantidad de disolvente.

### 2.3 Determinación de sulfatos

Materiales	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• -Residuos de ceniza de fondo de cámara de combustión</li> <li>• -vidrio de ampollitas y perfumes calentamiento</li> <li>• -Plástico usado en minería</li> <li>• -Matraz Erlenmeyer</li> <li>• -Celdas de 10 ml</li> <li>• -Agua destilada</li> <li>• Reactivos HACH: Sulfaver</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Balanza</li> <li>-Plancha de</li> <li>-Espectrofotómetro</li> </ul>

#### Procedimiento

Se realizó este ensayo con el objetivo de determinar la posible presencia de sulfatos en las muestras, ya que unas altas concentraciones de estas sales habrían podido interferir en el correcto fraguado del hormigón (NTE INEN 2503: 2009). Esto pudo haber restado resistencia a la matriz encapsulante y como consecuencia causar un ineficiente encapsulado. Para la ejecución de este ensayo se procedió de la siguiente manera:

- Se colocaron 3 g de vidrio pulverizado junto con 100 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer de 250 ml de capacidad.
- Se colocó esta mezcla sobre una plancha de agitación a velocidad constante, durante una hora.
- En el espectrofotómetro (HACH ) se seleccionó el programa *680 Sulfate*, el cual está señalado para la determinación de radicales sulfato.
- Se colocaron 10 ml de la muestra en una celda que se utilizaría como blanco y se insertó en el espectrofotómetro para encerrar el equipo.
- Se llenó otra celda con otros 10 ml de la mezcla en la cual se disolvió el contenido de un sobre de reactivo *Sulfaver 4* y se agitó vigorosamente la celda hasta disolver el reactivo.
- Se insertó la celda en el espectrofotómetro y se midió la concentración de sulfatos.
- Se realizó un duplicado y se repitió este paso con las muestras de ceniza y plástico de minería.

### 2.4 Cuantificación de metales pesados existentes en los residuos peligrosos

Materiales	Equipos
-Residuos de ceniza de fondo de cámara de combustión	-Balanza

-vidrio de ampollitas y perfumes  
-Plástico usado en minería  
-Ácido nítrico  
-Viales  
-Agua destilada  
-Papel filtro

-Espectrofotómetro  
-Digestor HACH

### **Procedimiento**

La cuantificación de los metales presentes en cada una de las muestras, requirió de una digestión ácida para ser analizadas en líquido en un espectrofotómetro de Absorción Atómica. Se ejecutó el método ICP o Digestión por ácido nítrico/perclórico (NIOSH, 2003, p.1-3) sin utilizar ácido perclórico debido a que podía dañar el equipo. Se procedió de la siguiente manera:

- Se tomaron 0,25 g de la muestra pulverizada de vidrio de perfumes y ampollitas.
- Se colocó esta cantidad dentro de un vial de 10 ml de volumen y se añadieron 5 ml de ácido nítrico al 68%.
- Se tapó bien el vial y se homogenizó la mezcla.
- Se agregaron 5 ml de este ácido en otro vial el cual serviría de blanco.
- Se colocó el vial en un digestor (marca HACH, modelo DRB 200) y se programó el mismo a una temperatura de 150 °C durante un tiempo de 30 minutos.
- Transcurrido este tiempo se dejaron enfriar los viales.
- Se filtró el digestado a través de un papel de filtro cualitativo (membrana de celulosa) con un diámetro de poro de 11  $\mu\text{m}$ .
- Se agregaron 40 ml de agua destilada para facilitar el proceso de filtración y finalmente se aforó a 150 ml que fue la cantidad mínima requerida para ser leída en el espectrómetro.
- Se repitió este procedimiento para las muestras de plástico de minería y ceniza de incinerador.
- Finalmente, para cada metal pesado se reportaron los resultados en mg/kg en base seca.

### 3. ELABORACIÓN DE LA MATRIZ DE ENCAPSULAMIENTO

#### 3.1 Dosificación de cilindros de hormigón

**Tabla 1.** Condiciones de dosificación de los materiales utilizados para la formación de hormigón.

<b>CONDICIONES DE DOSIFICACIÓN <math>f'c = 24</math> MPa</b>		
<b>Condiciones ambientales</b>	<b>Materiales</b>	<b>Inclusión de aire y aditivos</b>
Temperatura: 17 °C Humedad: 30 %	Agregados: Arena: Pifo-ripio Ripio: Holcim Cemento: Armaduro Tamaño máximo nominal: 3/4" (19 mm) Estado: seco	Sin inyección de aire Sin aditivo Asentamiento: 75-100 mm

