

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ENCAPSULAMIENTO DE VIDRIOS DE LUMINARIAS, ESCORIAS  
DE INCINERACIÓN Y CENIZAS DE FONDO DE LA CÁMARA DE  
COMBUSTIÓN GENERADAS POR EL PROCESO DE  
INCINERACIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO/A  
AMBIENTAL**

**NICOLE MICAELA MALES ÑACATO**

**nicole.males@epn.edu.ec**

**DIRECTORA: Lucía Margarita Montenegro Aguas**

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

**DMQ, AGOSTO DE 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Nicole Micaela Males Ñacato 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.

---

**Nicole Micaela Males Ñacato**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Nicole Micaela Males Ñacato, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Lucía Montenegro A. MSc.**

## **AUSPICIO**

El presente trabajo de titulación contó con el auspicio financiero de la empresa 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”.

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) 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.

Nicole Micaela Males Ñacato

MSc. Lucía Margarita Montenegro Aguas

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi hijo: Leonel Martin por enseñarme a abrazar la vida y a encontrar la belleza en todo momento. A mi mami Martha y mi papi Alberto por enseñarme y demostrarme que el esfuerzo es el mejor camino hacia cumplir mis metas, por su ayuda para poder seguir adelante y su ejemplo constante. A mi hermana Daniela por ser mi compañera y ejemplo de que los sueños se cumplen.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Politécnica Nacional y Hazwat por la apertura y facilidades para la ejecución del presente trabajo. A mi tutora MSc. Lucía Montenegro por su acompañamiento, predisposición, enseñanzas y sobre todo su ejemplo de fortaleza y honestidad.

Al Ing. Nicolay Yanchapanta por sus valiosos conocimientos y aportes durante el desarrollo de este trabajo. Al Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) por su predisposición y acompañamiento en el aprendizaje de nuevos conocimientos, especialmente al Ing. Francisco Guzmán e Ing. Gabriel Merino por su apoyo y enseñanzas a lo largo de la ejecución de ensayos.

Al Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) por su apoyo incondicional, especialmente al Ing. Jairo Jimpikit y al Ing. Richard Puente quienes con su apoyo y conocimientos colaboraron para que el trabajo pueda ser desarrollado.

A mis padres (Martha y Alberto) por siempre estar para mi apoyándome cuando más lo necesitaba, y por ser mi ejemplo de lucha.

A mi hermana por ser mi felicidad y mantenerme animada en todo momento.

A Verito Atahualpa por ser mi compañera de fórmula y acompañarme en este camino.

A Domi, por ser mi amiga incondicional y demostrarme que puedes lograr todo lo que te propongas.

## ÍNDICE

CERTIFICACIONES.....	i
AUSPICIO .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general .....	4
1.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Alcance .....	4
1.4 Marco teórico .....	7
1.4.1 Antecedentes.....	7
1.4.2 Residuos peligrosos .....	8
1.4.3 Gestión de residuos peligrosos.....	9
1.4.4 Residuos peligrosos utilizados en el proyecto .....	9
1.4.5 Vidrio triturado (ampollas de inyecciones y frascos de perfumes)....	15
1.4.6 Normativa nacional aplicable para la disposición final de residuos peligrosos .....	17
1.4.7 Encapsulamiento de desechos peligrosos.....	18
1.4.8 Técnicas de encapsulamiento .....	19
1.4.9 Tecnología de encapsulamiento de residuos peligrosos .....	22
1.4.10 El hormigón como reactivo aglomerante para el encapsulamiento de residuos peligrosos.....	22
1.4.11 Cemento como principal agente en el encapsulamiento de residuos	23
1.4.12 Agregados como principal fuente de sustitución de materiales de construcción por residuos peligrosos.....	23

1.4.13	Ensayo de lixiviación como medio de evaluación de la eficacia del encapsulamiento de residuos peligrosos .....	24
1.4.14	Método EPA 1315.....	25
1.4.15	Influencia del pH en la compactación de residuos peligrosos .....	25
<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
2.1	Área de estudio .....	27
2.2	Muestreo de residuos peligrosos .....	27
2.3	Análisis físicos de agregados y cemento .....	27
2.3.1	Análisis físicos de agregado grueso (ripió).....	28
2.3.2	Análisis físicos al agregado fino (arena).....	35
2.3.3	Análisis físicos del cemento.....	39
2.4	Análisis físicos a los residuos peligrosos .....	41
2.4.1	Homogenización de muestras .....	41
2.4.2	Medición de pH a las muestras.....	41
2.4.3	Ensayo de contenido de humedad en residuos peligrosos.....	41
2.4.4	Ensayo de sulfatos en residuos peligrosos.....	43
2.5	Caracterización inicial de metales pesados presentes en los residuos... ..	44
2.6	Encapsulamiento de residuos peligrosos .....	45
2.6.1	Dosificación del hormigón madre.....	46
2.6.2	Dosificación de menús de encapsulamiento.....	46
2.6.3	Fundición de cubos de encapsulamiento.....	48
2.7	Pruebas mecánicas en cubos de encapsulamiento .....	49
2.8	Ensayo de lixiviación .....	50
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>51</b>
3.1	Residuos para encapsulamiento .....	51
3.2	Resultados de la caracterización de análisis de agregados y cemento ..	52
3.2.1	Análisis físicos de agregado grueso (ripió).....	52
3.2.2	Análisis físicos de agregado fino (arena).....	55
3.2.3	Análisis físicos del cemento.....	58
3.3	Resultados de análisis físicos a residuos peligrosos .....	59
3.3.1	Determinación de pH en residuos peligrosos .....	59
3.3.2	Determinación de contenido de sulfatos residuos peligrosos .....	61



3.4	Caracterización inicial de metales pesados presentes en residuos peligrosos.....	61
3.5	Encapsulamiento de residuos peligrosos.....	63
3.5.1	Dosificación del hormigón madre.....	63
3.5.2	Dosificación de menús de encapsulamiento.....	64
3.5.3	Resultados de ensayo de lixiviación.....	66
4.	<b>Conclusiones</b> .....	74
5.	<b>Recomendaciones</b> .....	76
6.	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	77
7.	<b>ANEXOS</b> .....	82
	ANEXO 1 .....	83
	Análisis Turnitin porcentaje máximo 12% .....	83
	ANEXO 2 .....	85
	Manual de encapsulamiento de luminarias, ceniza de fondo de cámara de combustión, escorias de fundición y vidrio triturado (ampolletas, frascos vacíos de perfume) para Hazwat .....	85
	ANEXO 3 .....	91
	Propiedades físicas de los materiales .....	91
	ANEXO 4 .....	93
	Análisis granulométrico agregado grueso.....	93
	ANEXO 5 .....	95
	Ensayo de abrasión .....	95
	ANEXO 6 .....	97
	Análisis granulométrico agregado fino.....	97
	ANEXO 7 .....	99
	Resultados de análisis de espectrofotometría de absorción atómica (metales pesados).....	99
	ANEXO 8 .....	101
	Dosificación de hormigones.....	101
	ANEXO 9 .....	103
	Compresión de cilindros de hormigón .....	103
	ANEXO 10 .....	105
	Compresión cúbica de hormigón .....	105

ANEXO 11 .....	107
Resultados de control de pH y conductividad en agua de lixiviación .....	107
ANEXO 12 .....	109
Resultados de absorción atómica en lixiviados .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de generación de residuos a nivel mundial .....	1
<b>Figura 2.</b> Ubicación centro de Remediación Ambiental .....	5
<b>Figura 3.</b> Esquema de gestión de desechos peligrosos .....	9
<b>Figura 4.</b> Destrucción de luminarias .....	10
<b>Figura 6.</b> Funcionamiento de un diodo LED .....	11
<b>Figura 7.</b> Funcionamiento de lámpara fluorescente recta.....	12
<b>Figura 8.</b> Funcionamiento de un foco ahorrador.....	13
<b>Figura 9.</b> Cenizas de fondo de cámara de combustión generadas por el proceso de incineración .....	14
<b>Figura 10.</b> Escorias de incineración.....	15
<b>Figura 11.</b> Mezcla de vidrio triturado .....	16
<b>Figura 12.</b> Trituradora de vidrio de Hazwat.....	17
<b>Figura 13.</b> Mortero compuesto de conglomerantes inorgánicos agregados (desechos).....	20
<b>Figura 14.</b> Bloques de microencapsulación.....	20
<b>Figura 15.</b> Adición de compuestos químicos para estabilización de residuos .....	21
<b>Figura 16.</b> Equilibrio entre las formas carbonatadas $CO_2/HCO_3^-/CO_3^{2-}$ – en función del pH. ....	26
<b>Figura 17.</b> Recipiente cilíndrico de acero utilizado en el ensayo .....	32
<b>Figura 18.</b> Condición SSS .....	36
<b>Figura 19.</b> Escala colorimétrica utilizada para el ensayo.....	39
<b>Figura 20.</b> Fundición de testigos de hormigón.....	46
<b>Figura 21.</b> Cámara de curado.....	48
<b>Figura 22.</b> Ensayo de compresión .....	49
<b>Figura 23.</b> Distribución granulométrica del agregado fino .....	53
<b>Figura 25.</b> Tipo de falla número 2.....	64
<b>Figura 26.</b> Curvas de control de pH en agua de lixiviados .....	69
<b>Figura 27.</b> Curvas de control de pH en agua de lixiviados .....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Menús de encapsulamiento .....	6
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y desventajas del encapsulamiento. ....	19
<b>Tabla 3.</b> Cantidad de residuos muestreados por la empresa Hazwat.....	27
<b>Tabla 4.</b> Granulometría de agregado grueso .....	30
<b>Tabla 5.</b> Criterios de graduación para agregado grueso.....	31
<b>Tabla 6.</b> Abrasión para agregados con tamaño menos a 1 ½". ....	34
<b>Tabla 7.</b> Criterios de graduación para agregados finos .....	37
<b>Tabla 8.</b> Dosificación para encapsulamiento de residuos peligrosos.....	47
<b>Tabla 9.</b> Residuos peligrosos usados para encapsulamiento. ....	51
<b>Tabla 10.</b> Resultados de ensayo de peso específico agregado grueso.....	52
<b>Tabla 11.</b> Resultados de ensayos de densidad aparente .....	54
<b>Tabla 12.</b> Resultados del ensayo de abrasión. ....	55
<b>Tabla 14.</b> Resultados de ensayos de densidad aparente .....	57
<b>Tabla 15.</b> Resultados del ensayo de contenido orgánico.....	58
<b>Tabla 16.</b> Resultados de ensayos de densidad real del cemento.....	59
<b>Tabla 17.</b> Resultados de medición de pH en dilución de residuos y agua destilada 1:4. ....	60
<b>Tabla 18.</b> Resultados de determinación de humedad en residuos peligrosos. ....	60
<b>Tabla 19.</b> Resultados de determinación de contenido de sulfatos.....	61
<b>Tabla 20.</b> Cuantificación de metales en residuos peligrosos .....	62
<b>Tabla 21.</b> Resultados de dosificación de cubos de hormigón .....	63
<b>Tabla 22.</b> Resultados compresión testigos de hormigón. ....	64
<b>Tabla 23.</b> Dosificación de cubos de encapsulamiento. ....	65
<b>Tabla 24.</b> Resultados de compresión cúbica de hormigón en cubos de encapsulamiento. ....	66
<b>Tabla 25.</b> Abreviaturas utilizadas para ensayo de lixiviación. ....	67
<b>Tabla 26.</b> Resultados de análisis de humedad a cubos de encapsulamiento.....	68
<b>Tabla 27.</b> Resultados de cuantificación de metales por espectrometría de absorción.....	71

## RESUMEN

La generación de residuos peligrosos se ha constituido como una problemática a nivel mundial debido a su alta peligrosidad, dada principalmente por la presencia de metales pesados y otros constituyentes que pueden llegar a afectar a la naturaleza y al ser humano. La técnica de encapsulamiento se ha constituido como una solución eficaz ante este problema, esta alternativa se basa en la adición de residuos peligrosos dentro de la mezcla de hormigón formando una matriz cementicia que inmovilice los contaminantes evitando su migración hacia el medio externo.

El objetivo del trabajo es determinar la dosificación óptima de reemplazo de agregados (arena y ripio) para el encapsulamiento de residuos peligrosos (vidrio triturado de ampollitas y frascos de perfumes, luminarias, escoria de incineración y ceniza de fondo de cámara de combustión) que reemplace la mayor cantidad de material de construcción sin alterar las características del hormigón, asegurando la inexistencia de lixiviación de metales pesados, mediante la caracterización inicial de residuos peligrosos y agregados de hormigón (cemento y arena) con el fin de establecer cuatro dosificaciones de reemplazo de agregados por residuos peligrosos correspondientes al 5, 10, 15 y 20 % además de una dosificación que contenga únicamente agregados y cemento, misma que será tomada como referente para establecer la variación que la adición de este tipo de componentes genera en el hormigón. Una vez establecidas las dosificaciones se procedió con la fundición de 15 cubos de hormigón correspondientes a tres réplicas de cada dosificación, cinco cubos fueron utilizados para la ejecución de un ensayo de compresión para comprobar que cumplan con la resistencia mínima establecida de  $210 \text{ kgf/cm}^2$  y los restantes fueron utilizados en un ensayo de lixiviación mediante el Método 1315 EPA sumergiendo a los cubos en agua destilada durante 112 días controlando el pH y conductividad en ocho intervalos de 14 días.

Finalmente, se comprobó mediante espectrometría de absorción atómica que los metales presentes en el agua de lixiviación cumplían con la normativa ambiental (Ordenanza Municipal 404) asegurando la compactación de los metales pesados dentro de la matriz cementicia (cubos) evitando su interacción con el medio ambiente. Por otro lado se pudo identificar como la dosificación más eficiente a la correspondiente al 20% de reemplazo, dado que se pudo utilizar una mayor cantidad de residuos peligrosos.

**PALABRAS CLAVE:** encapsulamiento, residuos peligrosos, lixiviación, matriz cementicia.

## ABSTRACT

The increase in the generation of hazardous waste has become a worldwide problem due to its high hazardousness, mainly due to the presence of heavy metals and other constituents that can affect nature and human beings. It is for this reason that the encapsulation technique has become an effective solution to this problem. This alternative is based on the addition of hazardous waste into the concrete mix, forming a cementitious matrix that immobilizes the contaminants and prevents their migration to the external environment.

The objective of this work is to determine the optimum dosage for the encapsulation of hazardous waste (crushed glass from ampoules and perfume bottles, light bulbs, incineration slag and bottom ash from the combustion chamber) that replaces the greatest amount of construction material without altering the characteristics of the concrete, ensuring the absence of leaching of heavy metals, through the initial characterization of hazardous waste and concrete aggregates (cement and sand) in order to establish four dosages of aggregates replacement by hazardous waste corresponding to 5, 10, 15 and 20 %, in addition to a dosage containing only aggregates and cement, which will be taken as a reference to establish the variation that the addition of this type of components generates in the concrete. Once the dosages were established, 15 concrete cubes corresponding to three replicates of each dosage were cast. Five cubes were used to perform a compression test to verify that they comply with the established minimum strength of  $210 \text{ kgf/cm}^2$  and the remaining cubes were used in a leaching test using Method 1315 EPA by immersing the cubes in distilled water for 112 days, controlling the pH and conductivity at eight 14-day intervals.

Finally, it was verified by atomic absorption spectrometry that the metals present in the leaching water complied with environmental regulations (Municipal Ordinance 404), ensuring the compaction of the heavy metals within the cementitious matrix (cubes) and avoiding their interaction with the environment. On the other hand, the most efficient dosage was identified as that corresponding to 20 % replacement, since it was possible to use a greater amount of hazardous waste.

**KEYWORDS:** encapsulation, hazardous waste, leaching, cementitious matrix.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En las últimas dos décadas del siglo XX y las primeras del XXI se ha reconocido la problemática ambiental como una prioridad para casi todos los países del mundo. Es evidente el impacto directo causado por los residuos sólidos en términos de la contaminación del recurso hídrico, polución del aire, esterilización del suelo, proliferación de plagas y sus efectos en la salud pública (Galvis González, 2016).

Según (IDEAM, 2017) la mayor generación de residuos tóxicos y peligrosos proviene de las grandes potencias a nivel mundial como es el caso de Rusia (5.441 millones de toneladas) y Alemania (17,2 millones de toneladas) tal como se puede observar en la Figura 1. Esta contaminación proviene principalmente del sector industrial y sanitario siendo las principales causas: caducidad o daños en materias primas, subproductos de reacción, residuos resultantes de operaciones unitarias, muestras para análisis de laboratorio, caducidad o deterioro de productos finales, entre otros (Navas & Piedra, 2018).



**Figura 1.** Mapa de generación de residuos a nivel mundial

Fuente (IDEAM, 2017)

La disposición de desechos peligrosos es considerada una problemática a nivel mundial esto, ya que su impacto ambiental ante una mala gestión genera consecuencias irremediables en el medio ambiente e incluso en la salud de las personas.

Actualmente, la necesidad de gestionar los residuos peligrosos ha contribuido en el desarrollo de alternativas financieramente viables y compatibles con el medio ambiente. Donde los materiales de construcción sean parcialmente sustituidos por algunos de estos desechos para la aplicación de la técnica de encapsulamiento.

Es por estas razones, que el presente proyecto se encuentra enfocado en la mejora de la gestión de residuos aplicando la técnica de encapsulamiento de residuos peligrosos como es el caso de vidrios (ampollas y perfumes), luminarias, escorias de fundición y cenizas de fondo de la cámara de combustión, generadas en el proceso de incineración provenientes de la empresa Hazwat con el objetivo de determinar la dosificación óptima en la que el material de construcción pueda ser sustituido por los residuos sin generar efectos adversos en las características físicas del hormigón, además de comprobar que los materiales peligrosos no lixivien hacia el medio externo.

El proyecto se inició con el reconocimiento de los residuos que son admitidos por la empresa Hazwat, para lo cual se contó con la ayuda de un inventario de los desechos disponibles dentro de los galpones de almacenamiento temporal de residuos, luego, se realizó una reunión con los líderes del proyecto donde se detallaron los residuos de interés por parte de la empresa, además de establecer el producto final más conveniente para uso interno de la misma, decidiendo elaborar cubos de hormigón de una dimensión 15x15x15 cm tamaño que se adoptó por conveniencia en el traslado de bloques de hormigón, además de la realización de ensayos posteriores referentes a compresión de cubos de hormigón.

Con el fin de identificar las propiedades presentes en los residuos peligrosos se procedió con la caracterización de residuos peligrosos, para lo cual los desechos fueron trasladados hacia la Escuela Politécnica Nacional para la ejecución de ensayos de humedad, pH y digestión de muestras para el posterior análisis de metales pesados (As, Cd, Pb, Hg, Ni y Zn) mediante un análisis espectrofotométrico de absorción atómica realizado en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX).

En consecuencia, se procedió con ensayos físicos de agregados como: análisis granulométrico (ASTM C33M-13), densidad aparente (ASTM C29 / INEN 858), densidad real (ASTM C188) peso específico (ASTM C128-15) y abrasión (ASTM C127-15). Con el objetivo de determinar la dosificación para la muestra patrón de una resistencia de 240  $kgf/cm^2$  teniendo en cuenta este límite ya que al adicionar residuos a la mezcla de hormigón se pueden presentar planos de falla que hagan que los cubos se fracturen con facilidad. A partir de la dosificación madre (dosificación de hormigón sin adicionar ningún tipo de residuos peligroso) se ejecutó la fundición de cuatro testigos de hormigón, más adelante estos cilindros fueron sometidos a una prueba de compresión para verificar que la dosificación utilizada cumpla con la resistencia esperada de 240  $kgf/cm^2$ .

Una vez obtenida la dosificación madre, se establecieron diferentes menús de encapsulamiento sustituyendo el 5, 10, 15 y 20 % de desechos peligrosos por material de



construcción. Esto en base al estudio realizado por (G. Benavides et al., 2015) donde, se comprobó que el máximo reemplazo de agregados puede tener un valor de 15% sin que afecte a las propiedades mecánicas del hormigón, especialmente a la resistencia a la compresión, parámetro que es de suma importancia ya que se relaciona directamente con la vida útil del hormigón.

Es por esto, por lo que se tomaron dos dosificaciones por debajo de este límite y una dosificación por encima para utilizar la mayor cantidad de residuos peligrosos posibles. El agregado fino fue reemplazado con vidrio triturado (ampollas y perfumes), ceniza y luminarias, mientras que, el agregado grueso fue sustituido por la escoria de incineración debido a su mayor tamaño. Obteniendo así un total de 14 cubos de hormigón de 15x15x15 cm, es decir tres cubos por cada dosificación y dos cubos de la dosificación madre, mismos que fueron utilizados como blanco.

Posteriormente, los cubos fueron sometidos a una prueba de compresión, donde tuvieron que ser cortados a una dimensión de 10x10x10 cm debido a que superaron la capacidad máxima del equipo utilizado para el ensayo (Universal Testing Machine). Obteniendo un resultado satisfactorio donde la resistencia superó los  $210 \text{ kgf/cm}^2$  (límite establecido bibliográficamente ya que no se cuenta con una norma específica para este tipo de proyecto).

Se ejecutó una prueba de lixiviación aplicando el método 1315 de la EPA referente a "Tasas de transferencia de masa de constituyentes en monolíticos o compactados materiales granulares utilizando un procedimiento de lixiviación en tanque semi-dinámico". Para la ejecución del método, inicialmente, se realizó un ensayo de humedad, para después sumergir a los cubos de hormigón en agua destilada durante un periodo de alrededor de 112 días, evaluando el pH y conductividad en intervalos de 14 días.

El agua fue filtrada y analizada en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX) por espectrofotometría de absorción atómica. En el cual se verificó que los contaminantes como fue el caso de los metales pesados (As, Cd, Pb, Hg, Ni y Zn) cumplían con los límites máximos permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal 404 y que, además, no representaban un riesgo para el medio ambiente con relación a la presencia de lixiviados encontrados en el agua.

Una vez comprobada las concentraciones de los metales presentes en los lixiviados en relación con los límites máximos permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal 404 se procedió a identificar la dosificación más efectiva de remplazo para crear un manual que

fue entregado a la empresa para que puedan replicar este menú de encapsulamiento en sus instalaciones (Anexo 2).

### **1.1 Objetivo general**

Determinar la dosificación óptima para el encapsulamiento de residuos sólidos en el que se reemplace la mayor cantidad de material de construcción por residuos peligrosos provenientes de vidrios (ampollas y frascos vacíos de perfumes), luminarias, escorias de incineración y cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas por el proceso de incineración, sin que estas generen efectos adversos en las características físicas en el hormigón.

### **1.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar los vidrios, luminarias, escorias de incineración y cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas por el proceso de incineración determinando sus características físicas y químicas más relevantes.
2. Elaborar menús de encapsulamiento sobre la caracterización del material de construcción y desechos peligrosos.
3. Determinar el menú más adecuado para el reemplazo de material de construcción por residuos peligrosos sin que haya repercusiones en las características del hormigón.
4. Verificar que no exista lixiviación de metales pesados que puedan llegar a generar consecuencias o efectos adversos hacia la salud de las personas y el medio ambiente.

### **1.3 Alcance**

El presente trabajo de integración curricular abarca la determinación de la dosificación óptima para el encapsulamiento de vidrios de luminarias, escorias de incineración, vidrio (ampollas y perfumes) y cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas en el proceso de incineración de residuos gestionados por la empresa Hazwat, ubicada en el km 37 ½ vía Quito – Cayambe (Figura 2), mediante el establecimiento de una constitución porcentual específica que permita la mayor sustitución de materiales tóxicos y peligrosos en lugar de los agregados que conforman el hormigón.



**Figura 2.** Ubicación centro de Remediación Ambiental

El proyecto se focalizó en la gestión y aprovechamiento de residuos peligrosos mediante, el inventario de residuos proporcionado por la empresa, en donde, se determinó los desechos de mayor cantidad y difícil gestión, con esta información se establecieron varios menús de encapsulamiento, tomando en cuenta las características físicas (granulometría) y químicas (pH, humedad, contenido de metales pesados) de los desechos tóxicos, así como de los materiales de construcción.