La dosificación para la elaboración de 4 cilindros de tamaño estándar junto con un blanco, fue realizada según la Norma ACI 211.1-91 Práctica Estándar para la Selección de Proporciones para Hormigón Pesado Normal y en Masa y reaprovado en 1997 (ACI, 1997), y entregada por el LEMSUR en el respectivo informe ubicado en el Anexo II, Figura II.5. Conforme a dicha norma se realizó el ensayo del cono de Abrams a continuación:

**Tabla 2.** Dosificación requerida para la elaboración de los cilindros de prueba.

<b>Constituyentes</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Proporción en peso</b>
Agua	1,88	0,65
Cemento	2,84	1,00
Arena	6,08	2,08
Ripio	5,52	1,91

#### Ensayo del cono de Abrams

##### Materiales

- -Agregado fino
- -Agregado grueso
- -Agua
- -Cono de Abrams
- -Cinta métrica



## Procedimiento

Este ensayo tiene por objetivo medir la consistencia y el aspecto de un hormigón recién formado. Este ensayo fue realizado según lo estipulado en la Norma ASTM C143/C143M-20 Método de prueba estándar para el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico, (ASTM, 2020).

Se procedió de la siguiente manera:

- Se mezclaron los materiales junto con el agua y una vez formada la mezcla se midió la temperatura.
- En el cono de Abrams (molde cónico truncado de acero) se colocó el hormigón hasta llenar el cono.
- Se compactó la mezcla dejándole caer una varilla en algunas ocasiones.
- Se alzó el cono y el hormigón se hundió un poco y en ese instante se midió la distancia entre la parte superior del cono y el hundimiento en el centro del cuerpo, se registró este valor.

### 3.2 Fundición de los cilindros de hormigón

- Luego del ensayo del cono de Abrams, se engrasó los moldes cilíndricos.
- Se procedió a llenar cada uno de los 4 moldes con la mezcla de hormigón.
- Se introdujo la varilla para que se compacte un poco y se los dejó fraguar hasta el siguiente día.
- Una vez fraguados los cilindros se los depositó en una bañera con agua para que se llevara a cabo el proceso de curado por 7 días.

### 3.3 Compresión de los cilindros de hormigón

Una vez transcurridos los 7 días de curado, los 4 cilindros de prueba estuvieron listos y se midieron el diámetro, área y peso de cada uno antes de ser sometidos a la prueba de compresión. En este ensayo el objetivo fue determinar si la estructura de los mismos alcanzaría la resistencia especificada ( $210 \text{ kg/cm}^2$ ) para los que fueron diseñados, como se encuentra estipulado en la Norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021) mencionada anteriormente.

Para esto se utilizó una máquina universal de prueba o máquina multiensayos de marca SHIMADZU y con capacidad 500 kN en la cual se ubicó el cilindro un cabezal cilíndrico que sujetó al espécimen en la parte inferior, y en la parte superior fue aplicada una fuerza que se

incrementó de forma progresiva hasta que el cilindro mostrará algún tipo de falla (despostillado o partido), momento en el cual se detuvo la fuerza de compresión. El equipo ejerce una fuerza a través de las placas circulares las cuales son accionadas con una mordaza o rodillo hidráulico. Estas cargas controladas son registradas en un ordenador en el cual se grafica la deformación y la carga cuando el equipo detecta el momento en que se da una deformación o ruptura.

#### 4. ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES CÚBICOS DE HORMIGÓN CON LOS RESIDUOS PELIGROSOS ENCAPSULADOS

##### 2.9. Menús de encapsulamiento

Conocida la dosificación del hormigón y con la disposición de los residuos reducidos de tamaño (a excepción de las pilas), se generaron cuatro menús en los que se reemplazaría parte del agregado fino por los tres residuos peligrosos debido al tamaño similar de sus partículas, y, las pilas y baterías serían encapsuladas enteras en el centro de cada cubo de hormigón de 15 cm<sup>2</sup> de arista.

**Tabla 3.** Tamaño de partícula requerido de los residuos peligrosos utilizados.

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Tamaño requerido</b>
Plástico usado en minería	Pedazos pequeños < 1 cm
Ceniza de fondo de cámara de combustión	Material pulverizado
Pilas de una sola vida	Unidades sin fraccionar
Frascos de perfumes y vidrio de ampollitas	Vidrio triturado

**Tabla 4.** Porcentajes y pesos requeridos para cada uno de los materiales de encapsulamiento en las proporciones 5%, 10%, 15% y 20%.

			Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3		Dosificación 4	
Componentes del hormigón	Residuos peligrosos	Proporción residuos (%)	Proporción total (%)	Peso (kg)	Proporción total (%)	Peso (kg)	Proporción total (%)	Peso (kg)	Proporción total (%)	Peso (kg)
<b>Arena</b>	Ceniza de fondo de cámara de combustión.	50	<b>5</b>	0,469	<b>10</b>	0,939	<b>15</b>	1,409	<b>20</b>	1,878
	Frascos de vidrio de perfumes y ampollitas	49								
	Plástico usado en minería	1								
	Arena									
<b>Ripio</b>			31,94	8,92	26,94	8,45	21,94	7,98	16,94	7,51
<b>Cemento</b>			33,8	8,59	33,8	8,59	33,8	8,59	33,8	8,59
<b>Agua</b>			17,74	4,51	17,74	4,51	17,74	4,51	17,74	4,51
			11,52	2,93	11,52	2,93	11,52	2,93	11,52	2,93
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>	<b>100</b>	<b>25,42</b>	<b>100</b>	<b>25,42</b>	<b>100</b>	<b>25,42</b>	<b>100</b>	<b>25,42</b>

## 4.2 Fundición de cubos de hormigón con los residuos peligrosos encapsulados

Una vez establecidos las cuatro dosificaciones: 5%, 10%, 15% y 20%, se planificó elaborar tres cubos de hormigón con cada dosificación y tres blancos (sin residuos peligrosos encapsulados), disponiendo de un total de 14 muestras cúbicas con residuos peligrosos encapsulados. En cuanto al número de muestras de este tipo que se desee elaborar no existe una normativa específica, y el número estuvo en función del ensayo de compresión y de lixiviación, para los que se destinaron 1 muestra para compresión y 2 muestras para el ensayo de lixiviación.

- Se pesó cada uno de los materiales para formar el hormigón.
- Se agregaron los residuos peligrosos pulverizados y reducidos de tamaño en el centro de la mezcla de hormigón y se removió hasta que los residuos se distribuyan de forma homogénea por toda la mezcla. Este paso se realizó con cada una de las dosificaciones.
- Se colocó la mezcla hasta la mitad de los moldes en el encofrado (diseñado con las medidas específicas para generar los cubos de arista de 15 cm<sup>2</sup>) y en ese momento se ubicaron en el centro cada tipo de pilas apiladas.
- Se recubrió a las pilas con el resto de la mezcla hasta llenar el molde.
- Una vez fundidos las muestras cúbicas, se dejó fraguar el hormigón por 24 horas.
- Al siguiente día se procedió con el desencofrado de los cubos.
- Finalmente fueron depositados en la bañera para proceder con el curado por 7 días.

## 4.3 Compresión de las muestras cúbicas con los residuos peligrosos encapsulados

El objetivo del ensayo de compresión sobre los cubos de hormigón con material encapsulado fue determinar la resistencia que presentan estos en cada dosificación, la cual no debería ser menor a 210 kg/cm<sup>2</sup> según lo estipulado en la Norma Técnica NCH 1037 (Ministerio de Urbanismo y vivienda de Chile, 2019) pues superior a este valor la estructura del hormigón es muy compacta lo que significa menor capacidad de infiltración. Se procedió de la siguiente manera:

- Se midieron las dimensiones de cada uno de los cubos con un calibrador electrónico, para el cálculo del área de los mismos.
- Se realizó el ensayo en la misma máquina universal de prueba que se utilizó para los cilindros de hormigón.
- Se midió la resistencia de un solo ejemplar de cada dosificación, iniciando por el de menor reemplazo de residuos y continuando en forma ascendente: 5%, 10%, 15% y 20%.

## 5. ENSAYO DE LIXIVIACIÓN

### 5.1 Determinación de la humedad

## Materiales

- -Cubos de hormigón con el material encapsulado
- -Horno
- -Desecadores
- -Balanza
- Medidor multiparámetros

## Procedimiento

Se consideró el Método de prueba 1315 de la EPA denominado “Tasas de transferencia de masa de constituyentes en materiales granulares monolíticos o compactados mediante un procedimiento de lixiviación en un tanque semidinámico”.

Para la ejecución de este ensayo se tomó en cuenta el estándar ASTM D2216-19 Métodos de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas por masa (American Society for Testing and Materials, 2022), para lo cual se procedió de la siguiente manera:

- Después de transcurrido el tiempo de curado (7 días), se secó el exterior de los especímenes o cubos con los residuos peligrosos encapsulados de 5%, 10%, 15% y 20% de reemplazo, más un blanco.
- Se midió el peso de cada uno de los especímenes después de secarse exteriormente y se rotularon para su respectiva identificación. Se registró este valor.
- Se colocaron los cubos en un horno (Marca BIOBASE) por 24 horas a una temperatura de 110 °C para eliminar la humedad.
- Transcurrido este tiempo, se retiraron los cubos del horno con la ayuda de un par de guantes, luego se colocó cada uno en un desecador y se tapó herméticamente. Se dejó enfriar por el lapso de 12 horas a temperatura ambiente.
- Una vez fríos las muestras, se midió la masa de cada uno de ellos y se registró el valor.
- Se determinó el contenido de agua al restar la masa de cada espécimen antes de ser secado, de la masa de los especímenes después de haber sido secados y enfriados, se registraron estos datos.
- Se realizó un duplicado para cada espécimen a excepción del blanco del cual se ensayo uno solo, en total se ensayaron 9 cubos.