Se tuvieron un total de cuatro dosificaciones correspondientes al 5, 10, 15 y 20% de sustitución de materiales de construcción tomando en consideración que el agregado fino fue remplazado por vidrio, ceniza y luminarias trituradas, mientras que el agregado grueso fue remplazado por escoria de incineración debido a su mayor tamaño (1,5 cm). La cantidad de residuos sustituidos se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Menús de encapsulamiento

Material de construcción sustituido	Residuos	Dosificación			
		Reemplazo del 5% de agregados de hormigón por residuos peligrosos [kg]	Reemplazo del 10% de agregados de hormigón por residuos peligrosos [kg]	Reemplazo del 15% de agregados de hormigón por residuos peligrosos [kg]	Reemplazo del 20% de agregados de hormigón por residuos peligrosos [kg]
Arena	Ceniza	0.26	0.53	0.81	1,07
	Vidrio	0.17	0.36	0.53	0.71
	Luminaria	0.26	0.53	0.81	1.07
Ripio	Escoria	0.17	0.36	0.53	0.71
Agua		2.93	2.93	2.93	2.93
Cemento		4.51	4.51	4.51	4.51

Partiendo desde cada dosificación establecida, se inició con la fundición de 12 cubos de hormigón, realizando tres replicas por cada porcentaje de dosificación de reemplazo de agregados por residuos peligrosos (5, 10, 15 y 20%), adicionalmente se fundieron 3 cubos de hormigón de la dosificación madre (mezcla de hormigón sin adicionar ningún tipo de residuo peligroso) con el objetivo de comprobar que los testigos tengan una resistencia a la compresión de  $240\text{kgf}/\text{cm}^2$  siendo este el punto de partida para establecer un porcentaje de sustitución de materiales de construcción (ripio, arena). Posteriormente se utilizó un cubo por cada dosificación para la ejecución del ensayo de resistencia a la compresión (donde mediante el uso del equipo Universal Testing Machine los cubos fueron comprimidos hasta su rotura, por lo que no pudieron ser utilizados para ningún otro análisis), mientras que los 10 cubos restantes fueron sometidos a ensayos de humedad y lixiviación mediante la aplicación del método 1315 establecido por la EPA.

A partir de los datos obtenidos mediante los análisis de laboratorio, se determinó la dosificación óptima donde la mayor cantidad de material tóxico fue reemplazado sin causar alteraciones significativas en las características normalizadas del hormigón. Además, se verificó que no exista liberación de metales pesados hacia el medio, asegurando así la confiabilidad de los resultados. Este proyecto ayudó a ampliar el catálogo de

procedimientos y dosificación (menús) de encapsulamiento de la empresa Hazwat, brindando así una optimización en el proceso. Además de contribuir en el establecimiento de características base de los residuos que la empresa admite, mediante el análisis de metales pesados normados en la Ordenanza Municipal 404 (derogada, pero la única existente en el país).

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Antecedentes**

Debido al crecimiento del sector industrial en las últimas décadas, se han originado una gran cantidad de residuos tóxicos y peligrosos. En el presente proyecto, la disposición final en vertederos se estableció como la principal solución para hacer frente esta problemática, sin embargo, esto ha traído consecuencias en la salud humana, además de problemas ambientales, sociales y económicos que de alguna u otra forma se generan (Sanito et al., 2022).

En cuanto a salud, se presentan tres situaciones principales, la primera referida a la transmisión de enfermedades bacteriales y parasitarias tanto por agentes patógenos como por vectores que se alimentan y reproducen en los residuos; en segundo lugar el riesgo de lesiones e infecciones causadas por objetos cortopunzantes que se encuentran en los residuos, poniendo en alto riesgo la salud de las personas que recuperan materiales en los vertederos; y en tercer lugar la contaminación ocasionada por la quema de residuos, la cual afecta el sistema respiratorio de las personas (Arciniegas, 2013).

Respecto a la relación con el ambiente: la disposición final y acumulación de residuos genera efectos irreversibles en el suelo, inutilizando las tierras para otros usos. En cuanto a la calidad del aire, debido a los gases originados en el proceso de descomposición pueden llegar a representar un riesgo para quienes habitan cerca de los vertederos y acumulaciones de desechos, del mismo modo la quema de residuos sólidos ocasiona deterioro del aire juntamente con los gases tóxicos generados por la quema de materiales plásticos, así como el metano emanado por la descomposición de los residuos sólidos.

En cuanto a los recursos hídricos, las aguas freáticas pueden contaminarse con nitratos y metales pesados que se filtran a través de los residuos y se contaminan las aguas de lluvia y las aguas superficiales convirtiendo el agua en no apta para el consumo humano y el desarrollo de la vida acuática(Arciniegas, 2013).

### 1.4.2 Residuos peligrosos

Los desechos peligrosos se definen como cualquier forma de residuo que contiene una o más de las siguientes características: explosividad, inflamabilidad, corrosividad y toxicidad. Estos residuos causan enfermedades, daños a la salud de seres humanos, plantas, animales y ecosistemas cuando son liberado al medio ambiente (Sanito et al., 2022). A continuación, se describen las características que presenta un residuo peligroso:

- **Corrosividad:** Ácidos o bases capaces de corroer recipientes de metal, tales como tanques de almacenamiento, tambores y barriles (EPA, 1998).
- **Reactividad:** Residuos reactivos son inestables bajo condiciones “normales” (0°C, 1atm). Pueden provocar explosiones, gases tóxicos o vapores cuando se combinan con agua (EPA, 1998).
- **Explosividad:** Aquellos que pueden formar mezclas explosivas con el agua, además pueden producir fácilmente una reacción o descomposición explosiva (EPA, 1998).
- **Toxicidad:** Los residuos tóxicos son dañinos o fatales cuando se ingieren o absorben. Cuando los residuos tóxicos se vierten en la tierra, el líquido contaminado puede escurrirse (lixivarse) del residuo y contaminar el agua (EPA, 1998).
- **Inflamabilidad:** se inflaman bajo ciertas condiciones o son espontáneamente combustibles, y tienen un punto de inflamación de menos de 60° C (140° F) (EPA, 1998).
- **Biológico Infeccioso:** si contiene microorganismos o toxinas que puedan llegar a causar enfermedades (no se incluyen residuos de origen domiciliario o de tratamiento de efluentes) (EPA, 1998).

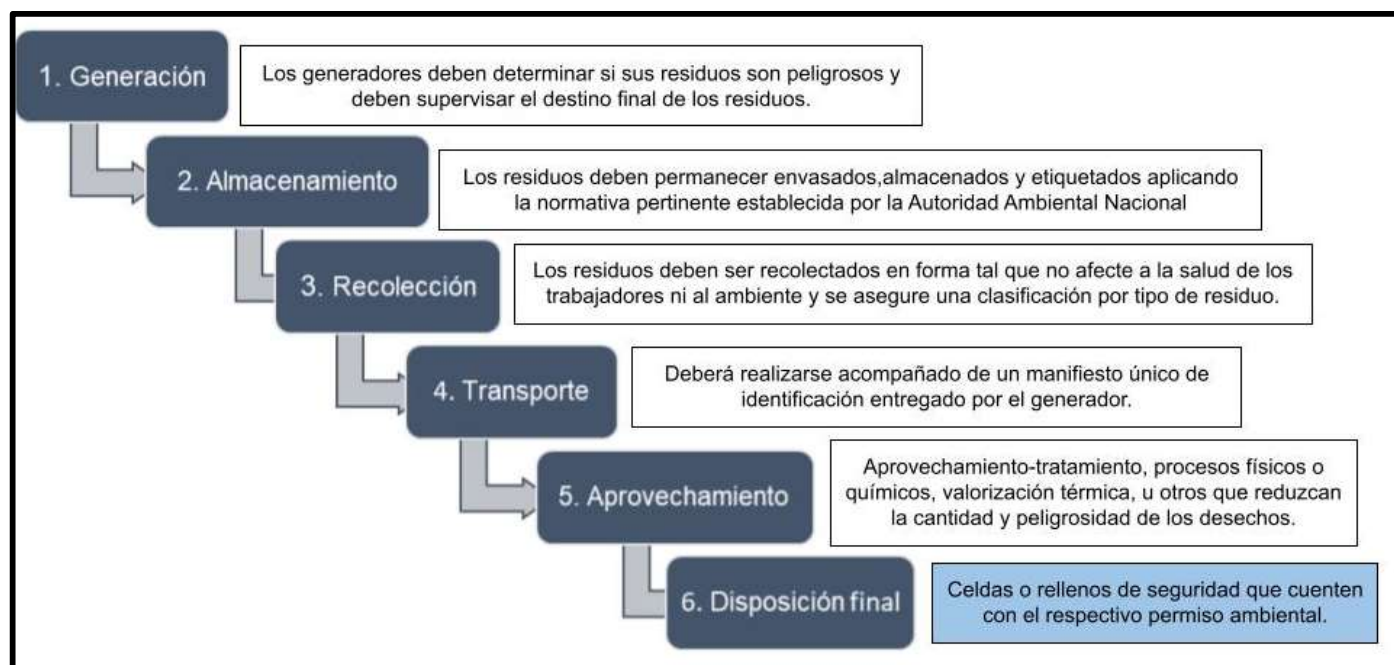
Los residuos peligrosos pueden ser clasificados según su origen, en:

- **Residuos de fuente no específica:** Estos son residuos específicos de ciertos materiales, tales como los solventes, que son generados por varias industrias diferentes (EPA, 1998).
- **Residuos de fuente específica:** residuos de industrias expresamente identificadas (EPA, 1998).
- **Productos químicos comerciales descartados:** Productos fuera de especificación, residuos en recipientes, residuo líquido de derrames, o ingredientes

activos que se han derramado o que no se han usado y se han desechado, o se tiene pensado desechar (EPA, 1998).

### 1.4.3 Gestión de residuos peligrosos

La gestión de desechos peligrosos se conforma por las siguientes fases: generación, almacenamiento, recolección, transporte, aprovechamiento (reúso, reciclaje) y disposición final (Figura 3). En lo referente a la gestión de desechos, la empresa ecuatoriana Hazwat, se caracteriza por la gestión de desechos no peligrosos, peligros y especiales. Además, brinda servicios confiables y de alta calidad basados en las normas nacionales e internacionales, en cumplimiento de todas las disposiciones legales y reglamentarias vigentes. Cumpliendo los estándares más exigentes de conservación ambiental, seguridad industrial, salud ocupacional y Responsabilidad Social, con infraestructura de primer orden y con un equipo de profesionales altamente calificado (Hazwat, 2022).



**Figura 3.** Esquema de gestión de desechos peligrosos

Fuente: Elaboración propia sobre el (Acuerdo No.061 Reforma Del Libro VI Del Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015)

### 1.4.4 Residuos peligrosos utilizados en el proyecto

Los residuos peligrosos utilizados en el proyecto son; luminarias trituradas, escoria de incineración, vidrio triturado (ampolletas y perfumes) y ceniza proveniente de la cámara de combustión, a continuación se describe cada residuo;



- **Luminarias trituradas**

La empresa Hazwat gestiona luminarias LED, lámparas, tubos fluorescentes y focos ahorradores usados, estos residuos reciben un pretratamiento mediante el uso de una máquina de destrucción de luminarias (Figura 4), El funcionamiento de esta máquina se basa en el uso de dos compartimientos, en el primero se extrae el vapor de mercurio de las luminarias a través de un filtro, mientras que el segundo compartimiento es utilizado para triturar el resto de los componentes de este residuo. Las luminarias utilizadas para el proyecto (Figura 5) se describen a continuación.



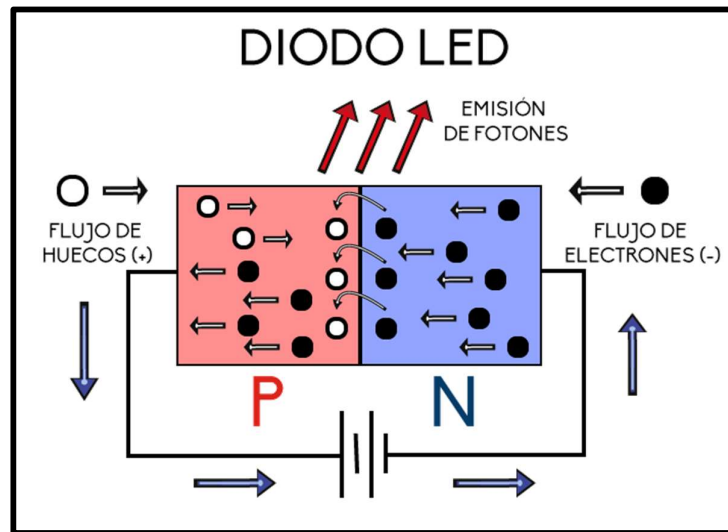
**Figura 4.** Destrucción de luminarias



**Figura 5.** Luminarias entregadas por Hazwat



**Luminarias LED:** son lámparas que basan su funcionamiento en diodos emisores de luz que presentan la ventaja de consumir poca energía eléctrica y desprenden grandes cantidades de luxes, es decir que presentan una mayor iluminación y por tanto una gran eficiencia energética (Hernández, 2015).



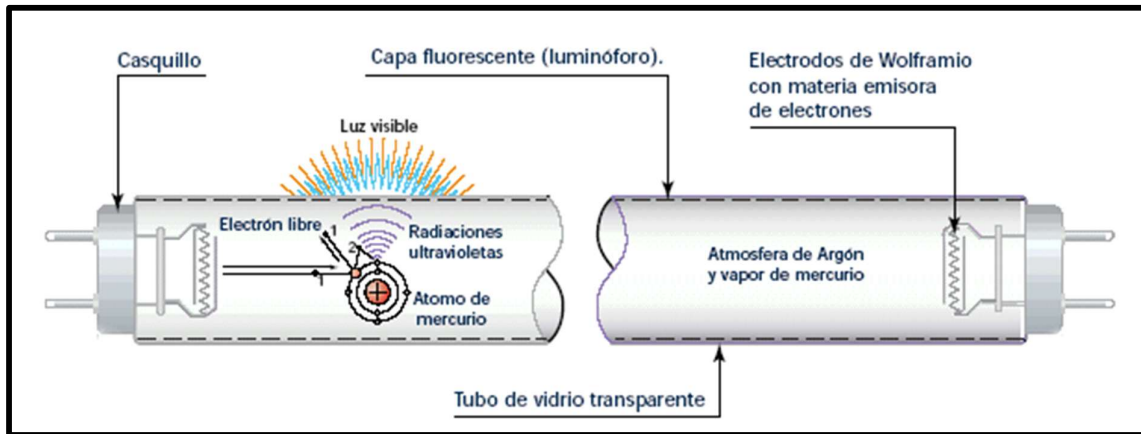
**Figura 6.** Funcionamiento de un diodo LED

Fuente: (Lusal, 2018)

Como se puede observar en la Figura 6 el funcionamiento de este tipo de luminarias se basa en el uso de un diodo LED, este diodo está conformado por la unión de dos semiconductores, el primero del tipo "P" y el segundo del tipo "N" cuando la electricidad pasa a través del diodo, los átomos de uno de los materiales (contenido en un chip-reflector) son transportados a un mayor nivel. Los átomos en el primer material retienen mucha energía y requieren liberarla. Esta energía libera electrones al segundo material dentro del chip-reflector y, durante esta liberación, se produce la luz (Lusal, 2018) .

Las luminarias LED contienen materiales aprovechables (balastos, fusibles, cables, condensadores). Sin embargo, en el interior de los diodos pueden contener metales pesados como plomo y arsénico por lo que se consideran un residuo peligroso (León, 2021). Además de que representan un alto consumo a nivel industrial y doméstico que según datos que maneja el Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador - CONELEC, poseen un tiempo de vida generalmente de entre 5.000 y 20.000 horas, dependiendo de la frecuencia de encendido y apagado (Jácome et al., 2013) por lo que representan un gran volumen de residuos que necesitan ser gestionados de manera especial ya que no pueden ser dispuestos en vertederos comunes debido a su composición interna conformada por diodos.

**Lámparas fluorescentes:** están constituidas por una descarga en vapor de mercurio de baja presión, en la cual la luz se produce predominante mediante polvos fluorescentes activados por energía ultravioleta de la descarga (Pantoja & Paredes, 2012).



**Figura 7.** Funcionamiento de lámpara fluorescente recta

Fuente: (Luminotecnia, 2002)

Como se puede observar en la Figura 7, inicialmente las láminas del cebador (pequeño cilindro metálico que transmite la corriente hacia los interruptores) están abiertas, al cerrar el circuito se ioniza el gas del cebador y se forma un arco. El arco calienta las láminas, estas se deforman y hacen contacto. Se cierra el circuito y la corriente calienta los filamentos de la lámpara iniciándose una descarga oscura en el tubo. Como ahora no se produce descarga en el cebador, las láminas se enfrían y se abren, lo cual produce una sobretensión, a través de la reactancia, que enciende el tubo (Luminotecnia, 2002).

**Focos ahorradores:** Como se puede observar en la Figura 8, este tipo de luminaria se compone por un casco de vidrio en forma de espiral mismo que se encuentra recubierto con una capa de material fluorescente que contiene argón y una pequeña cantidad de vapor de mercurio en su interior, además de un circuito de balastro electrónico. El tubo de vidrio de la bombilla se dobla y los dos extremos se fijan en una base para que el tubo quede sellado. Se fijan dos electrodos en cada extremo del tubo. El balastro genera una corriente eléctrica apropiada que pasa a través de la mezcla de argón y vapores de mercurio dentro del tubo. Cuando se aplica un voltaje a través de los electrodos, el gas en el interior se ioniza y permite la conducción de corriente. La corriente eléctrica que pasa a través de la mezcla de gases excita las moléculas de gas, lo que provoca la producción de radiación ultravioleta. El recubrimiento fluorescente es generalmente de fósforo. Cuando la radiación ultravioleta cae sobre este recubrimiento de fósforo, emite luz visible (Lumikon, 2017).



**Figura 8.** Funcionamiento de un foco ahorrador

Fuente: (Lumikon, 2017)

De acuerdo con la ficha técnica para el mercurio, elaborada por el Programa Internacional de Seguridad Química (IPCS por sus siglas en inglés) el umbral máximo tolerable para una persona expuesta a 8 horas es de  $0.025 \text{ mg}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración máxima admisible es de  $0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$  de exposición de corta duración (Jácome et al., 2013).

### **Problemática del mercurio**

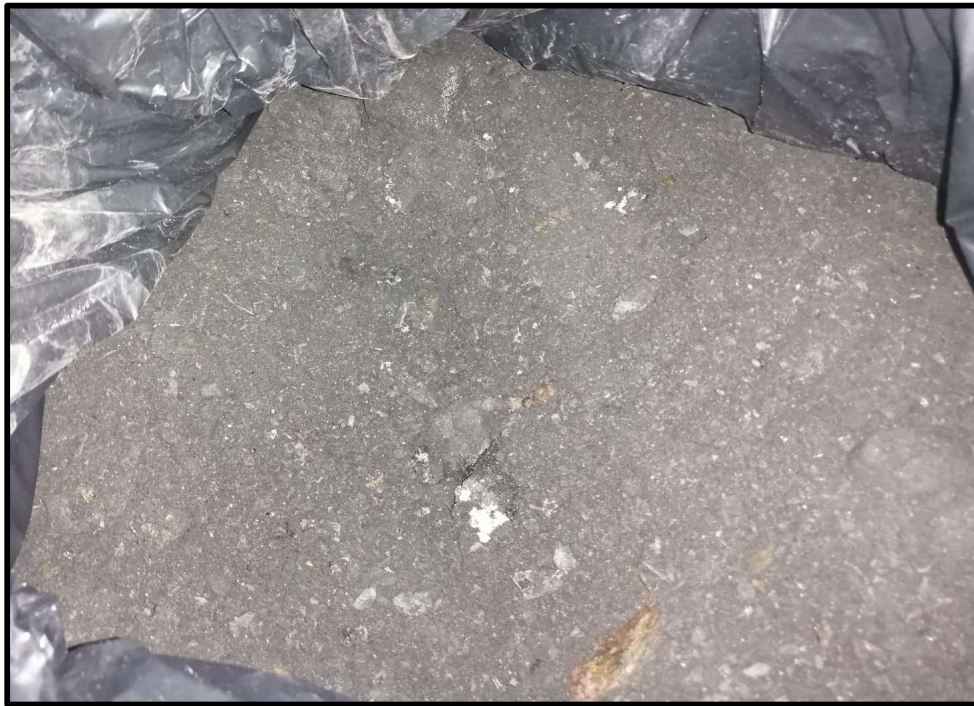
El mercurio puede ser absorbido por inhalación o a través de la piel, en el ser humano la exposición de corta duración irrita la piel, la inhalación del vapor puede originar neumonitis, puede afectar al sistema nervioso central y al riñón. Los síntomas más comunes son irritabilidad, inestabilidad emocional, temblores, alteraciones mentales, de la memoria y del habla, inflamación y decoloración de las encías (Jácome et al., 2013).

Por otro lado la contaminación por mercurio en un medio acuático puede provocar la muerte de diversos organismos, además puede ser metabolizado por ciertos individuos,

ocasionando bioacumulación afectando así a toda la cadena trófica causando daños irreversibles en el medio ambiente(National Geographic, 2023).

- **Cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas por el proceso de incineración**

Las cenizas se definen como cualquier residuo sólido fino producto de la combustión (Figura 9). Son de color gris claro a negro, lisos y muy visibles. Las cenizas volantes son un producto residual de la incineración de residuos sólidos, es decir la parte inorgánica de todo residuo solido (como vidrio, latas, metal, etc.) que no se incinera. Por lo general este tipo de residuo contiene metales pesados especialmente cadmio y plomo, presentes en baterías, algunos plásticos y electrodomésticos, que se encuentran en los residuos sólidos municipales durante la incineración (Almache, 2022). La empresa Hazwat gestiona alrededor de 68,688 toneladas de ceniza de fondo de cámara de combustión al año por lo que este residuo se constituye como uno de los de mayor gestión dentro de la misma.



**Figura 9.** Cenizas de fondo de cámara de combustión generadas por el proceso de incineración

- **Escorias de incineración**

Las escorias de incineración son residuos poco comunes que están formadas por el material total o parcialmente combustionado que se libera de las parrillas del horno, tras su paso por la cámara de combustión a temperaturas mayores a 850°C (Huingo, 2017).



Estos residuos disponen de un alto nivel de recuperación de materiales ya que contienen una fracción mineral, metales férricos y no férricos. La fracción mineral puede ser incorporada como material de construcción. Por otro lado, este tipo de residuos contiene materiales adicionales como metales que pueden presentarse en forma libre, frecuentemente unidos a otros materiales o en forma mineral (Huingo, 2017).

Son considerados un desecho peligroso debido a su gran cantidad de componentes tóxicos como lo son los metales pesados (Cd, Pb, Ni) producto de la incineración de distintos materiales como: medicamentos caducados o fuera de especificación, escoria de asfalto, entre otros, es por esta razón que la utilización de escorias como árido para la construcción supondría la conservación de un gran volumen de áridos de calidad y el ahorro de la energía necesaria para su extracción. La escoria entregada por la empresa se puede apreciar en la Figura 10.



**Figura 10.** Escorias de incineración

#### **1.4.5 Vidrio triturado (ampollas de inyecciones y frascos de perfumes)**

Las ampollas de vidrio son recipientes de un volumen reducido, fabricadas con vidrio, conformadas por una mezcla de óxidos metálicos (hierro, cobalto, manganeso, níquel, cromo, arsénico, bario, entre otros). El reciclaje de vidrio proveniente de ampollas no es común debido a su alto costo y contaminación. Sin embargo, gracias investigaciones

llevadas a cabo en la Universidad de Columbia de Nueva York se ha llegado a comprobar que este tipo de residuo puede utilizarse como un agregado del cemento generando una mayor durabilidad y resistencia al cemento (Calderón, 2016).