## 5.2 Ensayo de lixiviación

### Materiales

- -Balde
- -Soportes de PVC
- -Cubos de hormigón
- -Agua destilada
- -Film plástico
- -Medidor multiparámetros

### Procedimiento

Se aplicó este ensayo sobre los cubos con el objetivo de determinar la probable salida de los metales pesados (descritos en la Tabla 2.4) contenidos en los residuos peligrosos encapsulados, a través de la matriz sólida (hormigón). Esto, al haber estado en contacto continuo con agua destilada (eluyente) en un tanque semidinámico que simuló condiciones medioambientales.

- Las muestras a ensayar corresponden a los cubos, los cuales corresponden a un material monolítico o sólido compacto de una sola pieza por lo que no fue necesario aplicarle más compactación (EPA, 2017).
- Se lavaron los baldes con ácido perclórico y se enjuagaron tres veces con agua destilada.
- Se colocó en el fondo de cada balde un cilindro de PVC de 5 cm de altura el cual hizo el papel de soporte de la muestra, y que por su geometría hueca permitió que la muestra esté en contacto con el agua destilada en un 98% (EPA 2017).
- Se colocó en el interior de un balde sobre el soporte, el cubo con la dosificación del 5%, en otro balde el de 10%, en otro el de 15%, en otro el de 20% y en otro balde el blanco. Se procuró que el espacio entre la pared del balde y del cubo sea de al menos 2 cm, así mismo la distancia vertical entre la parte superior del balde y la parte superior del cubo fue de 5 cm.
- Se llenó completamente cada uno de los baldes con agua destilada.
- Se rotuló cada balde o sistema de lixiviación.
- Se midió el potencial hidrógeno y la conductividad eléctrica de cada sistema y se registraron estos valores.
- Se cubrió herméticamente la parte superior de cada balde con el film plástico para reducir la pérdida de agua a la atmosfera por evaporación.
- Se realizó un duplicado para cada una de las dosificaciones, lo que dio un total de 9 sistemas conformados.
- Para este ensayo no se cambió el eluyente o agua destilada, sino que se lo conservó durante todos los intervalos de tiempo

- Se midió el potencial hidrógeno y la conductividad eléctrica de cada uno de los sistemas en 8 intervalos de tiempo de 15 días, y se registraron los valores para la respectiva tabulación.
- Después de cada medición, se tapó herméticamente la superficie del balde

### 5.3 Análisis de concentraciones de metales pesados en los lixiviados de las muestras cúbicas

Una vez completados los 8 intervalos de 15 días, se filtró el eluyente de cada uno de los 9 sistemas de lixiviación. Se utilizó un papel de filtro cualitativo de 11  $\mu\text{m}$  y se recogieron 200 ml de muestra de cada uno de los sistemas: 2 muestras para la dosificación de 5%, 2 muestras para 10%, 2 para 15 %, 2 muestras para 20 % y una muestra para el blanco.

Estas muestras fueron analizadas en un espectrofotómetro de Absorción Atómica para la respectiva cuantificación de los metales pesados en cuestión.

## RESULTADOS

**Tabla 5.** Dosificación requerida para la elaboración de los cilindros de prueba.

Material	Proporción para 4 cilindros (kg)	Proporción en peso	Proporción en volumen
Agua	1,88	0,65	0,58
Cemento	2,84	1	1
Agregado fino	6,08	2,08	1,19
Agregado grueso	5,52	1,91	1,36

**Tabla 6.** Valores obtenidos en la compresión de las muestras cúbicas con R.P.E.

No.	Dosificación	Edad (días)	Área ( $\text{mm}^2$ )	Peso específico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)		Resistencia ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	
						Cúbica	Cilíndrica	Cúbica	Cilíndrica
1	5%	7	22896	2162	462,2	20,2	17,2	205.98	175.39
2	10%	7	23076	2130	405,7	17,6	14,9	179.47	151.94
3	15%	7	22880	2156	449,1	19,6	16,7	199.86	170.29
4	20%	7	22652	2137	384,2	17,0	14,4	173.35	146.84
5	BLANCO	7	11002	2187	235,7	21,4	18,2	218.22	185.59