En la Figura 11 se pueden observar la mezcla de vidrio triturados (ampollas de medicamentos con etiquetas plásticas y frascos de vidrios de perfumes) entregados por la empresa Hazwat, este tipo de vidrio proviene de envases vacíos de perfumes y frascos vacíos de ampollas de inyecciones triturados en una máquina trituradora de vidrio de la empresa Hazwat (Figura 12).



**Figura 11.** Mezcla de vidrio triturado





**Figura 12.** Trituradora de vidrio de Hazwat

#### **1.4.6 Normativa nacional aplicable para la disposición final de residuos peligrosos**

En el caso de nuestro país la normativa aplicable vigente se puede condensar en los siguientes documentos:

- Acuerdo Ministerial 026. Procedimientos para Registro de Generadores de Desechos peligrosos, Gestión de Desechos Peligrosos previo al licenciamiento Ambiental, y para el Transporte de Materiales Peligrosos R. O. 34, de 12 de mayo de 2008. Este tipo de normativa es utilizada por la empresa Hazwat para la correcta gestión de los residuos peligrosos a los que les dan una disposición final.
- Acuerdo Ministerial No.061 Reforma del libro VI del Texto Unificado de Legislación secundaria, Decreto ejecutivo 3516, Registro Oficial Edición Especial 216 de 04 de

mayo de 2015. Mediante esta normativa se pudo establecer las definiciones de residuos peligrosos y especiales.

- LISTADO NACIONAL DE SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS, DESECHOS PELIGROSOS Y ESPECIALES, Acuerdo N°142, Registro Oficial N° 856 del 21 de diciembre del 2012, Ministerio del Ambiente. En esta normativa se pudo verificar que los residuos que fueron entregados por parte de la empresa Hazwat se encontraban dentro de la clasificación nacional establecida y por ende han sido catalogados como residuos que necesitan una disposición final especial (rellenos de seguridad, encapsulamiento, incineración, etc.)
- Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2266 "Requisitos para el manejo de materiales y residuos peligrosos", Segunda revisión enero 2013, Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria. Esta normativa fue utilizada para establecer parámetros seguros para el manejo, transporte y almacenamiento de residuos peligrosos ya que los residuos fueron transportados desde las instalaciones de la empresa Hazwat en Cayambe hacia la Escuela Politécnica Nacional.
- Ordenanza Municipal 404, Resolución No 002-SA, Secretaría de Ambiente, Pub. L. No. 404, 2014. En el caso del presente trabajo se utilizó como base la normativa aplicable a la Ordenanza Municipal 404 misma que se encuentra derogada, sin embargo, es la única normativa aplicable en nuestro país, en esta normativa se contempla los límites máximos permisibles para la extracción de metales pesados en base seca, así como los límites máximos permisibles en la prueba de lixiviación para comprobar que los cubos de encapsulamiento no liberan contaminantes hacia el medio externo asegurando así su confiabilidad.

#### **1.4.7 Encapsulamiento de desechos peligrosos**

Una vez conocido la composición de los residuos peligrosos y la normativa ambiental vigente a ser utilizados en el presente trabajo, es preciso detallar la técnica de encapsulamiento que va a ser aplicada para contener los residuos peligrosos en una matriz de hormigón, evitando su interacción con el medio exterior. El encapsulamiento es un proceso donde el residuo es integrado dentro de un material que lo confina, aislando su interacción con el ambiente externo y manteniendo los contaminantes en su interior, los materiales de encapsulamiento pueden ser de distintas fuentes, sin embargo, el más utilizado es el hormigón (mezcla de agregados y cemento) debido a sus resultados positivos reflejados en la minimización de la velocidad de migración de los contaminantes



del residuo y su reducción de toxicidad (Sánchez, 2014). La aplicación de esta técnica presenta una serie de ventajas y desventajas que se pueden evidenciar en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas del encapsulamiento.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Minimizar la velocidad de migración de contaminantes que se encuentran contenidos en los residuos.	Incrementa el volumen de los desechos a disponer.
Reduce la toxicidad de los residuos.	No siempre es posible para grandes cantidades (toneladas).
Atrapa a los contaminantes mediante la confinación por medio de la adición de un medio soporte aglomerante y otros modificadores	Incremento de costo debido a la adquisición de agregados de hormigón.
Minimiza el riesgo de lixiviación de contaminantes en aguas superficiales o subterráneas.	Se necesita de un amplio espacio para la disposición final.

Fuente: (Fernandez et al., 2021)

#### **1.4.8 Técnicas de encapsulamiento**

Para la correcta ejecución de este tipo de técnica, es esencial comprender los mecanismos básicos físicos y químicos que controlan la eficacia de los reactivos de estabilización. Para lograr el encapsulamiento se utilizan una o más de las siguientes técnicas:

##### **1.4.8.1 Macro encapsulación**

Esta técnica consiste en confinar físicamente a los constituyentes de los residuos peligrosos en el interior de una mezcla o mortero compuesto de conglomerantes inorgánicos agregados (desechos) y agua que se funden en un vertedero de seguridad (Figura 13) (Hazwat, 2022). Los constituyentes de los residuos peligrosos son retenidos dentro del hormigón, este tipo de estructura puede llegar a sufrir una degradación debido a su exposición a factores ambientales, mismas que pueden ser lluvia, desecación, congelación, entre otros, por lo que esta técnica es eficaz siempre que la matriz de encapsulamiento se conserve de manera adecuada y se evite su desgaste y por ende la liberación de contaminantes (C. López, 2009).



**Figura 13.** Mortero compuesto de conglomerantes inorgánicos agregados (desechos)

#### 1.4.8.2 Micro encapsulación

Se basa en la conformación de bloques con el objetivo de confinar los desechos que contienen metales pesados y presentan lixiviados (Figura 14). Los constituyentes del residuo peligroso quedan atrapados en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico, la aplicación de este tipo de técnica garantiza la retención de contaminantes especialmente metales pesados y lixiviados ya que al encontrarse confinados en una matriz pequeña presentan una estabilización microscópica (C. López, 2009).



**Figura 14.** Bloques de microencapsulación

### 1.4.8.3 Estabilización de residuos peligrosos

Este mecanismo se define como el proceso a través del cual los contaminantes quedan parcial o totalmente confinados, por medio de la adición de reactivos que por lo general cumplen con las siguientes funciones:

- Mejoran el manejo y las características físicas del residuo
- Disminuyen la superficie a través de la cual puede tener lugar el intercambio de contaminantes
- Limita la solubilidad de los contaminantes presentes en los residuos
- Disminuye la toxicidad de los contaminantes

La adición de compuesto químicos y aglomerantes reducen la actividad química del desecho, disminuyendo el riesgo de manipulación (figura 15).



**Figura 15.** Adición de compuestos químicos para estabilización de residuos

Fuente: (Ingeambiente, 2017)

En el caso del presente trabajo se utilizó una combinación de técnicas de macro y micro encapsulación, mediante la adición de residuos peligrosos en la mezcla de hormigón reemplazándolos por los agregados para la conformación de una matriz de encapsulamiento en forma de cubos de 15x15x15 cm con el objetivo de confinar los materiales peligrosos dentro de la matriz que asegure su contención evitando la interacción de los contaminantes con el medio ambiente.

### 1.4.9 Tecnología de encapsulamiento de residuos peligrosos

La exposición de la tecnología de encapsulamiento de residuos peligrosos se puede efectuar a través del estudio de los diferentes tipos de reactivos, estos pueden presentarse de dos formas:

- **Aglomerantes:** aquellos que aumentan la resistencia a la estabilización de componentes de residuos peligrosos, como es el caso del cemento, concreto y hormigón (C. López, 2009) .
- **Sorbentes:** aquellos que retienen los contaminantes dentro de una matriz estabilizadora, entre los cuales tenemos como ejemplo a la fibra natural, aditivos impermeabilizantes, entre otros (C. López, 2009).

En el caso del presente proyecto se optó por la adición de reactivos aglomerantes específicamente el hormigón debido a su afinidad para la sustitución de materiales de construcción como agregado fino y grueso por residuos peligrosos.

### 1.4.10 El hormigón como reactivo aglomerante para el encapsulamiento de residuos peligrosos

El hormigón es un material de construcción constituido por una aleación de cemento, ripio (agregado grueso), arena (agregado fino) y agua. Adicionalmente, a la mezcla de hormigón pueden ser añadidos diferentes aditivos para reforzar sus características en función del uso final al que pueda ser sometido (Castro, 2020) .

Este tipo de material de construcción presenta una serie de ventajas como: resistencia, alta durabilidad, maleabilidad debido a su facilidad de adaptación a cualquier tipo de molde, fácil preparación debido a que los materiales necesarios para su construcción se pueden adquirir con gran facilidad, gran capacidad de aislamiento por lo que es una buena alternativa para la gestión de residuos, y finalmente este es un material reciclable. Por otro lado, se presentan desventajas como: dificultad de transporte debido a su alto peso, presenta un gran volumen por lo que necesita espacio para ser dispuesto (Castro, 2020).

#### Usos del hormigón

Según el manual establecido por (FIC, 2016) se puede destacar como principales usos del hormigón a los siguientes:

- Prefabricados
- Vigas y Viguetas

- Bloques, adoquines.
- Cimientos, escaleras
- Matriz de encapsulamiento
- Placas, columnas, etc.

#### **1.4.11 Cemento como principal agente en el encapsulamiento de residuos**

El encapsulamiento de residuos peligrosos con cemento se acopla fácilmente a residuos orgánicos, particularmente en metales pesados, esto debido al elevado pH (2,14) que presenta el cemento lo que permite retener a los metales pesados en forma de carbonatos de su estructura. La aplicación de este tipo de técnica presenta ciertas ventajas como: amplio conocimiento referente al manejo, mezcla, fraguado y endurecimiento del cemento, además de que este tipo de material es utilizado en construcción por lo que su costo es relativamente bajo y es de disponibilidad inmediata (C. López, 2009).

El cemento usado en el presente trabajo es el cemento Armaduro, es un Cemento Portland Puzolánico Tipo IP, con este producto se puede elaborar hormigones para la construcción de: postes, adoquines, bloques, bordillos, viguetas, tubos, entre otros (UNACEM, 2021). Se optó por la elección de este tipo de cemento debido a su alta resistencia inicial, en otros términos, el cemento alcanza su máxima resistencia 7 días después de su fundición, lo que nos permitió evaluar la resistencia esperada de  $240 \text{ kgf/cm}^2$  en un periodo corto de tiempo y así poder continuar con los ensayos posteriores (lixiviación) optimizando la productividad y recursos del proyecto.

#### **1.4.12 Agregados como principal fuente de sustitución de materiales de construcción por residuos peligrosos**

La adición de agregados (arena y ripio) conforman una parte trascendental en el establecimiento de una matriz de hormigón, es por esta razón que a continuación se describe brevemente a cada uno:

##### **▪ Agregado grueso**

El agregado grueso o árido grueso consiste en grava, grava triturada, piedra triturada o una mezcla de éstas, que cumplan con los requisitos de la norma (NTE INEN 872, 1982)

Este componente conforma casi el 75% del total de la mezcla de hormigón por lo que su dosificación influye directamente a las características de calidad de este. Las partículas

que conforman los agregados gruesos son aquellas que son contenidas en el Tamiz ASTM N°.4 (tamaño de partículas entre 9,5 mm- 38,0 mm) (Castro, 2020).

En el presente trabajo, el 20% de la dosificación del agregado grueso fue remplazado por escoria de fundición debido a su tamaño de aproximadamente 15 mm.

- **Agregado fino**

El agregado fino generalmente se basa en arena natural extraída de río o piedra triturada, la cual contiene impurezas y por tanto debe ser lavada. Este árido es el que tiene mayor influencia y constituye uno de los mayores porcentajes en peso del hormigón por tal razón es importante asegurar la calidad para su incorporación en la mezcla de concreto. (Méndes, 2012)

La industria de la construcción es considerada una de las más contaminantes debido a la extracción y fabricación de materiales, específicamente agregados (arena y ripio), los cuales producen grandes cantidades de residuos, representando un problema debido a que son vertidos al ambiente de manera irresponsable, no sólo afectando los suelos y agua, sino también el paisaje (Mendoza & Chávez, 2017).

La sustitución de agregados por residuos peligrosos presenta una serie de ventajas como: disminución de costos, disminución de la contaminación puesto que los residuos peligrosos no llegan a contaminar vertederos, cuencas hidrográficas, aire y suelo, además de evitar el consumo de recursos naturales no renovables reduciendo la demanda y extracción de materias primas naturales como la grava y la arena (Mendoza & Chávez, 2017). Para el presente trabajo, el 80% de la dosificación correspondiente al agregado fino fue reemplazada por un 30% de luminaria, 30% de ceniza de fondo de cámara de combustión y 20% de vidrio triturado buscando reemplazar la mayor cantidad de agregado por residuos peligrosos.

#### **1.4.13 Ensayo de lixiviación como medio de evaluación de la eficacia del encapsulamiento de residuos peligrosos**

Una vez aplicada la técnica de encapsulamiento de residuos peligrosos (ítem 1.4.8) es necesario evaluar su eficacia referente a la estabilización de metales pesados presentes en los residuos peligrosos, para esto es común recurrir a ensayos de lixiviación que consisten en estudiar la movilización de elementos químicos especialmente metales pesados en concentraciones mayores a las que naturalmente se encuentran en el ambiente, o que sobrepasen los límites establecidos en la normativa nacional vigente. Esto, debido a que la movilización de contaminantes hacia el medio puede ser tóxica a algunas

formas de vida, o estar acumulándose a través del tiempo en tejidos orgánicos; ya sea por ser consumidos en la cadena trófica o por tener contacto directo y ser absorbido por otro medio (respiración, contacto, entre otros) (M. López & Pérez, 2018).

Es por esta razón que para el presente proyecto únicamente se analizaron 8 metales pesados (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni, Zn y Mn) que se encuentran normados en la Ordenanza Municipal 404 de la Secretaría de Ambiente con el objetivo de identificar el cumplimiento de esta pese a que en el caso de las luminarias se contaba la presencia de fósforo. Sin embargo, al no tener algún tipo de normativa para poder comparar su cumplimiento este elemento no fue evaluado.

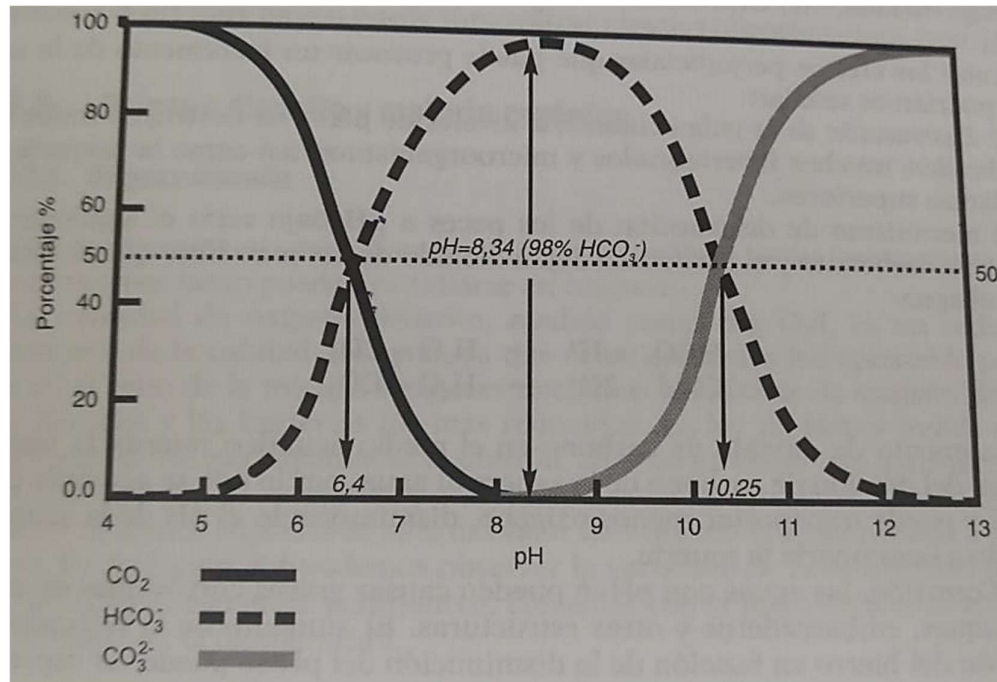
#### **1.4.14 Método EPA 1315**

Para verificar la eficacia del proceso de encapsulamiento es necesario evaluar las propiedades físicas, químicas y técnicas del material estabilizados, por lo que fue necesaria la ejecución de una prueba de lixiviación para comprobar la disminución en la velocidad de migración de los contaminantes hacia el medio, es por esta razón que se aplicó el método 1315 de la EPA.

El método EPA 1315 está diseñado para el análisis de metales pesados en un material compactado, en condiciones de liberación controlada por difusión, en función del tiempo de lixiviación. Por lo que este método es aplicable para la determinación de lixiviación de metales pesados en cubos de hormigón debido a que toda la matriz estructural (cubo de hormigón) va a ser sometida al ensayo, generando mejores resultados.

#### **1.4.15 Influencia del pH en la compactación de residuos peligrosos**

Para la aplicación del método EPA fue necesario establecer un control de pH en el agua de lixiviado durante 8 intervalos de 14 días. Según (Orozco et al., 2005) la Figura 16 establece las fases de formas carbonatadas  $CO_2/HCO_3^-/CO_3^{2-}$ , que en el caso del hormigón la presencia de un pH ácido (0-6) se traduce en formación de  $CO_2$  lo que podría causar una disminución de la vida útil del hormigón, mientras que, ante la presencia de un pH alcalino (8-14) donde predominen la presencia de carbonatos puede aumentar la resistencia de los cubos incrementando su vida útil de tal manera que los residuos peligrosos que se encuentren encapsulados en su interior puedan mantenerse dentro de la matriz de hormigón sin representar una liberación de metales hacia el medio, pudiendo contaminar los recursos hídricos e incluso el suelo.



**Figura 16.** Equilibrio entre las formas carbonatadas  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  en función del pH.

Fuente: (Orozco et al., 2005).



## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

Hazwat es una empresa ecuatoriana especializada en la gestión de desechos no peligrosos, peligrosos y especiales que brinda servicios confiables y de alta calidad en recolección, transporte, almacenamiento temporal y disposición final de residuos (Hazwat, 2022). Uno de los procesos con los que cuenta la empresa es la disposición final de residuos tóxicos y peligrosos en celdas de seguridad y estabilización para los residuos de incineración, lámparas fluorescentes, baterías, pilas, escorias, lodos con metales pesados entre otros (Chávez, 2014).

### 2.2 Muestreo de residuos peligrosos

El muestreo de los residuos peligrosos, conforme a las políticas de la empresa, fue realizado por su propio personal, para lo cual se solicitó las cantidades necesarias de cada residuo (Tabla 3), tanto para la caracterización de residuos como para la elaboración de cubos de encapsulamiento. Los residuos fueron entregados por la empresa para su posterior traslado hacia las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional en el edificio 10 de la institución, donde fueron almacenados durante la ejecución de ensayos de caracterización de residuos peligrosos y fundición de cubos de hormigón.

**Tabla 3.** Cantidad de residuos muestreados por la empresa Hazwat.

Tipo de residuo	Cantidad [kg]	Presentación
Ceniza de fondo de cámara de combustión	23	Sólido como sale del incinerador
Escoria de construcción /acería	25	
Vidrio de perfumes	25	Material triturado
Luminarias	20	Material triturado

Debido a que la cantidad de residuos solicitada sobrepaso a la cantidad utilizada para la elaboración de cubos de hormigón, los residuos sobrantes fueron devueltos a la empresa para ser gestionados de manera adecuada.

### 2.3 Análisis físicos de agregados y cemento

Los ensayos descritos a continuación se realizaron sobre la base de la norma ACI211.1 correspondiente a la guía de selección de proporciones para densidad normal y hormigón de alta densidad (American Concrete Institute, 2022), con el objetivo de determinar la

dosificación madre de hormigón necesaria para que los cubos tengan una resistencia a la compresión de  $240 \text{ kgf/cm}^2$ , misma que fue impuesta teóricamente debido a que se consideró hipotéticamente que la adición de residuos a la mezcla puede contribuir a la presencia de planos de falla, causando roturas y disminuyendo la vida útil del producto final.

### **2.3.1 Análisis físicos de agregado grueso (ripio)**

Para la ejecución de todos los ensayos del agregado grueso se adquirieron 40 kg de piedra Rocafuerte #67 (4,75 – 19,0 mm) proveniente de la planta de agregados de la empresa HOLCIM ubicada en el km 4.5 vía Pifo-Papallacta. Los ensayos fueron ejecutados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos (LEMSUR), para la ejecución de los análisis físicos correspondientes al agregado grueso, se necesitó un pretratamiento donde se colocó 40 kg de piedra Rocafuerte en una bandeja y fue secada en un horno a  $110^\circ\text{C}$  durante 24 horas con el objetivo de eliminar cualquier tipo de humedad presente en el agregado.

#### **2.3.1.1 Ensayo peso específico (densidad relativa)**

Este ensayo se basó en la norma ASTM C127-15 correspondiente al “Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción de agregados gruesos”. Se desarrolló con el objetivo de calcular el volumen ocupado por el agregado grueso en la mezcla de hormigón y así determinar la cantidad de agua necesaria para la mezcla de hormigón (ASTM C127-15, 2015).

#### **Procedimiento del ensayo**

- Secar la muestra (40 kg) de ripio en una bandeja dentro de un horno durante 24 horas a una temperatura de  $100^\circ\text{C}$ .
- Pesar 3 kg de ripio seco en una bandeja y lavarlo hasta que no queden impurezas en el agua.
- Sumergir totalmente la muestra de 3 kg previamente lavada en un recipiente durante un periodo de 24 horas.
- Retirar la muestra de 3 kg de ripio y colocarlo sobre una franela para quitar el exceso de agua, para de esta manera llegar a la condición saturado con superficie seca (SSS).
- Registrar el peso de la canastilla sumergible sin el agregado.

- Colocar la muestra de 3 kg de ripio en condición (SSS) dentro de la canastilla sumergible y registrar su peso.
- Secar la muestra de 3 kg en un horno a 110°C durante 24 horas.
- Registrar el peso del material seco.

### **Cálculo de densidad relativa**

Para determinar la densidad relativa del árido grueso se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específico)} = \frac{A}{(B-C)}$$

#### **Ecuación 2.1.** Densidad relativa agregado grueso

Donde:

A = peso del material seco en g.

B= peso del material SSS (saturado con superficie seca) g.

C= peso del material SSS (saturado con superficie seca) sumergido g.

### **2.3.1.2 Ensayo de granulometría**

El ensayo de granulometría se basó en la Norma ASTM C136/C136M-19 correspondiente al “Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos”, este ensayo se efectuó con el fin de establecer la graduación de los materiales que son utilizados como agregados (Tabla 4), para que puedan cumplir con las especificaciones establecidas en la Norma ASTM C33/C33M-18 asegurando su calidad para su posterior uso en cualquier tipo de mezcla para prefabricados de hormigón (ASTM C136/C136M-19, 2020).

#### **Procedimiento del ensayo**

- Pesar 5 kg de muestra seca.
- Seleccionar los tamices a ser utilizados, en base al tamaño máximo nominal del agregado (abertura del tamiz por donde pasa prácticamente todo el material, solo se retiene el 5%), en este caso se procedió a usar la serie de tamices correspondientes al tamaño nominal 1” descritos en la Tabla 4.
- Tamizar el material (muestra de 5 kg) con ayuda de un tamizador mecánico durante al menos 2 minutos.

- Registrar el peso retenido en cada tamiz.
- Calcular y comparar los porcentajes de peso retenidos en cada tamiz con las especificaciones descritas en la normativa ASTM C33/C33M-18 para verificar la calidad del agregado.

#### Selección de serie de tamices utilizados en el ensayo

En la Tabla 4, se muestran las directrices para la selección de juego de tamices (columnas) en base al tamaño nominal (abertura de tamiz donde pasa todo el material a ser analizado), la selección se realiza en base al tamaño nominal del agregado, en este caso se seleccionó el juego de tamices resaltado en color gris dado que el tamaño nominal del agregado correspondiente a 1".

**Tabla 4.** Granulometría de agregado grueso

<b>GRANULOMETRIA AGREGADO GRUESO</b>				
<b>Tamices</b>				
<b>TM (Primer tamiz)</b>	<b>4"</b>	<b>3"</b>	<b>2 ½"</b>	<b>2"</b>
Tamiz 2	3 ½"	2 ½"	2"	1 ½"
Tamiz 3	2 ½"	2"	1 ½"	1"
Tamiz 4	1 ½"	1 ½"	1"	¾"
Tamiz 5	¾"	¾"	1/2"	3/8"
Tamiz 6	.	-	N°4	N°4
<b>Tamices</b>				
<b>1 ½"</b>	<b>1"</b>	<b>¾"</b>	<b>½"</b>	<b>3/8"</b>
1"	¾"	½"	3/8"	N°4
¾"	½"	3/8"	N°4	N°8
½"	3/8"	N°4	N°8	N°16
3/8"	N°4	N°8	N°16	N°50
N°4	N°8	-	N°50	-

Fuente: (ASTM C33/C33M-18, 2018)

#### Cálculos de porcentajes retenidos en cada tamiz

Los porcentajes retenidos en cada tamiz fueron calculados con el objetivo de graficar una curva granulométrica, donde se pueda evaluar el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa ASTM C33/C33M-18 y de esta manera garantizar la calidad del agregado.

- **Porcentaje retenido**

$$\%retenido = \frac{\text{Peso de cada tamiz} \times 100}{\text{Peso total de la muestra}}$$

**Ecuación 2.2.** Cálculo de porcentaje retenido en cada tamiz.

- **Porcentaje retenido acumulado**

$$\%retenido\ acumulado = \frac{\text{Peso retenido en cada tamiz}}{100}$$

**Ecuación 2.3.** Cálculo de porcentaje retenido acumulado en cada tamiz.

- **Porcentaje de material que pasa**

$$\%material\ que\ pasa = 100\% - \%retenido\ acumulado$$

**Ecuación 2.4.** Cálculo de porcentaje de material que pasa.

### **Criterios de graduación para agregados gruesos**

En la Tabla 5 se pueden observar los criterios de graduación (límites máximos permisibles) para agregado grueso.

**Tabla 5.** Criterios de graduación para agregado grueso

Número de tamaño	Tamaño nominal	Cantidades con una fineza mayor a la del tamiz de cada laboratorio, porcentaje en masa				
		25,0 mm (1 pulg)	19,0 mm (3/4")	9,5 mm (3/8")	4,75 mm (N°4)	2,36 mm (N°8)
67	De 19,0 a 4,75 mm de 1/2" a N°4	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5

Fuente: (ASTM C33/C33M-18, 2018)

#### **2.3.1.3 Ensayo de densidad libre y compactada**

Estos se basaron en la Norma ASTM C29/C29M – 17ª referente al “Método de prueba estándar para determinar la densidad a granel y los huecos de aire de un agregado”, este ensayo se desarrolló con el objetivo de determinar los valores de densidad necesarios para establecer una dosificación de hormigón (ASTM C29/C29M, 2020). Para el desarrollo de

este ensayo fue necesario emplear un recipiente cilíndrico de acero con manijas (Figura 17), de acuerdo con las especificaciones establecidas en la Norma ASTM C29/C29M – 17ª el cilindro fue provisto por el LEMSUR para la ejecución de este ensayo.



**Figura 17.** Recipiente cilíndrico de acero utilizado en el ensayo

#### **Procedimiento del ensayo densidad aparente suelta**

- Pesar y registrar las medidas del diámetro y altura del recipiente cilíndrico utilizado en el ensayo.
- Colocar el agregado grueso dentro del recipiente hasta llenarlo completamente, para después con ayuda de una varilla dispuesta de manera horizontal nivelarlo hasta que se llene completamente.
- Pesar y registrar el peso del cilindro con el material adentro.

#### **Cálculo de densidad aparente suelta**

$$\delta_{suelta} = \frac{(P2S - P1)(gr)}{V(cm^3)}$$

**Ecuación 2.5.** Densidad aparente suelta.

Donde:

P2S= Peso del cilindro + material adicionado sin compactar, en g.

P1= Peso del cilindro, en g.

V= Volumen del recipiente, en  $cm^3$ .

#### **Procedimiento del ensayo densidad aparente compactada**

- Pesar y registrar las medidas de diámetro y altura del recipiente cilíndrico utilizado en el ensayo, con el objetivo de determinar su volumen.

- Llenar aproximadamente 1/3 del recipiente con el agregado grueso, nivelar la superficie con los dedos, y con ayuda de una varilla distribuir uniformemente 25 golpes sobre la superficie del agregado.
- Llenar 2/3 del recipiente con el agregado grueso, nivelar y golpear 25 veces con la varilla.
- Llenar todo el recipiente cilíndrico, nivelar hasta que todo el material se distribuya uniformemente y golpear 25 veces con la varilla.
- Pesar y registrar el peso del recipiente.

#### **Cálculo densidad aparente compactada**

$$\delta_{compactada} = \frac{(P2C - P1)(gr)}{V(cm^3)}$$

#### **Ecuación 2.6.** Densidad aparente compactada.

Donde:

P2C= Peso del cilindro + material adicionado compactado, en g.

P1= Peso del cilindro, en g.

V= Volumen del recipiente, en  $cm^3$ .

#### **2.3.1.4 Ensayo de abrasión**

Este ensayo se fundamentó en la Norma ASTM C131/C131M-20 referente al 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 Ángeles”.

Este método sirve para determinar la degradación de los agregados frente a una combinación de acciones de abrasión, desgaste, impacto y molienda simuladas en la máquina de “Los Ángeles”. Esta prueba se realizó una única vez con el objetivo de establecer la calidad del agregado (ASTM C131/C131M-20, 2022a).

#### **Procedimiento del ensayo**

- Recolectar una muestra de 5 kg de agregado, establecido en base a la tabla 6, tomando en cuenta que el tamaño del material se encontraba entre  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ ". La muestra del agregado se conformó por 2500 g de material que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ " y se retiene en el tamiz  $\frac{1}{2}$ ", mientras que la otra mitad, se conformó por los 2500 g restantes del tamizaje del material que pase por el tamiz  $\frac{1}{2}$ " y que se retenga en el

tamiz 3/8". Asimismo, el número de esferas utilizada se basó en la tabla 6 respecto a la gradación de la columna B la cual indica que se deben colocar 11 esferas de acero dentro de la máquina de "Los Ángeles" para lograr la simulación de las condiciones de abrasión y desgaste del material.

- Colocar la muestra de 5000 g y las 11 esferas de acero dentro de la máquina de "Los Ángeles", encender el equipo y dejar que la máquina gire a una velocidad de 30 a 33 r/min durante 100 revoluciones (aproximadamente 3 minutos).
- Tamizar el material resultante de la máquina de "Los Ángeles" por el tamiz N°12.
- Colocar el material tamizado dentro de la máquina de Los Ángeles junto con las 11 esferas de acero y dejar que la máquina gire a una velocidad de 30 a 33 r/min durante 400 revoluciones (aproximadamente 12 minutos).
- Tamizar nuevamente el material recolectado por el tamiz N°12 y registrar su peso.

**Tabla 6.** Abrasión para agregados con tamaño menos a 1 ½".

ABRASIÓN PARA AGREGADOS CON TAMAÑO MENOR A 1 ½"				100 y 500 REV	TOTAL 500 REV
Tamices		Pesos (g) y gradaciones			
PASA	RETENIDO	A	B	C	D
1 ½"	1"	1250±25			
1"	¾"	1250±25			
¾"	½"	1250±25	2500±10		
½"	3/8"	1250±25	2500±10		
3/8"	¼"			2500±10	
¼"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>TOTAL</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
<b>#ESFERAS</b>		12	11	8	6

Fuente: (ASTM C33/C33M-18, 2018)

#### Cálculo de porcentaje de pérdida por abrasión

$$\text{Porcentaje de pérdida} = \left[ \frac{(C - Y)}{C} \right] \times 100$$

**Ecuación 2.7.** Porcentaje de pérdida por abrasión.



Donde:

C = masa de la muestra de prueba original, en g.

Y = masa final de la muestra después de 400 revoluciones, en g.

### **2.3.2 Análisis físicos al agregado fino (arena)**

Para el desarrollo de todos los ensayos físicos del agregado fino se adquirieron 30 kg de Arena no lavada con una granulometría de 0-4,75mm, proveniente de la planta de agregados de la empresa HOLCIM ubicada en el km 4.5 vía Pifo-Papallacta. Los ensayos fueron ejecutados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos (LEMSUR), siguiendo el pretratamiento establecido en el *ítem 2.3.1*.

#### **2.3.2.1 Ensayo de peso específico (densidad relativa)**

El desarrollo de este ensayo se basó en la Norma ASTM C128 referente al “Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino. Este método se utilizó con el objetivo de calcular el volumen ocupado por el agregado en la mezcla de hormigón y de esta manera determinar la dosificación más adecuada (ASTM C128-22, 2023).

#### **Procedimiento del ensayo**

- Pesar 300 g de arena y sumergirla en agua durante 24 horas.
- Colocar la muestra de 300 g de arena en una bandeja y llevarla al horno a una temperatura de 100°C durante aproximadamente 10 minutos o hasta que la muestra llegue a la condición SSS (saturado con superficie seca), esto se puede comprobar introduciendo la arena dentro de un cono hueco y compactándolo con una varilla, dejándola caer durante 25 veces hasta que el cono quede totalmente lleno, una vez lleno se retira el cono y si el material se desmorona parcialmente se obtuvo correctamente la condición SSS (Figura 18 ).
- Colocar 300 g de arena en condición SSS dentro de un matraz de 500 ml.
- Aforar el matraz con agua destilada.
- Extraer el aire del matraz en dos fases, la primera fase consta de una extracción manual girando suavemente el matraz, mientras que la segunda utiliza una bomba de vacío para la extracción de aire durante aproximadamente 5 minutos.
- Registrar el peso del matraz.



**Figura 18.** Condición SSS

#### **Cálculo de la densidad relativa del agregado fino**

$$\text{Densidad relativa (peso específico)} = \frac{S_1 x \left(\frac{A}{S}\right)}{0,9975(R_2 - R_1)}$$

**Ecuación 2.8.** Densidad relativa del agregado fino.

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno, g.

$S_1$  = masa del espécimen saturado con superficie seca (utilizado en el procedimiento volumétrico para la densidad y la densidad relativa (gravedad específica)), g.

S = masa de muestra saturada superficialmente seca (utilizada en el procedimiento gravimétrico, para determinar la densidad y la densidad relativa (gravedad específica) o para determinar la absorción, con ambos procedimientos), g.

$R_2$  = lectura inicial del nivel del agua en el matraz Le Chatelier, ml.

$R_1$  = lectura inicial del nivel del agua en el matraz Le Chatelier, ml.

#### **2.3.2.2 Ensayo de granulometría**

La ejecución de este ensayo se basó en la Norma ASTM C136/C136M-19 referente a "Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos".

El ensayo se desarrolló con el objetivo de determinar la graduación del agregado fino y

garantizar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas, y de esta manera garantizar la calidad del agregado (ASTM C136/C136M-19, 2020).

### Procedimiento del ensayo

- Pesar 500 g de muestra de arena previamente seca.
- Seleccionar tamices con aberturas adecuadas, en este caso se seleccionó la serie de tamices correspondiente a 3/8, 4/8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200.
- Agregar la muestra de 500 g dentro de la serie de tamices y tamizar manualmente durante 5 minutos.
- Pesar y registrar el peso retenido en cada tamiz y realizar el gráfico de curva granulométrica.

### Cálculo del porcentaje retenido en cada tamiz

Los porcentajes retenidos en cada tamiz fueron calculados en base a las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4 con el objetivo de graficar una curva granulométrica, donde se pueda evaluar el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa ASTM C33/C33M-18 (ANEXO XIX) y de esta manera garantizar la calidad del agregado.

### Criterios de graduación para agregados finos

**Tabla 7.** Criterios de graduación para agregados finos

Número de tamiz	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	100
4	95 a 100
8	80 a 100
16	50 a 85
30	25 a 60
50	5 a 30
100	0 a 10
200	0 a 3

Fuente: (ASTM C33/C33M-18, 2018)

### 2.3.2.3 Ensayo de densidad libre y compactada

Los ensayos se fundamentaron en la Norma ASTM C29/C29M-17<sup>a</sup> referente al "Método de prueba estándar para determinar la densidad a granel ("peso unitario") y los huecos de aire de un agregado". Estos ensayos se desarrollaron con el objetivo de seleccionar los valores

de densidad a granel necesarios para el establecimiento de la proporción en la mezcla de hormigón (ASTM C29/C29M, 2020). Para la ejecución de los ensayos se utilizó un molde cilíndrico de acero (Figura 17).

#### **Procedimiento del ensayo densidad aparente suelta**

- Pesar y registrar las medidas del diámetro y altura del recipiente cilíndrico utilizado en el ensayo.
- Colocar el agregado fino dentro del recipiente hasta llenarlo completamente, para después nivelarlo hasta que se llene completamente.
- Pesar y registrar el peso del cilindro con el material adentro.

#### **Cálculo de densidad aparente suelta**

El cálculo de la densidad aparente suelta se realizó en base a la *ecuación 2.5* descrita en el ítem 2.3.1.3.

#### **Procedimiento del ensayo densidad aparente compactada**

- Pesar y registrar las medidas de diámetro y altura del recipiente cilíndrico utilizado en el ensayo, con el objetivo de determinar su volumen.
- Llenar aproximadamente 1/3 del recipiente con el agregado fino, nivelar la superficie con los dedos, y con ayuda de una varilla distribuir uniformemente 25 golpes sobre la superficie del agregado.
- Llenar 2/3 del recipiente con el agregado fino, nivelar y golpear 25 veces con la varilla.
- Llenar todo el recipiente cilíndrico, nivelar hasta que todo el material se distribuya uniformemente y golpear 25 veces con la varilla.
- Pesar y registrar el peso del recipiente.

#### **Cálculo densidad aparente compactada**

El cálculo de la densidad aparente compactada fue realizado en base a la *ecuación 2.6* descrita en el ítem 2.3.1.3.

#### **2.3.2.4 Ensayo de contenido orgánico**

El ensayo de contenido orgánico se desarrolló únicamente para el agregado fino debido a que este material es más propenso a retener la materia orgánica debido al tamaño de sus

partículas, la ejecución de este se basó a la Norma ASTM C40/C40M-20 (ANEXO VIII) referente al “Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para hormigón”. Este ensayo se desarrolló con el objetivo de determinar la aceptabilidad del agregado con respecto a las especificaciones de la norma ASTM C33/C33M referentes a especificaciones estándar para agregados de hormigón para garantizar la calidad y trabajabilidad del agregado para su incorporación a la mezcla de hormigón (ASTM C40/C40M-20, 2020a).

### Procedimiento del ensayo

- Llenar con agregado fino una botella de vidrio graduada hasta la marca de 130 ml.
- Añadir una solución de hidróxido de sodio al 3% hasta aforar a la marca de 200 ml
- Dejar reposar la botella durante 24 horas.
- Comparar la coloración del líquido con la escala colorimétrica indicada en la (figura 19).



**Figura 19.** Escala colorimétrica utilizada para el ensayo

- Si la coloración del material se encuentra entre la escala 1-3 es considerado apto para su utilización en matrices de hormigón.

### 2.3.3 Análisis físicos del cemento

Para la ejecución de los ensayos físicos del cemento y la fundición de cubos de hormigón se adquirieron 2 sacos de 50 kg de cemento Armaduro.

### 2.3.3.1 Ensayo densidad real del cemento

El ensayo de densidad real del cemento se fundamentó en la Norma ASTM C188-17 referente al “Método de prueba estándar para determinar la densidad del cemento hidráulico”, se realizó con el objetivo de determinar densidad del cemento utilizado en el proyecto debido a que se encuentra estrechamente relacionada con el diseño y control de dosificaciones de hormigón (ASTM C188-17, 2023).

#### Procedimiento del ensayo

- Pesar 64 g de cemento Armaduro
- Llenar el frasco de Le Chatelier con gasolina hasta la marca de entre  $0 \text{ cm}^3$  y  $1 \text{ cm}^3$ .
- Registrar el volumen y el peso del frasco de Le Chatelier.
- Sumergir el frasco de Le Chatelier con gasolina en un recipiente con agua hasta que alcance una temperatura de  $23^\circ\text{C} \pm 2$ .
- Introducir los 64 g de cemento dentro del frasco, procurando que el cemento no toque las paredes de este ya que puede quedarse pegado en las paredes y evitar la introducción de toda la muestra.
- Colocar el tapón al frasco de Le Chatelier y someterlo a agitación manual para eliminar el exceso de aire dentro del frasco.
- Registrar el volumen y el peso final del frasco

#### Cálculo de la densidad real del cemento

$$\delta_{Real} = \frac{P2 - p1 (g)}{V2 - v1 (cm^3)}$$

#### Ecuación 2.9. Densidad real del cemento

Donde:

$\delta_{Real}$  = densidad real del cemento ( $g/cm^3$ )

p1 = peso del frasco con gasolina (g)

P2 = peso del frasco con gasolina y cemento (g)

V1 = corresponde a la lectura de volumen del frasco ( $cm^3$ )

V2 = Lectura del volumen desplazado en el cuello del frasco ( $cm^3$ )

## **2.4 Análisis físicos a los residuos peligrosos**

### **2.4.1 Homogenización de muestras**

Antes de la ejecución de cualquier ensayo en los residuos peligrosos, se procedió a aplicar un pretratamiento a las muestras con el objetivo de que exista homogeneidad y se puedan manipular con facilidad se trituraron todas las muestras de residuos peligrosos (luminarias, vidrio triturado, ceniza de cámara de combustión, escoria de incineración) por separado con ayuda de un mortero, después las muestras fueron tamizadas y colocadas en diferentes canastillas dependiendo del ensayo a realizarse.

### **2.4.2 Medición de pH a las muestras**

La medición de pH en los residuos peligrosos es importante ya que según (Referenz, 2020) este parámetro puede determinar qué tan bien se adhieren los residuos peligrosos al hormigón con el tiempo. Dado que el hormigón tiene un pH alcalino entre 12,5 y 13,5 por lo que mientras más básico sea el pH presente en los residuos, se presenta una mayor afinidad, dando como resultado una buena compactación entre los residuos y la matriz de hormigón que en el caso del presente proyecto se presenta en forma de cubos.

El ensayo se realizó en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la Escuela Politécnica Nacional, para la ejecución se tomó como referencia al procedimiento de Standard Methods 4500- $H^+$  pH (Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2018).

#### **Procedimiento del ensayo**

- Realizar una dilución 1:10 (residuos-agua destilada) agregar 3 g de muestra dentro del Erlenmeyer con 100 ml de agua destilada y someterlo a agitación continua de 300 rpm durante una hora, con ayuda de un agitador magnético.
- Con ayuda de un embudo y papel filtro, se procedió a filtrar la muestra y colocarla en vasos de precipitación.
- Medir la muestra filtrada con ayuda del equipo multiparamétrico.
- Registrar los valores obtenidos.

### **2.4.3 Ensayo de contenido de humedad en residuos peligrosos**

El ensayo de humedad se realizó a los materiales a ser encapsulados para determinar su contenido neto de agua y de esta manera determinar la concentración de metales pesados

en base seca presentes en cada muestra para de esta manera realizar una comparación con los límites máximos permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal 404.

Los residuos sometidos a este ensayo fueron: luminarias, vidrio de perfumes, escoria de incineración y ceniza de cámara de combustión. Estos ensayos siguieron la Norma ASTM C566-97 de contenido de humedad total de agregados (American Society for Testing and Materials, 2004).

Los análisis se desarrollaron en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la Escuela Politécnica Nacional.

### **Procedimiento de ejecución del ensayo**

- Lavar los crisoles, para después tararlos usando un horno de secado a una temperatura de 100°C durante 2 horas.
- Retirar los crisoles del horno de secado y colocarlos dentro de los desecadores por una hora.
- Pesarse, registrar y etiquetar el peso de los crisoles con ayuda de una balanza analítica.
- Pesarse aproximadamente 10 g de muestra por cada residuo y colocarlo en cada crisol.
- Colocar los crisoles con los residuos peligrosos dentro del horno de secado a una temperatura de 100°C durante 24 horas.
- Una vez transcurrido el tiempo establecido, retirar los crisoles y colocarlos en el desecador por una hora.
- Pesarse y registrar los datos.

### **Cálculo de porcentaje de humedad en base seca**

$$Hbs (\%) = \left( \frac{Mh - Ms}{Ms} \right) \times 100\%$$

**Ecuación 2.10.** Porcentaje de humedad en base seca.

Donde:

Hbs= Porcentaje de humedad en base seca total, en %.

Mh= Peso del crisol y el material húmedo, en g.

Ms= Peso del crisol y el material seco, en g.



#### **2.4.4 Ensayo de sulfatos en residuos peligrosos**

El ataque de sulfatos dentro del hormigón actúa como un mecanismo de degradación agresiva que afecta directamente a la durabilidad de la estructura produciendo corrosión producida principalmente por la reacción entre los iones de sulfato y productos utilizados para la hidratación de hormigón (agua) (Catur, 2021). El ensayo de contenido de sulfatos en los residuos peligrosos se ejecutó con el objetivo de identificar la concentración presente en cada residuo peligroso a ser utilizado para el encapsulamiento, ya que según (Bernal Camacho et al., 2013) la presencia de sulfatos en la mezcla de hormigón puede dar lugar a una tipología de fisuración irregular, que facilita la existencia de planos de falla o rupturas, constituyendo un mecanismo de degradación sumamente agresivo, ya que actúa directamente sobre la integridad de la matriz cementicia modificando sus características de diseño.

Por lo que si alguno de los residuos peligrosos presenta un alto contenido de sulfatos podría ocasionar una rápida degeneración en los cubos de hormigón reduciendo su vida útil. El presente ensayo se desarrolló por duplicado en cada una de las muestras de residuos peligrosos (cenizas de cámara de combustión, vidrio, luminaria y escoria de incineración) en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la Escuela Politécnica Nacional, tomando como referencia al procedimiento de "Standard Methods 4500 SO<sub>4</sub> SULFATE" utilizando el método 8051 del manual HACH (Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2018b).

##### **Procedimiento del ensayo HACH**

- Pesar aproximadamente 3 g de muestra por cada residuo y colocarlo en crisoles previamente tarados.
- Colocar 100 ml de agua destilada en un Erlenmeyer.
- Con el objetivo de realizar una dilución 1:10 agregar 3 gramos de muestra dentro del Erlenmeyer con 100 ml de agua destilada y someterlo a agitación continua de 300 rpm durante una hora, con ayuda de un agitador magnético.
- Filtrar la muestra y colocarla en vasos de precipitación.
- Llenar una celda del espectrofotómetro con 10 ml de muestra filtrada.
- Agregar el contenido de un sobre de polvo reactivo SulfaVer 4 a la celda de muestra, agitar vigorosamente para disolver el polvo.

- Limpiar cuidadosamente la celda y colocarla en el espectrofotómetro durante 5 minutos para obtener una lectura del contenido de sulfatos.
- Para preparar el blanco y encerar el equipo llenar una segunda celda de muestra cuadrada con 10 ml de agua destilada y el sobre de polvo reactivo.
- Realizar el procedimiento con cada una de las muestras de residuos peligrosos (luminaria, vidrio, escoria y ceniza).