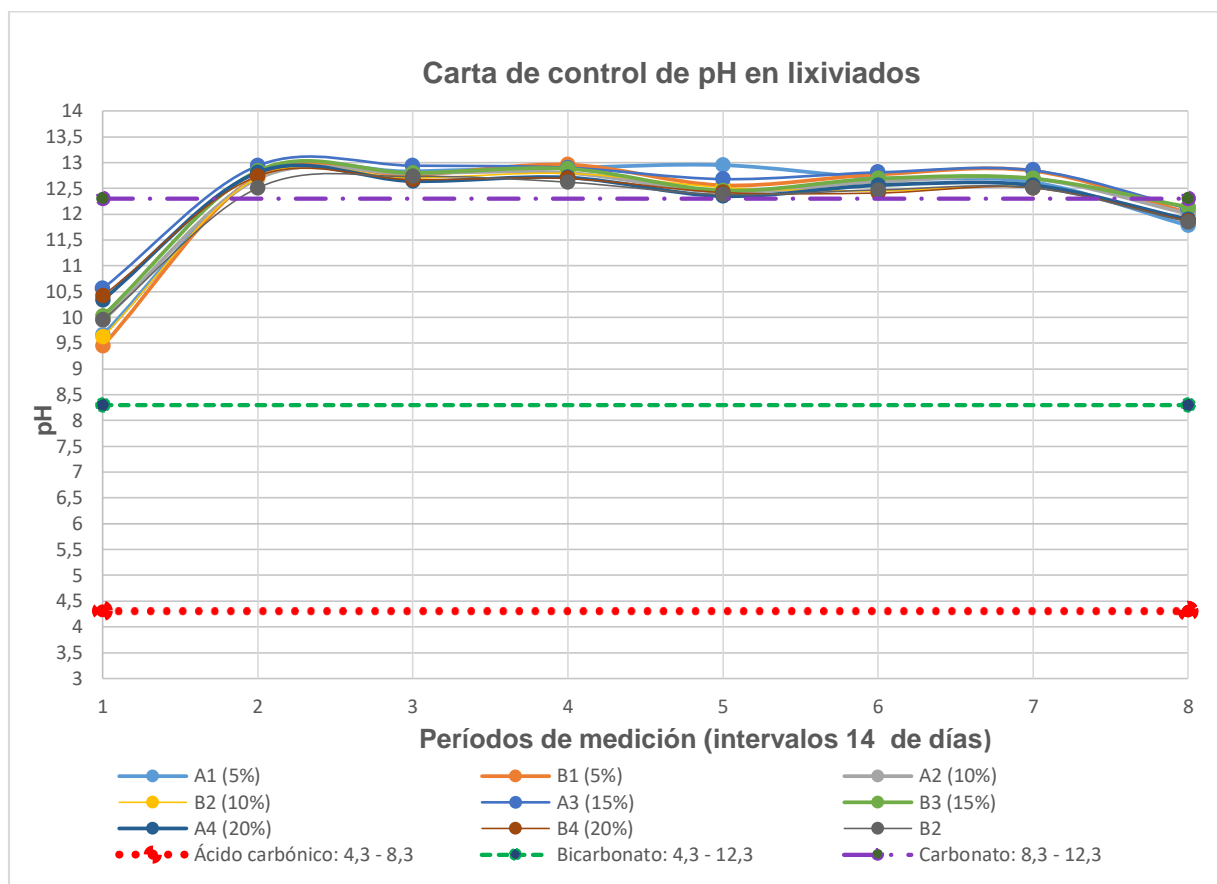
**Tabla 7.** Concentración de metales pesados existentes en la muestras de R.P. comparados con los límites máximos permisibles en base seca de la Ordenanza Metropolitana No.404.

Muestra de Residuo peligroso	Parámetro	Concentración de metales pesados en base húmeda (mg/L)	Concentración de metales pesados en base seca (mg/Kg)	LMP O.M. No.404 (mg/kg)	Comparación de valores
<b>M1</b> <b>Ceniza de incinerador</b>	Cd	0,02	3,911	85	Cumple
	Pb	0,37	72,350	4300	Cumple
	Ni	0,64	125,147	57	Excede
	Zn	4,50	879,937	420	Excede
	Cr	0,61	119,280	3000	Cumple
	As	1,06	207,274	75	Excede
	Hg	2,5 µg/L	0,4889	840	Cumple
<b>M4</b> <b>Vidrio de ampollitas y perfumes</b>	Cr	0,03	5,955	3000	Cumple
	Mn	0,35	69,472	NN	-
<b>M5</b> <b>Plástico usado en minería</b>	Cd	0,01	1,957	85	Cumple
	Pb	10,78	2109,589	4300	Cumple
	Ni	0,25	48,924	57	Cumple
	Zn	0,15	29,354	420	Cumple
	Cr	2,73	534,247	3000	Cumple
	As	No detectable	-	75	-
	Hg	12,2 ug/L	2,3875	840	Cumple