## **2.5 Caracterización inicial de metales pesados presentes en los residuos**

El ensayo de contenido de metales presentes en las muestras de residuos peligrosos (luminarias, vidrio, escoria y ceniza) se realizó con el objetivo de determinar la concentración de metales pesados y compararlos con los límites máximos permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal 404, Resolución No 002-SA, Secretaría de Ambiente. Los ensayos de caracterización de metales pesados en residuos peligrosos fueron desarrollados en dos etapas debido a que los residuos se encontraban en estado sólido y para poder analizar las muestras en el espectrofotómetro de absorción atómica se necesitaban muestras en estado líquida.

En la primera etapa se realizó una digestión de muestras, este procedimiento fue realizado en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA), mientras que la segunda etapa referente al análisis de espectrofotometría de absorción atómica en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX).

### **Procedimiento del ensayo de digestión de muestras**

En primer lugar, se realizó la homogenización de las muestras mediante el triturado, secado y tamizaje de residuos peligrosos con el objetivo de tomar una muestra representativa para la posterior ejecución del ensayo de digestión de muestras.

### **Pretratamiento de muestras de residuos peligrosos**

- Lavar y tarar crisoles para el pesaje de muestras.
- Triturar y tamizar cada muestra húmeda de residuos peligrosos (ceniza, escoria de fundición, luminaria y vidrio triturado).
- Pesar 100 g de cada muestra húmeda de residuos peligrosos (ceniza, escoria de fundición, luminaria y vidrio triturado).

- Secar las muestras dentro de un horno de secado a una temperatura de 100°C durante 24 horas.
- Colocar los crisoles dentro de desecadores y dejar enfriar.
- Pesar 0,25 g de cada muestra de residuos peligrosos seca.

#### **Procedimiento digestión de muestras (ácido nítrico/perclórico)**

- Pesar 0,25 g de muestra (luminarias, escoria de incineración, vidrio triturado y ceniza) previamente homogeneizada, en base al apartado anterior.
- Programar el Digestor HACH DRB 200 a una temperatura de 150°C por 30 minutos.
- Colocar en un tubo de digestión (uno por cada muestra) 4 ml de  $HNO_3$ , 1 ml  $HClO_4$  y 0,25 g de la muestra pesada anteriormente.
- Homogeneizar suavemente el tubo de digestión mediante movimientos invertidos.
- Colocar los tubos dentro del digestor y digestar la muestra por 30 minutos.
- Dejar enfriar las muestras.
- Filtrar con ayuda de un filtro cualitativo.
- Colocar las muestras filtradas dentro de matraces de 50 ml y aforar con agua destilada.
- Trasvasar las muestras a frascos de vidrio.
- Etiquetar.

Finalmente, las muestras procesadas fueron analizadas en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX) donde personal interno calificado determinó la concentración de metales pesados por medio del análisis de espectrofotometría de absorción atómica empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300.

## **2.6 Encapsulamiento de residuos peligrosos**

Los residuos peligrosos fueron trasladados hacia las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional para su posterior almacenamiento en el Laboratorio de Hidráulica. En el caso del vidrio de perfumes y luminarias fueron sometidas a un pretratamiento donde se trituró manualmente el material para que se adapte a las condiciones necesarias para la mezcla de hormigón.

### 2.6.1 Dosificación del hormigón madre

Teniendo en cuenta que la dosificación madre se describe como la dosificación de hormigón conformada por arena, ripio, cemento y agua. Se tomó como referencia al método (ACI211.1, Weymouth, Fuller, Bolomer, Faury) correspondiente a la dosificación de mezclas de hormigón. Para ello se estimó una resistencia a la compresión de hormigón de  $240 \text{ kgf/cm}^2$  debido a que según (Gutierrez, 2007) menciona que la adición de residuos peligrosos a la mezcla de hormigón tiene como consecuencia la disminución de su resistencia, incrementando fisuraciones que pueden causar daños en la estructura. La dosificación fue realizada por el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) (Tabla 6).

Una vez obtenida la dosificación madre, se procedió con la fundición de 4 testigos de hormigón (Figura 20). Después los testigos fueron sometidos a ensayos de compresión para comprobar que se cumpla con la resistencia establecida de  $240 \text{ kgf/cm}^2$ .



Figura 20. Fundición de testigos de hormigón

### 2.6.2 Dosificación de menús de encapsulamiento

En base a la dosificación madre de hormigón y a los resultados de las concentraciones de metales pesados se establecieron cuatro dosificaciones experimentales de reemplazo de agregados por residuos peligrosos correspondientes al 5, 10, 15, y 20 %. Dado que en base al estudio de (G. Benavides et al., 2015) se estableció como porcentaje óptimo de reemplazo de agregados por residuos peligrosos al 15 %, sin embargo, se tomaron tres dosificaciones de reemplazo adicionales (dos porcentajes por debajo de la media y un sobre) dado que se pretendió utilizar la mayor cantidad de residuos peligrosos para optimizar la gestión de estos.

Para la dosificación establecida en la Tabla 8 se tomó como constante la cantidad de agua y cemento debido a sus características, en el caso del cemento debido a su alta resistencia inicial y el agua debido a la maleabilidad de la mezcla.

Mientras, que el resto de los agregados (arena, ripio) tuvieron un reemplazo de 20% de ripio ya que este material fue reemplazado únicamente por escoria de incineración, por otro lado la arena tuvo un reemplazo del 80% dado que fue reemplazada por luminaria, vidrio y ceniza.

Una vez establecido el porcentaje de reemplazo de agregados se estableció el porcentaje de reemplazo se estableció un porcentaje de sustitución interna de residuos donde se tomó 30 % de luminarias dado que presentaron altas concentraciones de mercurio (cerca de 8,34 mg/kg), 30 % ceniza de cámara de combustión, debido a sus altas concentraciones de níquel (125,15 mg/kg), zinc (879,94 mg/kg) y arsénico (207,27 mg/kg), 20 % escoria de construcción y 20 % de vidrio (estos residuos se utilizaron en menor cantidad debido a que no presentaron valores tan altos de metales pesados). Los valores se pueden observar en la Tabla 23 (contenido de metales en residuos peligrosos).

**Tabla 8.** Dosificación para encapsulamiento de residuos peligrosos.

Componentes	Dosificación reemplazo 5% de residuos por material de construcción		Dosificación reemplazo 10% de residuos por material de construcción		Dosificación reemplazo 15% de residuos por material de construcción		Dosificación reemplazo 15% de residuos por material de construcción					
	Porcentaje	Peso [kg]	Porcentaje	Peso [kg]	Porcentaje	Peso [kg]	Porcentaje	Peso [kg]				
Ceniza	30	100	0,27	30	100	0,54	30	100	0,81	30	100	1,08
Luminaria	30		0,27	30		0,54	30		0,81	30		1,08
Escoria	20		0,18	20		0,36	20		0,54	20		0,72
Vidrio	20		0,18	20		7,95	20		0,54	20		0,72
Arena	80	100	8,67	80	100	8,23	80	100	7,23	80	100	6,51
Ripio	20		8,41	20		4,51	20		8,05	20		7,87
Cemento	-	-	4,51	-	-	4,51	-	-	4,51	-	-	4,51
Agua	-	-	2,93	-	-	2,93	-	-	2,93	-	-	2,93

### 2.6.3 Fundición de cubos de encapsulamiento

Para la fundición de cubos de encapsulamiento se necesitó alrededor de 1 saco de 50 kg de cemento Armaduro, 40 kg de ripio, 30 kg de arena, en el caso de la arena y el ripio fueron secados previamente en un horno a 110°C durante 24 horas.

#### Procedimiento de fundición de cubos de encapsulamiento

- Pesar los agregados, cemento y residuos peligrosos de acuerdo con las cantidades establecidas en la Tabla 8.
- Engrasar el encofrado con aceite reutilizado para facilitar la separación de los cubos y evitar que la mezcla de hormigón se pegue en las paredes del encofrado.
- Adicionar los materiales secos (cemento, arena, luminaria, vidrio, ceniza y ripio) en una bandeja grande, para después adicionar agua.
- Mezclar manualmente hasta formar una pasta homogénea.
- Colocar la mezcla dentro del molde de encofrado y etiquetar los cubos de acuerdo con el porcentaje de sustitución de materiales de construcción por residuos peligrosos.
- Fragar el hormigón (dejarlo en el molde durante 24 horas)
- Curar los cubos (una vez transcurridas las 24 horas, sacarlo del molde, dejarlo secar por un día y colocarlos en la cámara de curado durante 7 días (Figura 21).



Figura 21. Cámara de curado

Resultado de la fundición se obtuvieron 3 cubos por cada dosificación de remplazo de residuos peligrosos por material de construcción (5, 10, 15, 20 %), dando un total de 12 cubos. Adicionalmente se fundieron 3 cubos de la dosificación madre, es decir cubos que únicamente estén conformados por arena, ripio y cemento dando un total de 15 cubos de hormigón.

## 2.7 Pruebas mecánicas en cubos de encapsulamiento

Para la ejecución de las pruebas mecánicas se tomó como referencia a la Norma Chilena Oficial ( NCh1037) referente a “Ensayos de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas” (Henríquez et al., 1977) para ello, se utilizó un cubo de encapsulamiento por dosificación y un cubo de blanco. Inicialmente se pesó y midió cada bloque registrando las dimensiones de este, con el objetivo de obtener el área de contacto ( $cm^2$ ).

Después, con ayuda del equipo “Universal Testing Machine UH-F500kNX” se sometió a los cubos a la fuerza ejercida por el equipo hasta conseguir la rotura parcial de estos (Figura 22). La rotura se realizó a los 7 días ya que se utilizó el cemento Armaduro con alta resistencia inicial. Para obtener una alta eficiencia en los resultados y poder continuar con los ensayos de lixiviación.



**Figura 22.** Ensayo de compresión

## 2.8 Ensayo de lixiviación

Luego de obtener los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y evidenciar que los cubos cumplan con la resistencia mínima de  $210 \text{ kgf/cm}^2$  establecida en la normativa INEN 1688 se sometieron a ensayos de lixiviación.

El ensayo fue ejecutado sobre la metodología establecida en la EPA 1315 correspondiente a las tasas de transferencia de masa de constituyentes en materiales monolíticos o compactos, el ensayo se dividió en dos etapas, la primera referente a la ejecución de un ensayo de humedad a los cubos de hormigón y la segunda referente a la lixiviación.

### Procedimiento del ensayo de humedad a los cubos de hormigón

- Pesar los cubos húmedos.
- Colocar a los cubos en un horno a  $100^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.
- Sacar los cubos del horno y colocarlos dentro de un desecadores.
- Pesar y registrar los pesos de los cubos de hormigón.

### Procedimiento de lixiviación de metales pesados

Para la ejecución del ensayo se utilizaron 9 baldes de plástico de 20 litros de capacidad, 9 bases de PVC de 2 cm de altura, alrededor de 50 litros de agua destilada, 9 frascos de 150 ml para muestras de orina estériles y un rollo de papel film.

- Realizar triple lavado a materiales utilizados en el ensayo (baldes y bases de PVC) con una dilución de ácido fosfórico.
- Identificar un lugar inmóvil y colocar los baldes de forma ordenada.
- Colocar dentro de los baldes las bases de PVC.
- Colocar sobre las bases de PVC los cubos de hormigón.
- Llenar con agua destilada los baldes hasta cubrir por completo los cubos de hormigón.
- Cubrir con papel film la superficie de los baldes para evitar cualquier tipo de interferencia en la ejecución del ensayo.
- Medir en 8 intervalos de 14 días el pH y conductividad del agua destilada.
- Filtrar la muestra de agua destilada, una vez transcurrido 112 días de ensayo.



- Colocar 150 ml de muestra en frascos estériles y analizarlos por espectrofotometría de absorción atómica de los metales (As, Cd, Pb, Ni, Zn, Cr, Hg, Mn) en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX).

### **Análisis de lixiviados**

Posterior al ensayo de lixiviación se procedió a analizar el contenido de metales pesados normados en la Ordenanza Municipal 404 (As, Cd, Pb, Ni, Zn, Cr, Hg, Mn) procedentes de la filtración del agua de lixiviado de los cubos de hormigón. La cuantificación de metales se realizó empleando el Espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 300, para esto las muestras de agua de lixiviación resultado de la aplicación del método 1315 EPA fueron analizadas internamente por el DEMEX.

## **3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **3.1 Residuos para encapsulamiento**

En la Tabla 9, se especifican los residuos seleccionados para la conformación de bloques de encapsulamiento de residuos peligrosos.

**Tabla 9.** Residuos peligrosos usados para encapsulamiento.

<b>Residuos Peligrosos</b>	<b>Características</b>	<b>Lugar de procedencia</b>
Luminarias	Ya no mantienen vapor de mercurio debido a que tienen un tratamiento previo mediante el uso del destructor de luminarias.	Todo tipo de luminarias (focos ahorradores, fluorescentes)
Vidrio triturado	Mezcla de vidrios	Frasco de perfumes, frascos de ampollas o vidrio vacías de varios medicamentos
Escoria de incineración	Residuo de incineración	Residuos de escoria de asfalto sometidos al proceso de incineración.
Ceniza de cámara de combustión	Residuos del proceso de incineración	Cenizas de incineración residuos varios gestionados por la empresa

## 3.2 Resultados de la caracterización de análisis de agregados y cemento

La aplicación de los ensayos de caracterización física de los agregados y cemento se utilizó principalmente para establecer el cumplimiento de los requisitos contemplados en la norma ACI 211.1 referente a la dosificación de mezclas de hormigón.

### 3.2.1 Análisis físicos de agregado grueso (ripio)

#### 3.2.1.1 Resultado de ensayo de peso específico (densidad relativa)

El peso específico se define como la proporción entre la masa del agregado grueso y la masa de un volumen de agua igual al volumen de las partículas del agregado. (ASTM C127-22, 2023b). A continuación, en la Tabla 10 se muestran los resultados del ensayo de peso específico para agregado grueso obtenido a partir de los valores señalados en el Anexo 3 obtenidos mediante el ensayo descrito en el *ítem 2.3.1.1*.

**Tabla 10.** Resultados de ensayo de peso específico agregado grueso.

<b>Agregado grueso (Norma ASTM C127)</b>			
<b>Gravedad específica y absorción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ficha técnica Piedra Rocafuerte #67</b>
Densidad relativa seca	2,40	-	-
Densidad relativa SSS	2,50	-	2,6
Absorción de agua	4,00	%	-

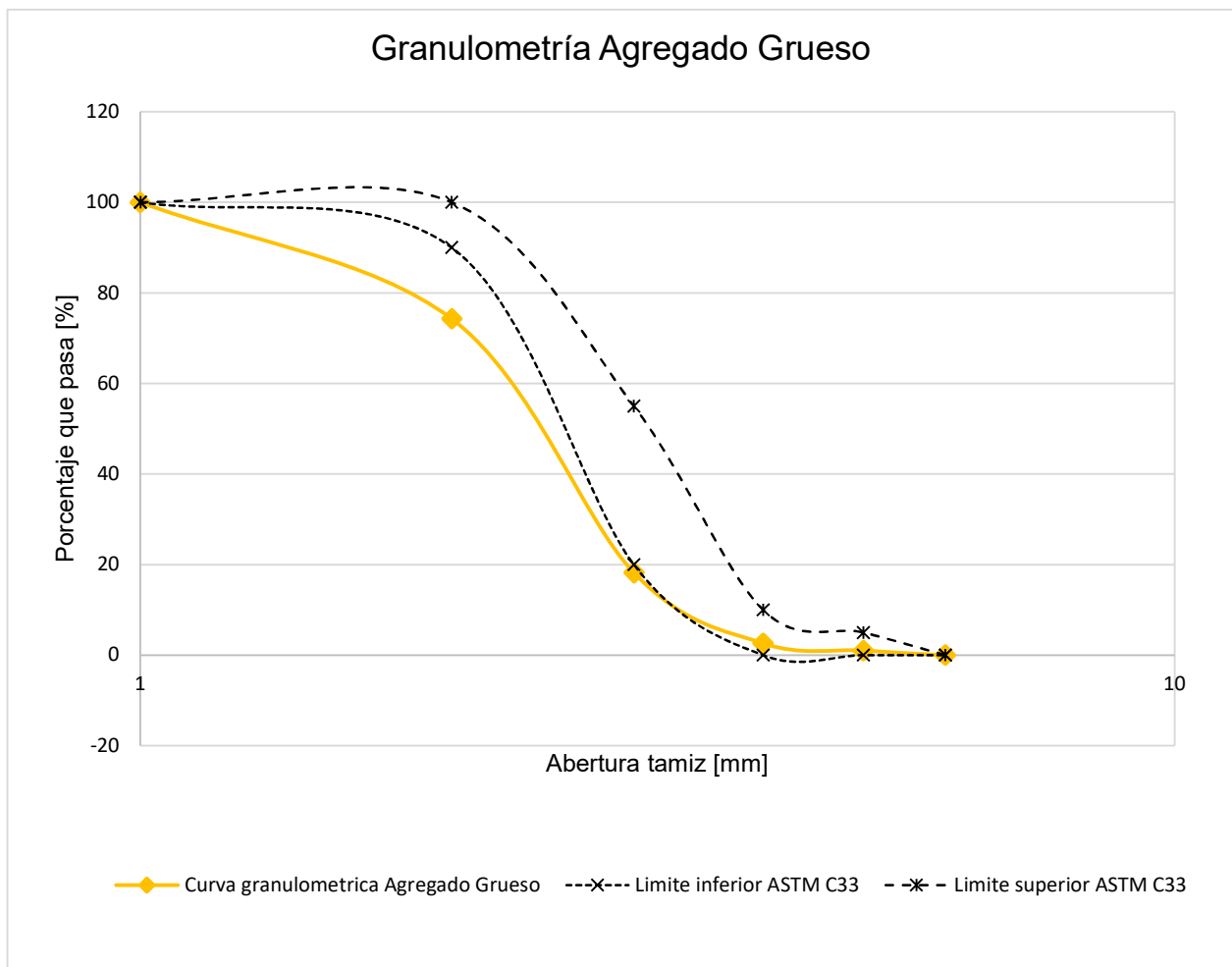
En base a los resultados de la Tabla 10 se obtuvo que la densidad relativa del agregado grueso, tanto en base seca como en la condición de Saturado con Superficie Seca (SSS) es mayor a 2 por lo que se puede decir que el agregado presenta una baja absorción de agua para la conformación de la mezcla de hormigón, lo cual facilitó la trabajabilidad de la mezcla. Por otro lado, al comparar los valores obtenidos en el ensayo experimental con los establecidos en la ficha técnica del producto (Piedra Rocafuerte #67) se pudo comprobar que cumple con los datos técnicos, garantizando la calidad del agregado y cumpliendo con

el listado de ensayos necesarios para el establecimiento de una dosificación de hormigón establecidos en la norma (American Concrete Institute, 2022).

### 3.2.1.2 Resultados de ensayo de granulometría

La ejecución del ensayo de granulometría para el agregado grueso se realizó con el objetivo de determinar el cumplimiento de la distribución de tamaño de partículas establecidos en la norma ASTM C33/C33M-18 referente a las especificaciones estándar para agregados de hormigón (ASTM C33/C33M-18, 2018).

Por otro lado, en el Anexo 4 se muestran los datos generados a partir del ensayo para la construcción de la curva granulométrica del agregado grueso. Como se puede apreciar en la Figura 23, la curva granulométrica del agregado (color amarillo) se encuentra dentro de la faja de cumplimiento establecida bajo los límites de la Norma ASTM C33 (líneas de color negro), por lo que se considera apto para utilizarse en la elaboración de cubos de hormigón asegurando así su calidad.



**Figura 23.** Distribución granulométrica del agregado fino

### 3.2.1.3 Resultados de ensayo de densidad libre y compactada

Para la determinación de estos resultados se utilizó la metodología correspondiente a la norma ASTM C29, teniendo en cuenta que la densidad aparente se utiliza para determinar los valores de densidad a granel necesarios para la selección de proporciones para mezclas de hormigón (ASTM C29/C29M-17a, 2020). A continuación, en la Tabla 11 se muestran los resultados de densidad obtenidos, en base a los datos adquiridos mediante la ejecución del ensayo presentados en el Anexo 3.

**Tabla 11.** Resultados de ensayos de densidad aparente

Agregado grueso					
Densidad aparente	Resultados ensayo ASTM C29		Ficha técnica “Piedra Rocafuerte #67”		Porcentaje de error [%]
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	
Densidad suelta	1260	<i>kgf/m<sup>3</sup></i>	1294,5	<i>kgf/m<sup>3</sup></i>	2,66
Densidad compactada	1380	<i>kgf/m<sup>3</sup></i>	1451,2	<i>kgf/m<sup>3</sup></i>	4,90

Como se puede apreciar en la Tabla 11, la densidad aparente tanto como suelta y compactada presenta valores altos para el hormigón, este parámetro es inversamente proporcional a la porosidad por lo que, al tener un valor alto se garantizó una buena compactación del agregado en la mezcla de hormigón que es muy importante en el encapsulamiento (ASTM C29/C29M-17a, 2020).

Además, se comprobó que el porcentaje de error entre la ficha técnica y los ensayos corresponde al 2% por lo que se puede garantizar que el agregado puede ser utilizado para el encapsulamiento de residuos peligrosos.

### 3.2.1.4 Ensayo de abrasión

Para el ensayo de abrasión se tomó como referencia al método ASTM C131 referente al 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 Ángeles”. Este procedimiento se realizó para calcular la degradación de agregados minerales, además de ser utilizado como un indicador de calidad para conformar dosificaciones de hormigón (ASTM C131/C131M-20, 2022b). La Tabla 12 muestra los porcentajes de abrasión, e

impactos obtenidos a partir del ensayo descrito en el ítem 2.3.1.4, en base a los resultados presentados en el Anexo 5. Como se puede observar en la Tabla 12 el porcentaje de abrasión después de 500 revoluciones tiene un valor de 20,18% lo que representa que el agregado sometido al ensayo es un agregado fuerte, por consiguiente, presenta un valor pequeño de abrasión. Además (Jiménez, 2018) explica que los hormigones de alta resistencia presentan un valor menor de abrasión, dado que el principio del ensayo se basa en simular el desgaste del agregado en un corto periodo de tiempo por lo que al presentar un valor pequeño indica que el agregado tiene un tiempo de durabilidad mayor.

**Tabla 12.** Resultados del ensayo de abrasión.

<b>Resultados del ensayo</b>	
Tamaño máximo nominal	¾"
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

### 3.2.2 Análisis físicos de agregado fino (arena)

#### 3.2.2.1 Resultado de ensayo de peso específico (densidad relativa)

El cálculo de la densidad relativa se utiliza para calcular el volumen que ocupa el agregado en la mezcla de hormigón, por lo que se considera un parámetro necesario para determinar la cantidad de agregado fino presente en la mezcla de hormigón (ASTM C128-22, 2023b). Los resultados del ensayo de peso específico para agregado grueso obtenidos a partir del

ensayo descrito en el *ítem 2.3.2.1* se presentan en el Anexo 3. Por otro lado, en la Tabla 13 se muestran los resultados de densidad y absorción obtenidos.

**Tabla 13.** Resultados de gravedad específica y absorción en agregados.

<b>Agregado Fino</b>		
<b>Gravedad específica y absorción</b>	<b>Norma ASTM C128</b>	
	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad relativa seca	2,48	-
Densidad relativa SSS	2,57	-
Absorción de agua	3,50	%

Sobre la base de los resultados presentes en la Tabla 14 se obtiene que el contenido de absorción de los agregados fino no supera el 4%, lo que representa una baja absorción por lo que es necesaria poca cantidad de agua para el establecimiento de la dosificación (ASTM C128-22, 2023b).

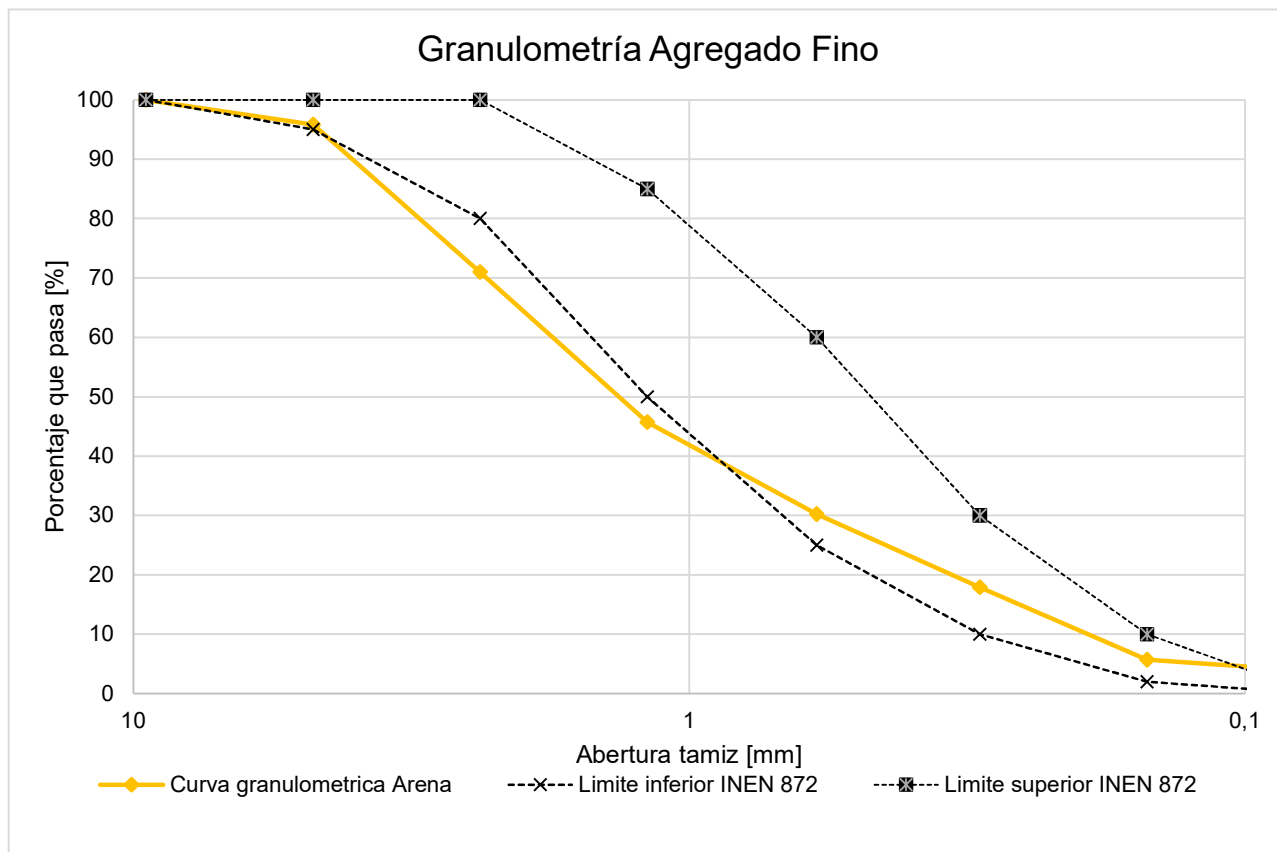
### **3.2.2.2 Resultados del ensayo de granulometría en agregado fino**

Mediante la ejecución del ensayo descrito en el *ítem 2.3.2.2* se obtuvo una serie de datos presentados en el Anexo 6. A partir de estos datos se construyó la Figura 24 correspondiente a la curva granulométrica de agregado fino (color amarillo).

Como se puede observar en la Figura 24 la gráfica presenta valores de cumplimiento positivos a largo de las dos primeras aberturas de tamices.

Sin embargo, cuando el agregado para los tamices 8 y 16 refleja un incumplimiento con los límites establecidos, a pesar de presentar esta condición se considera aceptable ya que según esta normativa entre dos tamices consecutivos no se debe retener más del 45% de árido fino (INEN 872, 1982).

Una vez atravesado este límite la gráfica presenta una curva constante donde el porcentaje de agregado que pasa se ajusta a los límites impuestos en la normativa INEN 872 por lo que pudo ser utilizado para el presente trabajo.



**Figura 24.** Distribución granulométrica del agregado fino

### 3.2.2.3 Densidad aparente en el agregado fino

Se aplicó la metodología correspondiente a la norma ASTM C29, teniendo en cuenta que la densidad aparente se utiliza para determinar los valores de densidad a granel necesarios para la selección de proporciones para mezclas de hormigón (ASTM C29/C29M-17a, 2020). A continuación, en la Tabla 14, se muestran los resultados de densidad obtenidos para el agregado fino, mientras que en el Anexo 3 se muestran los datos resultantes del ensayo descrito en el ítem 2.3.2.2.

**Tabla 14.** Resultados de ensayos de densidad aparente

Agregado fino		
Densidad aparente	Norma ASTM C29	
	Valor	Unidad
Densidad suelta	1570	$kgf/m^3$
Densidad compactada	1760	$kgf/m^3$

La densidad aparente tanto como suelta y compactada presenta valores mayores en el caso del agregado fino (arena), la divergencia entre estos valores se presenta debido a la porosidad del material. En este caso se presenta una relación que indica que a mayor porosidad se reduce la densidad aparente (C. Benavides, 2015), en el caso del proyecto la densidad se encuentra en un valor adecuado ya que al tener como producto final cubos de encapsulamiento no es necesaria una alta porosidad en el material ya que la escorrentía de la lluvia puede infiltrar el cubo y causar lixiviación de metales pesados presentes en los residuos peligrosos.

#### 3.2.2.4 Contenido orgánico agregado fino

El ensayo de contenido orgánico se fundamentó en la Norma ASTM C29 referente a la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para hormigón. Este método se utilizó para identificar la presencia de cantidades nocivas de impurezas orgánicas que podrían afectar a la mezcla de hormigón (ASTM C40/C40M-20, 2020b). Los resultados obtenidos a partir del ensayo descrito en el ítem 2.3.2.4 se muestran en el Anexo 3.

**Tabla 15.** Resultados del ensayo de contenido orgánico.

<b>Agregado fino</b>	
<b>Ensayo contenido orgánico</b>	<b>Norma: ASTM C29</b>
Escala placa orgánica	0

Como se puede observar en la Tabla 15 el agregado fino utilizado no posee impurezas. Además, aplicando el método visual mediante el uso de la escala de Gardner (Figura 19) presente en la Norma INEN 855 se pudo establecer que en este caso el agregado fino se encuentra sobre el valor estándar que corresponde a la escala de color 3 por lo que se puede asegurar la confiabilidad de este en el uso para mezcla de hormigón.

### 3.2.3 Análisis físicos del cemento

#### 3.2.3.1 Densidad real del cemento

El ensayo de densidad real del cemento se basó en la Norma ASTM C188-17 referente a la determinación de la densidad del cemento hidráulico. Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar la calidad y utilidad del cemento para el diseño y control de mezclas de hormigón (ASTM C188-17, 2023). En el Anexo 3 se muestran los resultados obtenidos a partir del procedimiento descrito en el ítem 2.3.3.1.



**Tabla 16.** Resultados de ensayos de densidad real del cemento.

<b>Cemento Armado (Cemento Portland Puzolánico Tipo IP)</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Volumen inicial (<math>cm^3</math>)</b>	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Temperatura inicial (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Volumen final (<math>cm^3</math>)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Temperatura final (<math>^{\circ}C</math>)</b>
M1	0,7	329,8	22	18,4	387	22
M2	0,5	329,8	23	18,5	386,7	23
M3	0,4	329,8	22	18,1	386,5	22
<b>Densidades</b>					<b>Norma: ASTM C188</b>	
Densidad Real					<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
					3,2	$g/cm^3$

Por otro lado, como se puede observar en la Tabla 16 la densidad real del cemento tiene un valor de  $3,20 g/cm^3$ . La densidad óptima para el cemento portland tipo IP varía entre  $2,90 g/cm^3$  a  $3,2 g/cm^3$  (Almache, 2022).

Por lo que se determinó que la densidad se encuentra dentro de los límites establecidos y puede ser utilizado para la elaboración de cubos de hormigón, esperando una alta resistencia inicial en un corto periodo de tiempo optimizando el tiempo de ejecución del trabajo.

### 3.3 Resultados de análisis físicos a residuos peligrosos

#### 3.3.1 Determinación de pH en residuos peligrosos

Con el objetivo de caracterizar los residuos peligrosos utilizados para el encapsulamiento y verificar su funcionalidad en el medio acuoso ante la adición de agua a la mezcla de hormigón.

Se obtuvieron los resultados expuestos en la Tabla 17, donde la ceniza tiene un pH de 9,34, el vidrio 8,05, la luminaria 11,31 y la escoria 9,86, es decir todos los residuos presentan pH alcalino (pH mayor a 7) razón por la que presentan mayor afinidad ante la compactación del hormigón, especialmente en el caso de la luminaria ya que presenta un pH más alcalino por lo que se considera la mejor compactada en los cubos de hormigón.

Esto debido a que según (Cagua & Nates, 2017) los niveles de pH ácidos (menores a 7) en el agua de mezclado afectan la resistencia a la compresión del hormigón en un rango de 0 a 10%.

**Tabla 17.** Resultados de medición de pH en dilución de residuos y agua destilada 1:4.

<b>Medición de pH</b>	
<b>Tipo de residuo</b>	<b>Resultado</b>
Ceniza de cámara de combustión	9,34
Vidrio triturado (ampollas y frascos vacíos de perfume)	8,05
Luminaria	11,31
Escoria de fundición	9,86

### 3.3.1.1 Determinación de contenido de humedad en residuos peligrosos

En la Tabla 18 se detallan los resultados del contenido de humedad en residuos peligrosos, como se puede observar la humedad de todos los residuos ( luminarias, vidrio triturado, escoria de incineración y ceniza de fondo de cámara de combustión) es menor a 2% lo cual se refleja debido a que los residuos (cenizas y escoria de función) fueron sometidos a un pretratamiento (incineración), mientras que en el caso de las luminarias y vidrio proveniente de envases vacíos de perfumes y ampollas, la humedad es baja debido a que recibieron un pretratamiento, en el caso de la luminaria a través de una máquina de destrucción de luminarias (Figura 3) y en el caso del vidrio, fueron vaciados, lavados y triturados a través de una trituradora de vidrio (Figura 11).

**Tabla 18.** Resultados de determinación de humedad en residuos peligrosos.

<b>Tipo de desecho</b>	<b>Peso del crisol [g]</b>	<b>Mh Peso del crisol + muestra húmeda [g]</b>	<b>Ms Peso del crisol + residuos secos [g]</b>	<b>Porcentaje de Humedad [%]</b>
Ceniza de fondo de cámara de combustión	2,01	41,23	40,69	1,31
Vidrio triturado (ampollas y frascos vacíos de perfume)	2,01	42,55	42,54	0,01
Luminaria	2,01	43,57	43,55	0,03
Escoria de fundición	2,01	39,49	39,48	0,01

### 3.3.2 Determinación de contenido de sulfatos residuos peligrosos

Sobre la base de los resultados indicados en la Tabla 19 se puede observar que únicamente la ceniza de fondo de cámara de combustión tiene presencia de sulfatos, con una concentración de 19,5 [mg/L  $SO_4^{2-}$ ], este valor se encuentra bajo lo establecido en la norma ASTM C1602 misma que indica que el límite máximo permisible de sulfatos en el agua de mezclado es de 3000 ppm. Por lo tanto, se puede garantizar que la adición de residuos peligrosos no contribuye con el ataque de sulfatos que por lo general causa la reducción de la vida útil de las estructuras de hormigón (Guerrero & Pazmiño, 2017).

**Tabla 19.** Resultados de determinación de contenido de sulfatos.

Contenido de sulfatos	
Tipo de desecho	Promedio [mg/L $SO_4^{2-}$ ]
Ceniza de fondo de cámara de combustión	19,5
Escoria de fundición	0
Vidrio triturado (ampollas y frascos vacíos de perfume)	0
Luminaria	0

### 3.4 Caracterización inicial de metales pesados presentes en residuos peligrosos

Los resultados del contenido de metales presentes en los residuos peligrosos se pueden evidenciar en el informe entregado por el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX), ver Anexo 7. Los resultados fueron presentados en base húmeda por lo que tuvieron que ser transformados a base seca para poder compararlos con los Límites máximos permisibles establecidos en la Ordenanza 404. El resultado de esta comparación se muestra en la Tabla 20, para esto se usó una escala de color, donde el color verde refleja el cumplimiento de los límites máximos permisibles, mientras que el color rojo corresponde al incumplimiento de estos.

**Tabla 20.** Cuantificación de metales en residuos peligrosos

Muestra	Parámetro	Resultados base húmeda [mg/L]	Resultados base seca [mg/kg]	Límites Máximos permisibles OM 404
M1 Ceniza de incinerador	Cadmio	0,02	3,91	85
	Plomo	0,37	72,35	4300
	Níquel	0,64	125,15	57
	Zinc	4,50	879,94	420
	Cromo	0,61	119,28	3000
	Arsénico	1,06	207,27	75
	Mercurio	0,0025	0,489	840
M2 Luminaria triturada	Mercurio	0,043	8,34	840
M3 Escoria de incineración	Cadmio	0,023	4,44	85
	Plomo	0,25	48,29	4300
	Níquel	0,97	187,40	57
	Zinc	0,95	183,54	420
	Cromo	0,56	108,19	3000
	Arsénico	No detectable	-	75
M4 Vidrio de perfumes	Cromo	0,03	5,95	3000
	Manganeso	0,35 mg/L	69,47	-

Escala de color: verde (Cumple); rojo (Incumple); (-) Parámetro no especificado en la norma

Como se observa en la Tabla 20, tanto para la luminaria triturada y el vidrio de perfumes y ampollas, los metales cumplen con los límites máximos permisibles de la Ordenanza Municipal 404, es decir concentraciones de cromo menores a 3000 mg/kg y mercurio 840 mg/kg. Sin embargo, para la escoria de incineración se presentan valores bajo la normativa de cadmio 85 mg/kg, plomo 4300 mg/kg, zinc 420 mg/kg y cromo 300 mg/kg a excepción del zinc donde la concentración sobrepasa por más del doble de la concentración límite establecida. Por otro lado, en el caso de la ceniza de cámara de combustión los metales que se encuentran bajo los límites son: cadmio 3,91 mg/kg, plomo 72,35 mg/kg, cromo 119,28 mg/kg, mercurio 0,489 mg/kg. Pese a esto las concentraciones de níquel, zinc y arsénico sobrepasan estos límites,

La excesiva presencia de metales pesados en estos dos tipos de residuos (ceniza y escoria de incineración) puede ser causada debido al tipo de residuos que tienen como disposición final la incineración, entre ellos se pueden encontrar: fármacos caducados o fuera de especificaciones, ropa, desechos del reciclado de papel y cartón con materiales peligrosos, entre otros. Siendo esta la razón principal para encapsular este tipo de residuos, ya que de otro modo pueden causar serias afectaciones al ser humano y la naturaleza.

### 3.5 Encapsulamiento de residuos peligrosos

#### 3.5.1 Dosificación del hormigón madre

La dosificación de cubos de hormigón fue realizada en base a la Norma ACI 211 referente al diseño de una mezcla patrón de hormigón. El establecimiento de la dosificación fue entregado mediante un Informe por el LEMSUR, mismo que se presenta en el Anexo 8. Por otro lado en la Tabla 21 se puede observar las cantidades utilizadas para la fundición de 4 testigos cilíndricos de la mezcla del hormigón madre.

**Tabla 21.** Resultados de dosificación de cubos de hormigón

<b>Proporción en peso</b>			
<b>Agua [kg]</b>	<b>Cemento [kg]</b>	<b>Agregado fino [kg]</b>	<b>Agregado grueso [kg]</b>
0,65	1,00	2,08	1,91
<b>Dosificación 4 testigos de hormigón</b>			
<b>Agua [kg]</b>	<b>Cemento [kg]</b>	<b>Agregado fino [kg]</b>	<b>Agregado grueso [kg]</b>
1,46	2,25	4,70	4,29

##### 3.5.1.1 Resultados de compresión de testigos de hormigón (dosificación de hormigón madre)

Los resultados de las pruebas de compresión a testigos de hormigón se presentan en el Anexo 9, en base a estos valores se estableció la Tabla 22 donde se puede observar que los testigos de hormigón presentaron una falla de rotura del tipo 2 (Figura 25) este tipo de falla se presenta en forma de un cono bien formado causando fisuras verticales. En cuanto, a resistencia todos los cubos superaron la resistencia mínima impuesta bibliográficamente de  $210 \text{ kgf/cm}^2$ , Sin embargo, solo el cilindro de la muestra C2 supero la resistencia

esperada de  $240 \text{ kgf/cm}^2$ , a pesar de esto se continuó con la dosificación madre establecida ya que todos superaron el límite inferior de  $210 \text{ kgf/cm}^2$  considerándose aptos para la adición de residuos peligrosos.

**Tabla 22.** Resultados compresión testigos de hormigón.

Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Diámetro	Área ( $\text{mm}^2$ )	Tipo de falla	Resistencia
						[ $\text{kgf/cm}^2$ ]
2023-02-15	2023-02-22	7	102,75	8292	2	230
2023-02-15	2023-02-22	7	102,75	8292	2	248
2023-02-15	2023-02-22	7	101,75	8131	2	231
2023-02-15	2023-02-22	7	102,50	8252	2	228



**Figura 25.** Tipo de falla número 2

### 3.5.2 Dosificación de menús de encapsulamiento

Con el objetivo de mantener intactas las características del hormigón, se conservó como constante la cantidad de agua y cemento utilizado en la dosificación del hormigón madre. Los menús (dosificaciones) de reemplazo de residuos peligrosos por agregados fueron establecidas en base a la caracterización inicial de residuos. En consecuencia, se

establecieron cuatro dosificaciones de reemplazo de agregados por residuos peligrosos correspondientes al 5, 10, 15, y 20 %. Como se puede observar en la Tabla 23 el peso total de residuos utilizados para la dosificación (D5) es de 0,9 kg, (D10) 1,8 kg, (D15) 2,7 kg y (D20) 3,6 kg por lo que se puede establecer que la dosificación correspondiente al 20 % es la óptima dado a que se gestiona una mayor cantidad de residuos peligrosos. Además es importante destacar que la cantidad de cemento y agua se mantiene constante ya que (Santamaría, 2021) destaca que el establecimiento de una dosificación constante de cemento garantiza la calidad del hormigón.

**Tabla 23.** Dosificación de cubos de encapsulamiento.

<b>Dosificación del hormigón madre</b>								
<b>Agua</b>	<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Ripio</b>	<b>Arena + Ripio</b>				
<b>[kg]</b>	<b>[kg]</b>	<b>[kg]</b>	<b>[kg]</b>	<b>[kg]</b>				
2,93	4,51	9,39	8,59	17,98				
<b>Dosificación para encapsulamiento</b>								
<b>Componentes</b>	<b>Dosificación reemplazo 5% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D5)</b>		<b>Dosificación reemplazo 10% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D10)</b>		<b>Dosificación reemplazo 15% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D15)</b>		<b>Dosificación reemplazo 20% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D20)</b>	
	0,899		1,798		2,697		3,596	
	<b>Porcentaje [%]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Porcentaje [%]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Porcentaje [%]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Porcentaje [%]</b>	<b>Peso [kg]</b>
Ceniza	30	0,27	30	0,54	30	0,81	30	1,08
Luminaria	30	0,27	30	0,54	30	0,81	30	1,08
Escoria	20	0,18	20	0,36	20	0,54	20	0,72
Vidrio	20	0,18	20	0,36	20	0,54	20	0,72
Arena	80	8,67	80	7,95	80	7,23	80	6,51
Ripio	20	8,41	20	8,23	20	8,05	20	7,87
Cemento	-	4,51	-	4,51	-	4,51	-	4,51
Agua	-	2,93	-	2,93	-	2,93	-	2,93
<b>TOTAL</b>		0,90	<b>TOTAL</b>	1,80	<b>TOTAL</b>	2,70	<b>TOTAL</b>	3,60

### 3.5.2.1 Resultados de pruebas mecánicas a cubos de encapsulamiento

Los datos resultados de pruebas mecánicas a cubos de encapsulamiento se encuentran el Anexo 10, en base a estos resultados se estableció la Tabla 24 donde se puede observar cuatro porcentajes de reemplazo agregados por residuos peligrosos correspondientes al 5, 10, 15, 20 % y un blanco (sin residuos peligrosos en la mezcla de hormigón).

La fecha edad de rotura de cubos posee dos valores diferentes (7 y 8 días), esto se explica debido a que el encofrado utilizado no tenía la cantidad de moldes cúbicos suficientes para la construcción de todos los cubos de encapsulamiento, por lo que fue necesaria una segunda fundición de cuatro cubos de dosificación madre (hormigón sin residuos) un día después. Sin embargo esto no altera de ninguna manera los resultados de compresión ya que al usar el cemento Armaduro la resistencia máxima a la compresión se alcanza a los siete días de fundición.

En cuanto al cumplimiento de resistencias, las dosificaciones correspondientes al Blanco, 5 y 10% de reemplazo cumplen con el límite inferior impuesto teóricamente de  $210 \text{ kgf/cm}^2$ . Sin embargo, al no existir ningún tipo de normativa para este tipo de hormigón de encapsulamiento se pueden aceptar todas las resistencias de los cubos.

**Tabla 24.** Resultados de compresión cúbica de hormigón en cubos de encapsulamiento.

Reemplazo de agregados por residuos peligrosos [%]	Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Área ( $\text{mm}^2$ )	Resistencia [ $\text{kgf/cm}^2$ ]
					Cúbica
5%	2023-03-02	2023-03-10	8	10748	233
10%	2023-03-02	2023-03-10	8	10416	219
15%	2023-03-02	2023-03-10	8	10315	172
20%	2023-03-02	2023-03-10	8	10379	182
Blanco (0%)	2023-03-03	2023-03-10	7	11002	214

### 3.5.3 Resultados de ensayo de lixiviación

Antes de presentar los resultados se indica la notación contemplada en el contenido de la siguiente tabla.



**Tabla 25.** Abreviaturas utilizadas para ensayo de lixiviación.

ID Cubo	Descripción
B1	Cubo que no contiene residuos peligrosos
D5	Agua de lixiviado correspondiente a la dosificación con reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos del 5%
D10	Agua de lixiviado correspondiente a la dosificación con reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos del 10%
D15	Agua de lixiviado correspondiente a la dosificación con reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos del 15%
D20	Agua de lixiviado correspondiente a la dosificación con reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos del 20%

### 3.5.3.1 Resultados de análisis de humedad a cubos de encapsulamiento

El ensayo de contenido de humedad se realizó siguiendo la secuencia del procedimiento establecido en el método EPA 1315, es así como una vez que los cubos de hormigón con material encapsulado en su interior terminaron su periodo de fraguado (7 días) se realizó un análisis de humedad tal como se describe en el *ítem 2.8*.

En base a estos resultados se estableció la Tabla 26, donde se puede observar que la adición de residuos peligrosos a la mezcla de hormigón reduce su humedad ya que como se puede apreciar en el cubo que no contiene encapsulado, la humedad tiene un valor de 9 %, mientras que los demás cubos presentan porcentajes de humedad inferiores.

Sin embargo, (Socarrás et al., 2020) menciona que, cuando la humedad presenta valores menores a 39 % se puede considerar una incidencia a la corrosión mínima por lo que los cubos de hormigón representan una matriz estable para el encapsulamiento de residuos peligrosos evitando su propagación y posible contaminación hacia el medio ambiente.