LMP: límite máximo permisible ; NN: no normado; OM: Ordenanza Municipal  
 Escala de color: naranja (no cumple); verde(cumple)  
 (-) valor no determinado

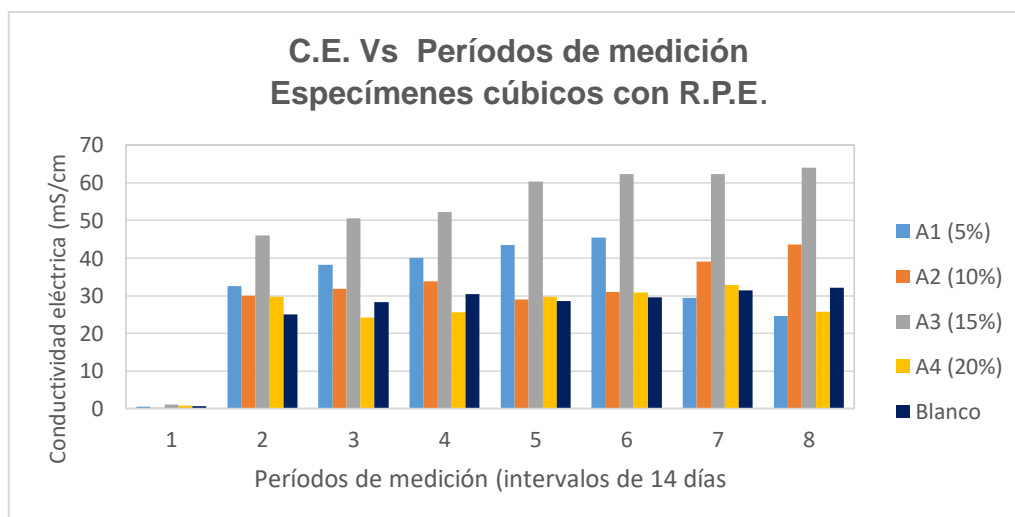


## Resultados del control de pH en los lixiviados

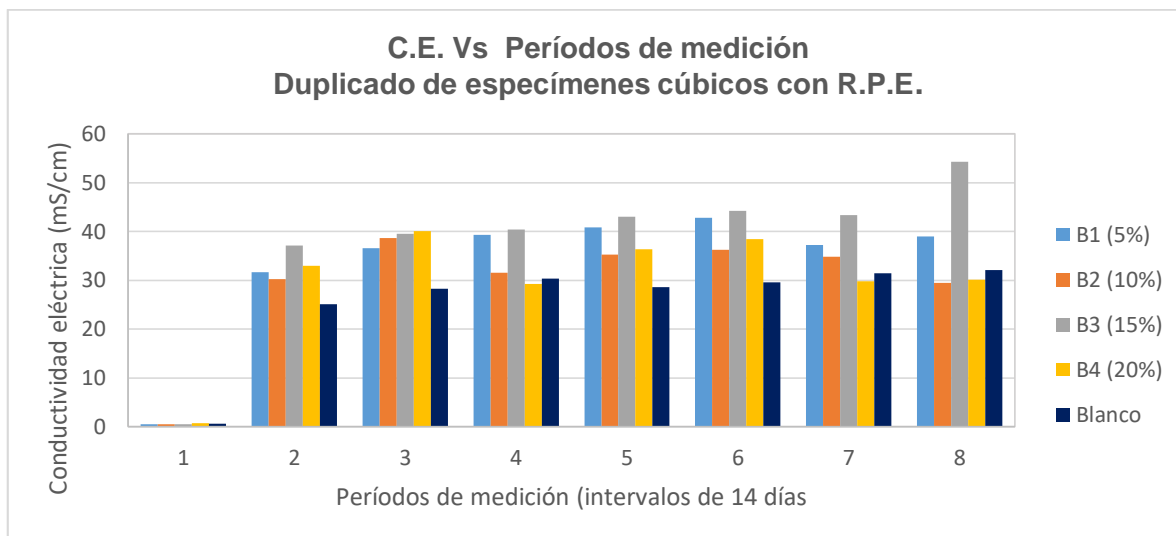


**Figura 1.** pH presentado en los especímenes cúbicos con las diferentes dosificaciones y en sus duplicados durante el tiempo de lixiviación

En la Figura 1, se midió el pH de los lixiviados en 8 intervalos de 14 días, y se pudo establecer en todas las muestras cúbicas un rango de 12 a 12,98, experimentando la zona de carbonatos y bicarbonatos, existe ausencia de producción de  $\text{CO}_2$  y por tanto están ausentes procesos de solubilidad y oxidación.