**Tabla 26.** Resultados de análisis de humedad a cubos de encapsulamiento.

ID Cubo	% Reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos	Peso húmedo de cubo de encapsulamiento [g]	Peso seco de cubo de encapsulamiento [g]	% Humedad	% Humedad promedio
B1	0	8284,9	7560,9	9,57	9,57
D5	5	7712,3	7217,3	6,85	6,47
D5'	5	7671,5	7230,5	6,09	
D10	10	7522,1	7161,5	5,04	5,08
D10'	10	7520,3	7154,0	5,12	
D15	15	7496,8	6979,3	7,41	6,82
D15'	15	7479,5	7041,3	6,22	
D20	20	7439,7	6919,5	7,51	7,70
D20'	20	7423,9	6880,8	7,89	

### 3.5.3.2 Resultados de control de pH en lixiviados

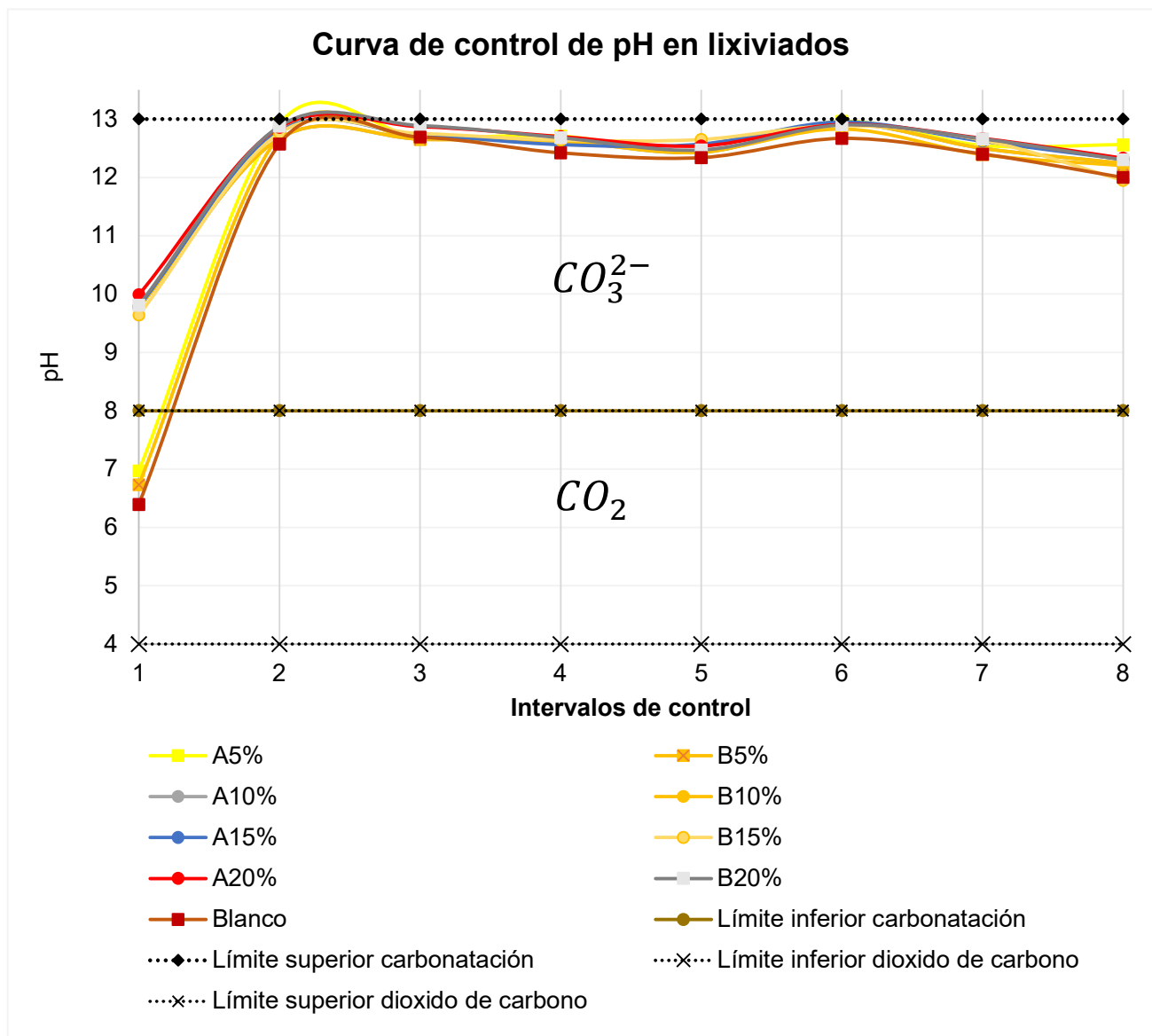
En la Tabla A11.1 del Anexo 10 se muestran la serie de datos completos correspondientes a la medición de pH realizados en 8 intervalos de 14 días en cada uno, como se puede observar en esta serie de datos se inició desde un intervalo de pH ácido correspondiente a la dosificación con el menor reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos, hacia un pH alcalino semejante a la mayor cantidad de reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos correspondiente a la primera medición del control. Una vez transcurrido el primer intervalo los valores de pH se mantienen alcalinas (12,0 a 12,96) para todas las muestras de control analizadas.

En la Figura 26 se pueden observar una serie de curvas correspondiente a las diferentes dosificaciones de reemplazo de agregados de hormigón por residuos peligrosos, siendo las dosificaciones principales las correspondientes a la siguiente numeración: A5%, A10%, A15% y A20% y sus duplicados: B5%, B10%, B15%, B20%.

Adicionalmente, se fijaron dos curvas de control (color negro) para establecer las fases correspondientes a la evolución de  $CO_2$  a  $CO_3^{2-}$  dentro de la estructura de hormigón en base a la gráfica de "Equilibrio entre las formas carbonatadas de  $CO_2/HCO_3^-/CO_3^{2-}$  en función del pH" (Orozco et al., 2005). Esto debido a que en el diseño de estructuras de hormigón, el

fenómeno de carbonatación se conoce como la reacción química producto de la mezcla del  $CO_2$  presente en el aire, con el agua adicionada a la mezcla de hormigón. Esta reacción convierte el hidróxido de calcio presente en el cemento en carbonato, lo cual disminuye la porosidad y aumenta el pH, disminuyendo el desgaste de la estructura y aumentando su vida útil (Carvajal et al., 2007).

El control de pH realizado durante los 112 días del ensayo de lixiviación se mantiene en un pH alcalino entrando en la faja de formación de carbonatos para todas las dosificaciones de cubos de hormigón lo que asegura la extensión en la vida útil del mismo conformando



una buena matriz de encapsulamiento de residuos peligrosos.

**Figura 26.** Curvas de control de pH en agua de lixiviados

### 3.5.3.3 Resultados de control de conductividad en lixiviados

El Anexo 11 muestra los datos obtenidos en base al control de lixiviados, durante un periodo de 112 días en 8 intervalos de 14 días cada uno, en base a estos resultados se construyó la Figura 27, donde se muestra la tendencia de conductividad que sigue cada dosificación de reemplazo de agregados por residuos peligrosos.

En la Figura 27 se observa la relación existente entre la cantidad de residuos peligrosos y el aumento de conductividad, dado que mientras existe un incremento en la adición de residuos peligrosos en la mezcla de hormigón la conductividad presenta valores elevados, en relación con los registrados para la curva denominada “blanco” misma que corresponde a los cubos de hormigón sin adición de residuos peligrosos. La variación de este parámetro, según (Andrade & Andrea, 2011) es inversamente proporcional a la porosidad y humedad del hormigón, razón por la cual representa una mayor resistencia a la compresión y por ende una mejor compactación de los materiales que la conforman.

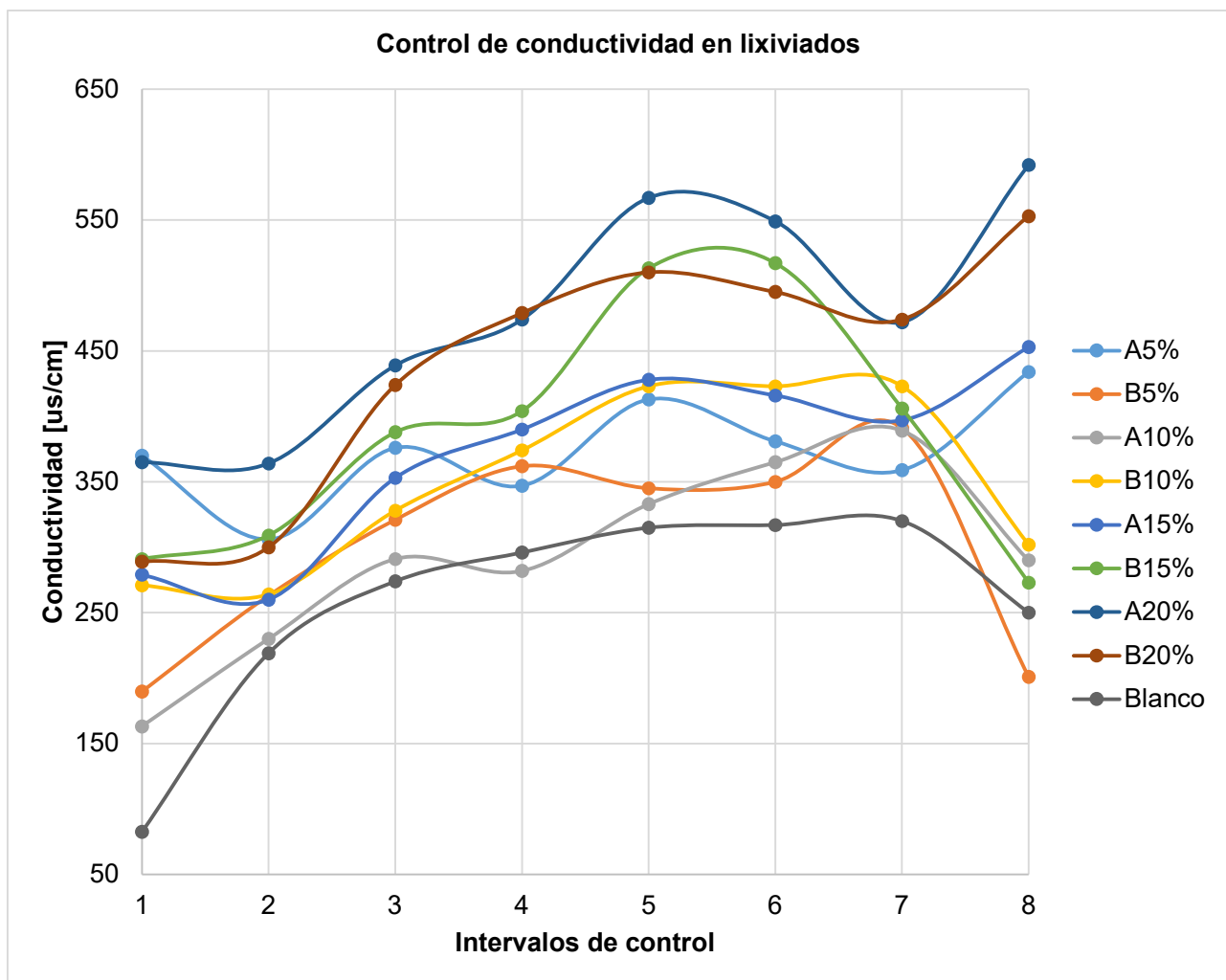


Figura 27. Curvas de control de pH en agua de lixiviados

### 3.5.3.4 Resultados de análisis de metales pesados en agua de lixiviación.

En el Anexo 12 se muestran los resultados obtenidos mediante un análisis de espectrometría de absorción atómica en el agua de lixiviado obtenida mediante la ejecución del Método 1315 de la EPA. A continuación en la Tabla 27 se establece el cumplimiento con los límites máximos permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal 404.

**Tabla 27.** Resultados de cuantificación de metales por espectrometría de absorción.

<b>Cuantificación de metales - Espectrometría de Absorción-Lixiviados</b>				
<b>Blanco de cubo encapsulamiento</b>				
<b>Metales</b>	<b>Resultados [mg/L]</b>	<b>Resultados muestra duplicado [mg/L]</b>	<b>Concentración promedio [mg/L]</b>	<b>Límites Máximos permisibles OM 404</b>
Cadmio	No detectable	No detectable	-	1,0
Cromo	No detectable	0,01	0,01	5,0
Plomo	0,03	0,02	0,02	5,0
Níquel	No detectable	No detectable	-	-
Zinc	No detectable	No detectable	-	-
Manganeso	No detectable	No detectable	-	-
Arsénico	No detectable	No detectable	-	5,0
Mercurio	No detectable	No detectable	-	0,2
<b>Dosificación reemplazo 5% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D5)</b>				
<b>Metales</b>	<b>Resultados [mg/L]</b>	<b>Resultados muestra duplicado [mg/L]</b>	<b>Concentración promedio [mg/L]</b>	<b>Límites Máximos permisibles OM 404</b>
Cadmio	No detectable	No detectable	-	1,0

**Tabla 27.** Resultados de cuantificación de metales por espectrometría de absorción.  
(Continuación...)

Cromo	0,05	0,01	0,03	5,0
Plomo	0,03	0,02	0,02	5,0
Níquel	0,02	0,01	0,01	-
Zinc	No detectable	No detectable	-	-
Manganeso	0,02	No detectable	0,02	-
Arsénico	No detectable	No detectable	-	5,0
Mercurio	No detectable	No detectable	-	0,2
<b>Dosificación reemplazo 10% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D10)</b>				
<b>Metales</b>	<b>Resultados [mg/L]</b>	<b>Resultados muestra duplicado [mg/L]</b>	<b>Concentración promedio [mg/L]</b>	<b>Límites Máximos permisibles OM 404</b>
Cadmio	No detectable	No detectable	-	1,0
Cromo	0,05	0,05	0,05	5,0
Plomo	0,04	0,02	0,03	5,0
Níquel	0,02	0,02	0,02	-
Zinc	No detectable	No detectable	-	-
Manganeso	0,01	0,03	0,02	-
Arsénico	No detectable	No detectable	-	5,0
Mercurio	No detectable	No detectable	-	0,2
<b>Dosificación reemplazo 15% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D15)</b>				
<b>Metales</b>	<b>Resultados [mg/L]</b>	<b>Resultados muestra duplicado [mg/L]</b>	<b>Concentración promedio [mg/L]</b>	<b>Límites Máximos permisibles OM 404</b>

**Tabla 27.** Resultados de cuantificación de metales por espectrometría de absorción.  
(Continuación...)

Cadmio	No detectable	No detectable	-	1,0
Cromo	0,02	0,02	0,02	5,0
Plomo	0,05	0,03	0,04	5,0
Níquel	0,02	0,01	0,02	-
Zinc	No detectable	No detectable	-	-
Manganeso	0,02	0,02	0,02	-
Arsénico	No detectable	No detectable	-	5,0
Mercurio	No detectable	No detectable	-	0,2
Cadmio	No detectable	No detectable	-	1,0
<b>Dosificación reemplazo 20% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D20)</b>				
<b>Metales</b>	<b>Resultados [mg/L]</b>	<b>Resultados muestra duplicado [mg/L]</b>	<b>Concentración promedio [mg/L]</b>	<b>Límites Máximos permisibles OM 404</b>
Cadmio	No detectable	No detectable	-	1,0
Cromo	0,03	0,03	0,03	5,0
Plomo	0,07	0,04	0,06	5,0
Níquel	0,01	0,01	0,01	-
Zinc	No detectable	No detectable	-	-
Manganeso	0,02	0,02	0,02	-
Arsénico	No detectable	No detectable	-	5,0
Mercurio	No detectable	No detectable	-	0,2

Escala de color: verde (Cumple); rojo (Incumple); (-) Parámetro no especificado en norma

Como se puede observar en la Tabla 27 Todos los cubos de encapsulamiento cumplen con los límites permisibles presentes en la Norma Técnica de Residuos Peligrosos-Ordenanza Municipal 404 correspondientes a los límites máximos permisibles en la prueba de lixiviación, por lo que se puede considerar como “eficientes” dado a que los contaminantes pudieron ser retenidos dentro de la matriz cementicia cumpliendo con el objetivo del encapsulamiento que es retener los contaminantes en su interior, de tal forma que no sean considerados un peligro de contaminación hacia el medio ambiente.

Por otro lado es importante destacar la inexistencia de límites máximos permisibles para metales como níquel, manganeso y zinc, pese a esto en todas las muestras de agua de lixiviación analizadas la mayoría de los contaminantes se encuentran bajo lo límites de detección del espectrómetro de Absorción Atómica – Perkin Elmer mismos que presentan valores inferiores a 0,01 mg/L para todos los metales lo que ratifica una buena técnica de encapsulamiento y la inexistencia de lixiviación que pueda ser vista como una amenaza hacia el medio externo.

#### **4. Conclusiones**

- Como se pudo observar en la Tabla 20 los residuos que recibieron un pretratamiento como es el caso de luminarias (pretratamiento mediante el uso del equipo de destrucción de luminarias que extrae el vapor de mercurio y tritura el resto de los componentes) y vidrio de ampollitas y frascos vacíos de perfumes (pretratamiento mediante lavado y vaciado del producto, posterior trituración) cumplen con los límites máximos permisibles referente a la concentración de metales pesados.
- Mediante la caracterización de los residuos peligrosos utilizados en el trabajo se pudo evidenciar la presencia de metales pesados (Níquel, Zinc y Arsénico) sobre los límites establecidos en la Norma Técnica de Residuos Peligrosos de la Ordenanza Municipal 404 específicamente para los residuos que no han sido sometidos a un pretratamiento como es el caso de la ceniza de cámara de combustión y escoria de incineración esto debido a que el incinerador de la empresa gestiona diferentes residuos que pueden contener este tipo de metales (por ejemplo; medicamentos caducados o fuera de especificaciones), mientras que los residuos que recibieron un pretratamiento (equipo de destrucción de luminarias y trituradora de vidrio) no presentan estas características. Por lo que se puede concluir que el pretratamiento de residuos peligrosos constituye una mejora



significativa en las características fisicoquímicas de los residuos a ser encapsulados.

- La sustitución de agregados (fino y grueso) en los porcentajes de reemplazo establecidos correspondientes al 5, 10, 15 y 20%, mediante la adición de residuos peligrosos directamente a la mezcla de hormigón favorece a la compactación de residuos dentro de una matriz cúbica, esto se pudo evidenciar mediante la ejecución de ensayos de compresión donde los cubos superaron la resistencia esperada de  $210 \text{ kgf/cm}^2$ .
- La dosificación correspondiente al 20% de reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos es la más eficiente debido a que se utilizó una mayor cantidad de residuos peligrosos cumpliendo así con el objetivo de gestionar la mayor cantidad posible de este tipo de desechos, brindando una nueva oportunidad a la disminución de recursos y aprovechando las características propias del residuo sin la necesidad de producir un fallo en la vida útil de la estructura de hormigón.
- Las diferentes dosificaciones (menús de encapsulamiento) pueden ser utilizado dentro de la empresa Hazwat tanto para la disposición final en un relleno de seguridad como para la microencapsulación, es decir, la adición de residuos directamente en la mezcla para la conformación de nuevos galpones de almacenamiento brindando así un nuevo uso a este tipo de técnica.
- El procedimiento experimental es multidisciplinario, permitiendo adquirir un amplio conocimiento no solamente en el ámbito ambiental, sino también en la adición de nuevas alternativas de gestión de residuos mediante el estudio del comportamiento del hormigón.
- A través de los resultados de la cuantificación de metales pesados presentes en el agua de lixiviado mediante espectrometría de absorción, se obtuvo que el 100% de las muestras analizadas cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa con valores mucho menores a los estipulados, por lo que se puede decir que todos los menús de encapsulamiento son aptos para ser replicados en la empresa Hazwat sin temor a que puedan llegar a contaminar al medio ambiente.

## 5. Recomendaciones

- Es importante que según la secuencia del proceso, que en primer lugar se realicen los ensayos relacionados a la caracterización de agregados para establecer la dosificación del hormigón madre y en base a estos parámetros se solicite una cantidad adecuada de residuos peligrosos que no sobrepase la cantidad necesitada.
- Los materiales utilizados en la mezcla de hormigón pueden ser variados, en especial el cemento, dado que la elección del tipo de cemento se basó únicamente en mejorar la eficiencia relacionada con el tiempo necesario para la ejecución del presente trabajo.
- Se recomienda realizar un nuevo diseño experimental variando la proporción de reemplazo entre 25% y 35% de reemplazo con el objetivo de aumentar la adición de residuos en el mortero de hormigón.
- Realizar un pretratamiento a los cubos de hormigón que van a ser sometidos a ensayos de lixiviación. El pretratamiento deberá consistir en un lavado para poder eliminar el exceso de sales producto del fraguado, con el objetivo de mejorar las mediciones de control de pH y conductividad.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almache, E. (2022). *ENCAPSULAMIENTO DE CATALIZADORES, CENIZAS Y LIQUIDO PELIGROSO BÁSICO EN ADOQUINES* [Escuela Politécnica Nacional ].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/22659/1/CD%2012142.pdf>
- American Concrete Institute. (2022). Selecting Proportions for Normal-Density and High -Density Concrete— Guide. In *ACI PRC-211.1-22*.
- American Society for Testing and Materials. (2004). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. In *ASTM C566-97*.
- Andrade, C., & Andrea, D. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad . *Revista ALCONPAT*, 1(2), 93–101.  
<https://www.redalyc.org/pdf/4276/427639585001.pdf>
- Arciniegas, M. F. (2013). *ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS TÓXICOS MEDIANTE ENCAPSULAMIENTO: UNA ALTERNATIVA EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS* [Universidad de los andes ].  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14070/u240251.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ASTM C29/C29M. (2020). *Método de prueba estándar para determinar la densidad a granel (“peso unitario”) y los huecos de aire de un agregado*.
- ASTM C29/C29M-17a. (2020). *Método de prueba estándar para determinar la densidad a granel (“peso unitario”) y los huecos de aire de un agregado*.
- ASTM C33/C33M-18. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- ASTM C40/C40M-20. (2020a). *Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para hormigón*.  
[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0040\\_C0040M-20%7Ces-ES](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0040_C0040M-20%7Ces-ES)
- ASTM C40/C40M-20. (2020b). *Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para hormigón*.
- ASTM C127-15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. In *Annual Book of ATM Standards volume information*.
- ASTM C128-22. (2023). *Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino*.  
<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0128-22%7Ces-ES>
- ASTM C131/C131M-20. (2022a). *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 Ángeles*.