**Figura 2.** C.E. en función de los períodos de medición.



**Figura 3.** C.E. en función de los períodos de medición en los duplicados.

En las Figuras 2 y 3 se observa el control de la conductividad eléctrica (CE) en el agua de lixiviado de las muestras cúbicas, el blanco y sus duplicados, la muestra A3 (15%) alcanzó el mayor valor de conductividad de 56 mS/cm después de los 8 intervalos de tiempo. El resto de muestras mantuvieron un CE de entre 30 a 40 mS/cm.

**Tabla 8.** Concentraciones de los contaminantes en el agua del lixiviado

Muestras de Lixiviados	Cd LMP (1,0mg/L)	Cr LMP (5,0 mg/L)		Pb LMP (5,0 mg/L)		Ni LMP (NN)		Zn LMP (NN)	Mn LMP (NN)	As LMP (5,0 mg/L)	Hg LMP (0,2 mg/L)	Cumple	
		0,01	Pro-medio	0,02	Pro-medio	ND	Pro-medio						ND
Blanco	ND	0,01	Pro-medio	0,02	Pro-medio	ND	Pro-medio	ND	ND	Pro-medio	ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.									
A1 (5%)	ND	0,06	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	ND	ND		ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.	Inf.		Inf.	Inf.	Inf.
B1 (5%)	ND	0,02	0,04	0,03	0,03	0,01		ND	ND		ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.			Inf.		
A2 (10%)	ND	0,03	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	ND	0,01	0,01	ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.	Inf.		Inf.	Inf.	Inf.
B2 (10%)	ND	0,08	0,06	0,03	0,03	0,02		ND	0,01		ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.			Inf.		
A3 (15%)	ND	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,02	ND	0,02	0,02	ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.	Inf.		Inf.	Inf.	Inf.
B3 (15%)	ND	0,02	0,03	0,06	0,03	0,02		ND	0,02		ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.			Inf.		
A4 (20%)	ND	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	ND	0,02	0,03	ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.	Inf.		Inf.	Inf.	Inf.
B4 (20%)	ND	0,05	0,05	0,04	0,04	0,01		ND	0,03		ND	ND	Sí
		Inf.		Inf.		Inf.		Inf.			Inf.		

**Tabla 3.18** Cumplimiento de parámetros de los especímenes cúbicos con R.P encapsulados.

Muestras de Lixiviados	O.M. N0.404	O.M. N0.404 suelos		Bibliografía Agua subterránea	
	LMP Extracto PECT	pH (6-8)	C.E. (200 mS/cm)	pH (7-8)	C.E. (0,1 a 2 mS/cm)
Blanco	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
A1 (5%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
B1 (5%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
A2 (10%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
B2 (10%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
A3 (15%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
B3 (15%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
A4 (20%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
B4 (20%)	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- El menú más apropiado que se obtuvo de los diferentes porcentajes de reemplazo del agregado fino por los residuos peligrosos, fue el de 15 % , ya que encapsuló la mayor cantidad de estos 1,550 kg más los 0,440 kg de las pilas, y al mismo tiempo el material encapsulante obtuvo una resistencia a la compresión de 199,98 kg/cm<sup>2</sup> cercana al valor referencial de 210 kg/cm<sup>2</sup>, en cuyo valor se reducen los procesos de lixiviación de contaminantes hacia el exterior.
- Los 4 menús propuestos presentaron un encapsulado eficiente de los contaminantes

presentes en los residuos peligrosos seleccionados, debido a la ausencia y baja concentración de estos. Fueron comparadas con los límites máximos permisibles establecidos en la O.M. No,404 bajo la cual el Cr presentó una concentración de 0,05 mg/L muy por debajo de los 5,0 mg/L normados; el As, Hg y Cd estuvieron ausentes y el Ni, Zn y Mn estuvieron en bajas concentraciones a pesar de no estar normados.

- Los cuatro menús de encapsulamiento se elaboraron en base a la máxima cantidad de agregado fino que se podía reemplazar (20%) y de este se dividió en tres proporciones para los tres residuos peligrosos conforme a la favorabilidad de su estructura, en donde la ceniza representó un 50%, los vidrios molidos de ampollitas y perfumes fueron en un 49% y la lona en un 1%.
- Se pudo concluir que una alta resistencia a la compresión por parte del hormigón, le confirió ser más compacto, reducir procesos de infiltración y difusión lo que se pudo comprobar con las mínimas concentraciones de metales pesados en el agua de lixiviado después de 112 días de ensayo.
- Los valores de potencial hidrogeno que se presentaron en el lixiviado de todas las muestras son altos y para el único recurso en donde está normado el pH y conductividad eléctrica, que es el suelo el pH fue 12,6 siendo un ambiente muy alcalino, lo que puede generar una concentración excesiva de carbonatos en los suelos. No obstante, para el parámetro de la conductividad eléctrica, el mayor valor obtenido en los lixiviados de 60 mS/cm, fue muy inferior al valor establecido de 200 mS/cm, por lo que si cumplió con este parámetro. En el caso del agua subterránea no se encuentran normados estos dos parámetros, pero según García (2012) debe encontrarse entre 7 a 8 y ninguno de los valores obtenidos en los lixiviados cumplen con las condiciones de equilibrio en la que debe permanecer el suelo y el agua subterránea.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar las mismas pruebas de calidad que se realiza a los agregados y cemento a los residuos peligrosos a encapsular, para determinar mayores características que los residuos puedan otorgar a la estructura de la matriz encapsulante.
- Ampliar el análisis de pH y de conductividad eléctrica y de cómo estos pueden afectar no