[https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0131\\_C0131M-20%7Ces-CL](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0131_C0131M-20%7Ces-CL)

- ASTM C131/C131M-20. (2022b). *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 Ángeles.*
- ASTM C136/C136M-19. (2020). *Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.*
- ASTM C188-17. (2023). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.*
- Benavides, C. (2015). *DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA FABRICACIÓN DE MAMPUESTOS DE USO PEATONAL CON CENIZAS DE INCINERACIÓN PROVENIENTES DE LA EMPRESA GPOWERGROUP S.A.* Escuela Politécnica Nacional.
- Benavides, G., Luna, G., & Montenegro, L. (2015). Efecto de la Sustitución de Agregado Fino por Ceniza Proveniente del Proceso de Incineración en Bruto de Residuos Sólidos Industriales en la Elaboración de Hormigón de Baja Resistencia. *Revista Politécnica*, 36(3).  
file:///C:/Users/Nicole/Documents/TIC%20NICOLE/TESIS%20SOBRE%20EN CAPSULAMIENTO/Efecto%20de%20la%20sustitucion%20de%20agregado%20fino%20por%20ceniza%20-%20MONTENEGRO.pdf
- Bernal Camacho, J., Mahmoud Abdelkader, S., Reyes Pozo, E., & Moragues Terrades, A. (2013). Estudio de la influencia de los medios con presencia de sulfatos en hormigones con cementos sulforresistentes y adiciones minerales: Parte 1: Hormigones expuestos a sulfato sódico (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). *Revista de La Construcción*, 12(2), 14–29. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200002>
- Cagua, B., & Nates, J. (2017). *Influencia del Potencial Hidrógeno (pH) y la concentración de Nitratos presentes en el agua de mezclado sobre el comportamiento Físico – Mecánico del Hormigón: Estudio en Laboratorio.* Escuela Politécnica Nacional .
- 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.* UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- Carvajal, A., Silva, C., Valiente, J., & Venegas, A. (2007). Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones. *Académica Pontificia Universidad Católica de Chile.*  
<https://www.redalyc.org/pdf/1276/127619409008.pdf>
- Castro, E. P. (2020). *ESTUDIO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO DE ALTA RESISTENCIA INICIAL POR PUZOLANA DE CENIZA*

**VOLCÁNICA EN EL DISEÑO DE HORMIGÓN. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.**

- Catur, F. (2021). Valoración del hormigón ante ataque de sulfatos. *Ingeniería y Sus Alcances*, 5(12).  
[https://repositorio.cidecuador.org/bitstream/123456789/1408/1/Articulo\\_No\\_6.pdf](https://repositorio.cidecuador.org/bitstream/123456789/1408/1/Articulo_No_6.pdf)
- Chávez, M. (2014). *DETERMINACIÓN DEL VALOR FINANCIERO DE EMPRESAS EN ECUADOR – CASO HAZWAT CÍA. LTDA.* [PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR].  
<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8020/Trabajo%20de%20Titulaci%c3%b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- EPA. (1998, January). *RCRA EN FOCO.*
- Fernandes, F., Angélica, J., Carvajal, D., Mera, A., Gallegos, A., & Maureira, H. (2021). TÉCNICAS PARA LA DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE MEDICAMENTOS DOMICILIARIOS. *4° Congreso Sul-Americano de Residuos Sólidos e Sustentabilidade.*
- FIC. (2016). Construcción de estructuras en Hormigón. In *Fondo de formación profesional para la industria de la construcción.*  
[https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5347/3294\\_construccion\\_de\\_estructuras\\_en\\_hormigon.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5347/3294_construccion_de_estructuras_en_hormigon.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Guerrero, C., & Pazmiño, H. (2017). *INFLUENCIA DE LOS SULFATOS Y CLORUROS PRESENTES EN EL AGUA DE MEZCLADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO FISICO-MECANICO DEL HORMIGÓN: ESTUDIO EN LABORATORIO.* Escuela Politécnica Nacional .
- Gutierrez, Y. (2007). *CARACTERISTICAS, EFECTOS Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS CORROSIVOS EN EL HORMIGÓN ARMADO.* Universidad de Sucre.
- Hazwat. (2022). *Nuestra Empresa – Hazwat.* <https://www.hazwat.com.ec/nuestra-empresa/>
- Henríquez, H., Torres, R., Bucarey, A., Bucher, H., Bascou, H., Jiménez, G., Salvo, A., Téllez, J., Wilson, J., Rivera, H., Gómez, S., Schwartzman, J., & Valenzuela, M. (1977). Hormigón-Ensayo de compresión de probetas cúbica y cilíndricas. In *NCh1037. Of77.* Instituto Nacional de Normalización .
- Hernández, S. (2015). *Análisis comparativo por ciclo de vida de tres tipos de luminarias empleadas en los interiores de edificios.* Universidad Autónoma del Estado de México.
- Huingo, E. (2017). *RECUPERACIÓN DE METALES NO FÉRRICOS EN LA FRACCIÓN FINA DE LA ESCORIA DE INCINERACIÓN: ESTUDIO PRELIMINAR.* Universidad de Cantabria.

- IDEAM. (2017). *Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia* . [https://www.andi.com.co/Uploads/Informe\\_RESPEL\\_2017.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/Informe_RESPEL_2017.pdf)
- INEN 872. (1982). ARIDOS PARA HORMIGON REQUISITOS. In *Norma Ecuatoriana*.
- Ingeambiente. (2017). *ENCAPSULADO DE RESIDUOS PELIGROSOS*.
- Jácome, A. G., Márquez de la Presa, C. T., & Mazacón, A. I. (2013). *RECUPERACIÓN DEL VIDRIO Y OTROS MATERIALES RECICLADOS DE LUMINARIAS FLUORESCENTES* [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/845d9cd7-88f3-4b1f-9e28-3a4c8414e689/D-P11843.pdf>
- Jiménez, M. (2018). *Diseño de un sistema de encapsulamiento de pilas en hormigón para el Distrito Metropolitano de Quito*. UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ.
- León, S. (2021). *ELABORACION DEL PROCEDIMIENTO PARA LA ADECUADA GESTION DE LUMINARIAS DE LED Y SODIO PARA LA EMPRESA EAPSA*. file:///C:/Users/Nicole/Downloads/INFORME%20FINAL.pdf
- López, C. (2009). *ESTUDIO DE SOLIDIFICACIÓN DE PILAS Y BATERIAS DE USO DOMÉSTICO MEDIANTE LA TÉCNICA DE MACROENCAPSULACION*. Escuela Politécnica Nacional.
- López, M., & Pérez, A. (2018). PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COMO EVALUACIÓN AMBIENTAL DE MATERIALES. *Instituto Mexicano Del Transporte* .
- Lumikon. (2017). *El ABC de la Iluminación* .
- Luminotecnia. (2002). *Lámparas. Capítulo 8*.
- Lusal, S. (2018, July 21). *Iluminación LED concepto, características y ventajas*.
- Mendoza, I., & Chávez, S. (2017). Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto hidráulico nuevo. *Revista de Ingeniería Civil* , 1(No.2 9-14).
- Acuerdo No.061 Reforma del libro VI del Texto Unificado de Legislación secundaria, (2015). [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_acuerdo-ministerial-061.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_acuerdo-ministerial-061.pdf)
- National Geographic. (2023, February). *Cómo contamina el mercurio el medio ambiente y cuáles son sus consecuencias*.
- Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2005). *Contaminación Ambiental Una visión desde la Química* (1st ed.). Thomson.
- Pantoja, F. liceth, & Paredes, L. F. (2012). *MODELO DE GESTIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES DE LÁMPARAS DE SODIO Y MERCURIO EN LA EMPRESA*

*ELÉCTRICA QUITO (EEQ) Y FOCOS AHORRADORES* [Escuela Politécnica Nacional ]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4802/1/CD-4393.pdf>

Referenz. (2020). *Influencia del pH en el Hormigón.*

<https://Juttadolle.Com/Es/Cual-Es-EI-Ph-Del-Hormigon/#:~:Text=Si%20el%20pH%20est%C3%A1%20entre%207%20y%209%2C,Se%20deteriora%20el%20hormig%C3%B3n%20m%C3%A1s%20poroso%20se%20vuelve.>

Sánchez, M. (2014). *ENCAPSULAMIENTO DE METALES PESADOS EN MATRIZ CONCRETO CON CEMENTO TIPO 5.* Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Sanito, R. C., Bernuy-Zumaeta, M., You, S.-J., & Wang, Y.-F. (2022). A review on vitrification technologies of hazardous waste. *Journal of Environmental Management*, 316, 115243. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115243>

Santamaría, J. (2021). Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen. *Novasinerгия*, 4(1). [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2631-26542021000100091](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2631-26542021000100091)

Socarrás, Y., González, L., & Roca, E. (2020). Evaluación de la calidad del hormigón en edificaciones construidas con el sistema prefabricado gran panel soviético. *Tecnología Química (Publicación Trimestral Del Ministerio de Educación Superior)*, 40(2). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000200288&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000200288&script=sci_arttext)

Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. (2018a). 4500-H+ pH. In 23.

Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. (2018b). 4500-SO42- SULFATE.

UNACEM. (2021). *FICHA TECNICA ARMADURO.* <https://selvalegre.com.ec/wp-content/uploads/2023/06/ARMADURO-1.pdf>

## **7. ANEXOS**




## **ANEXO 1**

**Análisis Turnitin porcentaje máximo 12%**



## **ANEXO 2**

**Manual de encapsulamiento de luminarias, ceniza de fondo de cámara de combustión, escorias de fundición y vidrio triturado (ampolletas, frascos vacíos de perfume) para Hazwat**

<b>Nombre del proyecto:</b>	Elaboración de menús para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazwat		
<b>Componente:</b>	Encapsulamiento de vidrios de luminarias, escoria de fundición, vidrio triturado y cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas en el proceso de incineración.		
<b>Responsable del procedimiento:</b>	Nicole Micaela Males Ñacato		
<b>Elaborado por:</b>	Técnica de Hazwat		
<b>Fecha de elaboración:</b>	Agosto de 2023		
<b>Objetivo</b>			
Encapsulamiento de residuos sólidos en el que se reemplaza la mayor cantidad de material de construcción por residuos peligrosos provenientes de vidrios (ampollas y frascos vacíos de perfumes), luminarias, escorias de incineración y cenizas de fondo de la cámara de combustión generadas por el proceso de incineración provenientes de la empresa Hazwat.			
<b>Materiales utilizados en el trabajo</b>			
<b>Cemento:</b>	Cemento Portland Puzolánico Tipo IP, ARMADURO		
<b>Arena:</b>	Arena fina, 3/8"		
<b>Ripio:</b>	Piedra Rocafuerte #67 (4,75 – 19,0 mm)		
<b>Residuos peligrosos:</b>	Ceniza de cámara de combustión, escoria de incineración, vidrio triturado (ampolletas y perfumes) y luminaria triturada		
<b>Dosificaciones establecidas</b>			
<b>Hormigón madre (sin encapsulamiento de residuos peligrosos)</b>			
<b>Material</b>	<b>Peso</b>	<b>Unidad</b>	
<b>Agua</b>	2,93	Kg	
<b>Cemento</b>	4,51	Kg	
<b>Arena</b>	9,39	Kg	
<b>Ripio</b>	8,59	Kg	
<b>Agua</b>	2,93	kg	
<b>Dosificación reemplazo 5% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D5)</b>			

Material	Peso	Unidad
Ceniza	0,27	Kg
Luminaria	0,27	Kg
Escoria	0,18	Kg
Vidrio	0,18	Kg
Arena	8,67	Kg
Ripio	8,41	Kg
Cemento	4,51	Kg
Agua	2,93	kg
<b>Dosificación reemplazo 10% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D10)</b>		
Material	Peso	Unidad
Ceniza	0,54	Kg
Luminaria	0,54	Kg
Escoria	0,36	Kg
Vidrio	0,36	Kg
Arena	7,95	Kg
Ripio	8,23	Kg
Cemento	4,51	Kg
Agua	2,93	kg
<b>Dosificación reemplazo 15% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D15)</b>		
Material	Peso	Unidad
Ceniza	0,81	Kg
Luminaria	0,81	Kg
Escoria	0,54	Kg
Vidrio	0,54	Kg
Arena	7,23	Kg
Ripio	8,05	Kg
Cemento	4,51	Kg
Agua	2,93	kg
<b>Dosificación reemplazo 20% de residuos peligrosos por agregados de hormigón (D20)</b>		
Material	Peso	Unidad
Ceniza	1,08	Kg
Luminaria	1,08	Kg

Escoria	0,72	Kg
Vidrio	0,72	Kg
Arena	6,51	Kg
Ripio	7,87	Kg
Cemento	4,51	Kg
Agua	2,93	Kg

### Procedimiento

- **Pesar los agregados, cemento y residuos peligrosos de acuerdo con las cantidades descritas anteriormente.**



- **Engrasar el encofrado con aceite reutilizado para facilitar la separación de los cubos y evitar que la mezcla de hormigón se pegue en las paredes del encofrado.**



- **Adicionar los materiales secos (cemento, arena, luminaria, vidrio, ceniza y ripio) en una bandeja grande, para después adicionar agua.**



- Mezclar manualmente hasta formar una pasta homogénea.



- Colocar la mezcla dentro del molde de encofrado y etiquetar los cubos de acuerdo con el porcentaje de sustitución de materiales de construcción por residuos peligrosos.



- Fragar el hormigón (dejarlo en el molde durante 24 horas).



- **Curar los cubos (una vez transcurridas las 24 horas, sacarlo del molde, dejarlo secar por un día y colocarlos en la cámara de curado durante 7 días.**



**Los cubos pueden ser dispuestos en un relleno de seguridad, o a su vez puede utilizarse los diferentes pesos establecidos para implementar la técnica de macro encapsulación donde se vierta la mezcla directamente para la construcción de un galpón de almacenamiento temporal de desechos.**

#### Recomendaciones

- Se puede considerar a la dosificación óptima a la correspondiente al 20% de reemplazo de materiales de construcción por residuos peligrosos dado que en este menú se utilizó la mayor cantidad de residuos peligrosos disponibles.
- A través del ensayo de lixiviación se comprobó que todos los cubos cumplieron con su propósito, manteniendo los límites de metales pesados muy por debajo a los establecidos en la Ordenanza Municipal 404.
- Es importante que los materiales utilizados para el encapsulamiento reciban una trituración adicional a la entregada por la empresa para mejorar la compactación en la mezcla de hormigón.



## **ANEXO 3**

### **Propiedades físicas de los materiales**



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



**PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES**

Código de Informe: Dosif-23-002-I

Hoja 02 de 04

Fecha de Informe: 2023-09-23

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:	1760	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

**b. AGREGADO GRUESO**

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



## **ANEXO 4**

### **Análisis granulométrico agregado grueso**



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



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO**

Código de Informe: Docif-23-002-1

Hoja 04 de 04

Fecha de Informe: 2023-05-23

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

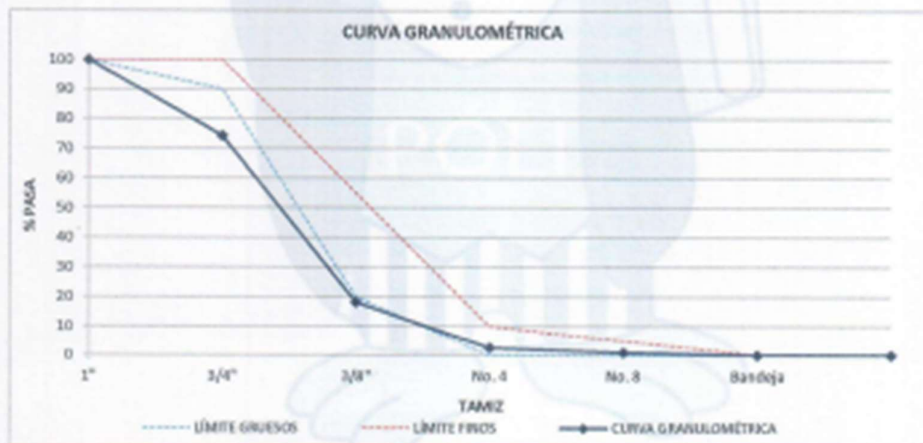
MUESTRA: Agregado grueso

MINA: \*\*\*

NORMA: ASTM C136, ASTM C33

FECHA DE ENSAYO: 2023-01-24

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		



X Ing. Mercedes Villacis  
JEFE DE LABORATORIO



## **ANEXO 5**

### **Ensayo de abrasión**



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



## ENSAYO DE ABRASIÓN

Código de Informe: ABR-23-002-I  
 Fecha de informe : 2023-05-23

Hoja 01 de 01

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Nicole Micaela Males Nacato  
 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 Pílo  
 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 Villacís  
 JEFE DE LABORATORIO



## **ANEXO 6**

### **Análisis granulométrico agregado fino**





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



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO

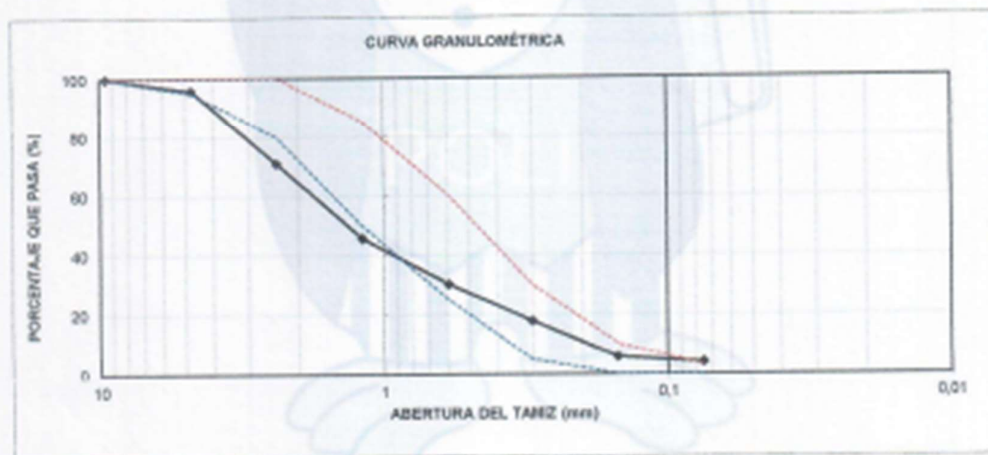
Código de Informe: Dosif-23-002-1  
Fecha de Informe: 2023-08-23

Hoja 03 de 04

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: 2023-01-24

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	0,60	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	8,4	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 Villalobos  
JEFE DE LABORATORIO





## **ANEXO 7**

**Resultados de análisis de espectrofotometría de absorción atómica  
(metales pesados)**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



**RESULTADO DE ANALISIS**

**Solicitante:** Nicole Males  
**Referencia:** RM - 10540  
**Fecha:** 23-02-23  
**Muestra:** 4 muestras líquidas

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

<b>Muestra</b>	<b>Determinación</b>	<b>Resultados</b>
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
M2 Luminaria triturada	Mercurio	43,0 ug/L
M3 Escoria de construcción	Cadmio Plomo Níquel Zinc Cromo Arsénico	0,023 mg/L 0,25 mg/L 0,97 mg/L 0,95 mg/L 0,56 mg/L no detectable
M4 Vidrio de perfumes	Cromo Manganeso	0,03 mg/L 0,35 mg/L

**Límites de detección:**

Cadmio 0,01 mg/L	Cromo 0,01 mg/L
Plomo 0,01 mg/L	Manganeso 0,01 mg/L
Níquel 0,01 mg/L	Arsénico 0,1 ug/L
Zinc 0,01 mg/L	Mercurio 0,1 ug/L

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

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

## **ANEXO 8**

### **Dosificación de hormigones**



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

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



### DOSEIFICACIÓN DE HORREGONES

Código de Informe: Dosi-23-002-I  
Fecha de Informe: 2023-06-23

Hoja 01 de 04

#### DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Nicole Michaela Males Roca  
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Aristakacia  
Teléfono: 099-051217, 0993798937

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Elaboración de ensayo para encostramiento de residuos peligrosos para la empresa Hicost  
Contratista: ---  
Contratista: ---  
Fiscalizador: ---  
NORMA: ACI 211  
FECHA DE ENSAYO: 2023-01-24

#### CONDICIONES DE DOSEIFICACIÓN $f_c = 24 \text{ MPa}$

#### Condiciones ambientales

Temperatura: 17 °C  
Humedad: 30 %

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

#### Inclusión de aire y aditivos

Sin inyección de aire  
Sin aditivos

#### Asentamiento

75-100 mm

#### RESUMEN DE RESULTADOS

DOSIS EN PESO PARA 1 m <sup>3</sup>	
Material	Peso (kg)
Agua	206
Cemento	410
Agregado fino	804
Agregado grueso	781

DOSIS PARA 1 SACO DE CEMENTO (50 kg)	
Material	Cantidad
Agua (l)	32
Cemento (saco)	1
Agregado fino (hojuelas)	3 de (30 x 30 x 35) cm
Agregado grueso (hojuelas)	3 de (30 x 30 x 25) cm

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

PROPORCIÓN EN PESO				PROPORCIÓN EN VOLUMEN			
Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso
0,85	1	2,05	1,91	0,56	1	1,19	1,38

**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 DE LABORATORIO



## **ANEXO 9**

### **Compresión de cilindros de hormigón**



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



## COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

Código de Informe: CC-23-004-1  
Fecha de Informe: 2023-06-23

Hoja 01 de 01

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Nicole Micaela Mailes Rosales  
Dirección: Ledón de Guayana E11-253 y Andalucía  
Teléfono: 0664281217

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Elaboración de manifiesto para encapsulamiento de residuos peligrosos para la empresa Hazval  
Contratista: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
ELEMENTO: Densificación 240 kg/m<sup>3</sup> Orden OS-23-027-4  
NORMA: ASTM C39

No.	Identificación	Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Peso <sup>o</sup> específico (kg/m <sup>3</sup> )	Carga Máxima (kN)	Tipo de falla	Defectos	Resistencia	
											(MPa)	± U
1	027-H-04	2023-02-15	2023-02-22	7	100,75	6292	2256	190,5	Tipo 2	A	23,0	0,52
2	027-H-06	2023-02-15	2023-02-22	7	100,75	6292	2245	206,0	Tipo 2	A	24,8	0,52
3	027-H-08	2023-02-15	2023-02-22	7	101,75	8131	2271	166,0	Tipo 2	A	23,1	0,52
4	027-H-07	2023-02-15	2023-02-22	7	102,50	8252	2282	167,8	Tipo 2	A	22,8	0,52

Tipo de falla					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6

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

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

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a las Series ensayadas bajo las condiciones del Laboratorio.

U, expresada en MPa, representa la incertidumbre asociada de los resultados.

El tipo de falla o defectos correspondiente 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.

Mg. Mercedes Vilacis  
JEFE DE LABORATORIO



## **ANEXO 10**

### **Compresión cúbica de hormigón**



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



**COMPRESIÓN CÚBICA DE HORMIGÓN**

Código de Informe: CCH-23-002-1  
Fecha de Informe: 2023-09-29

Página 01 de 01

**DATOS DEL CLIENTE**

Razón social: Nicole Micaela Males Nacata  
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía  
Teléfono: 0683798237

**DATOS DEL PROYECTO**

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

N°	Descripción	Código	Fecha	Fecha	Edad (días)	Área (mm <sup>2</sup> )	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)		Defectos
			Fabrica	Retorno					Cúbica	Cilíndrica	
1	5%	027-44-08	2023-03-02	2023-03-10	6	10740	2195	250,1	23,3	18,8	***
2	10%	027-44-09	2023-03-02	2023-03-10	6	10416	2199	230,1	21,9	18,6	****
3	15%	027-44-10	2023-03-02	2023-03-10	6	10215	2150	177,9	17,2	14,7	****
4	20%	027-44-11	2023-03-02	2023-03-10	6	10379	2155	188,8	18,2	15,5	****
5	BLANCO	027-44-12	2023-03-03	2023-03-10	7	11002	2167	206,7	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 items 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 Wilkis  
JEFE DE LABORATORIO





## **ANEXO 11**

**Resultados de control de pH y conductividad en agua de lixiviación**

**Tabla AXI.1.** Resultados de control de pH en lixiviados.

<b>Control de pH en agua de lixiviación</b>										
<b>N° toma</b>	<b>Fecha</b>	<b>A5%</b>	<b>B5%</b>	<b>A10%</b>	<b>B10%</b>	<b>A15%</b>	<b>B15%</b>	<b>A20%</b>	<b>B20%</b>	<b>Blanco</b>
1	7/4/2023	6,97	6,73	7,24	9,77	9,79	9,64	9,99	9,81	6,39
2	21/4/2023	12,92	12,72	12,44	12,67	12,79	12,76	12,86	12,88	12,57
3	5/5/2023	12,69	12,65	12,72	12,66	12,73	12,75	12,87	12,89	12,69
4	19/5/2023	12,71	12,63	12,56	12,62	12,56	12,64	12,7	12,68	12,42
5	2/6/2023	12,43	12,45	12,35	12,43	12,57	12,65	12,54	12,47	12,34
6	16/6/2023	12,96	12,83	12,81	12,92	12,95	12,89	12,91	12,9	12,67
7	30/6/2023	12,55	12,39	12,45	12,5	12,62	12,64	12,67	12,66	12,4
8	14/7/2023	12,56	12,20	12,30	12,24	12,31	11,95	12,33	12,30	12,00

**Tabla AXI.2** Resultados de control de conductividad en lixiviados.

<b>Control de conductividad (us/cm) en lixiviados</b>										
<b>N° toma</b>	<b>Fecha</b>	<b>A5%</b>	<b>B5%</b>	<b>A10%</b>	<b>B10%</b>	<b>A15%</b>	<b>B15%</b>	<b>A20%</b>	<b>B20%</b>	<b>Blanco</b>
1	7/4/2023	370	189,8	163,3	271	279	291	365	289	82,7