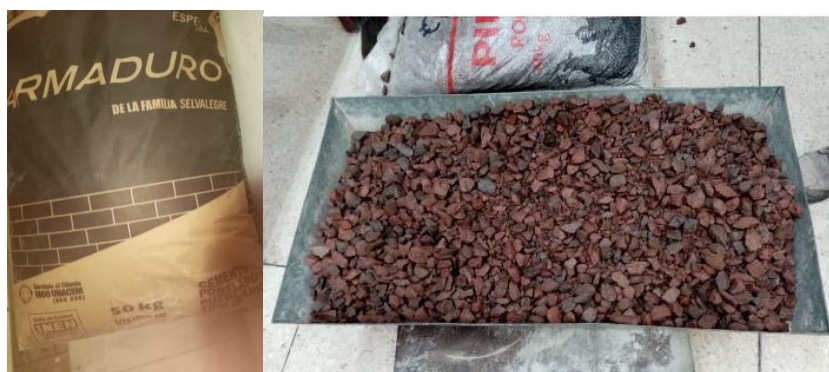
solamente al hormigón como matriz encapsulante, sino también a los contaminantes presentes en los residuos peligrosos.

- Se recomienda extender el tiempo de prueba del proceso de lixiviación a los 9 períodos de 14 días como está estipulado en el Método 1315 (EPA, 2013), y así comprobar la eficiencia del encapsulamiento de residuos peligrosos al utilizar como matriz encapsulante hormigón de resistencia  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

## REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Figura 4** Residuos peligrosos a ser encapsulados.



**Figura 5.** Componentes del hormigón



**Figura 6.** Formación de la mezcla de hormigón con residuos peligrosos



**Figura 7.** Encapsulamiento de las pilas y baterías



**Figura 8.** Desencofrado de los cubos de hormigón con residuo encapsulado.



**Figura 9.** Curado de los cubos de hormigón con residuo encapsulado.



**Figura 10.** Cubos de hormigón con daño luego de la compresión.



**Figura 11.** Secado de los cubos y determinación del peso



**Figura 12.** Preparación del sistema de lixiviación para cada dosificación y su duplicado.



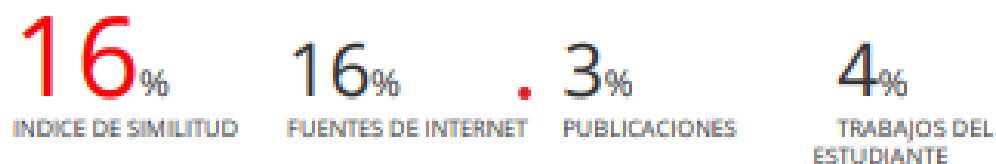
**Figura 13.** Envasado de las muestras de lixiviado junto con su duplicado.



## ANEXO VIII: INFORME Y CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Tic-V.Atahualpa

INFORME DE ORIGINALIDAD



ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

6%

★ hdl.handle.net

Fuente de internet

Excluir citas    Activo

Excluir bibliografía    Activo

Excluir coincidencias    Apagado

## CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Quito,D.M. 28 de agosto de 2023

De mi consideración:

Yo, Lucía Margarita Montenegro Aguas en calidad de Director del Trabajo de Integración Curricular titulado **“Encapsulamiento de vidrios de luminarias, vidrios de frascos vacíos de perfume y ampollitas, escorias de incineración y cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas por el proceso de incineración”** elaborado por la estudiante Verónica Jacqueline Atahualpa Moreta con cédula de identidad: 1718292335 de la carrera de Ingeniería ambiental certifico que he empleado la herramienta Turnitin para la revisión de originalidad del documento escrito completo, producto del Trabajo de Integración Curricular indicado.

El documento escrito tiene un índice de similitud del **16%**

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso del presente documento para los trámites de titulación.

NOTA: Se adjunta el informe generado por la herramienta Turnitin.

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
**MSc. Lucía Montenegro A.**  
Directora de Trabajo de Integración Curricular  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental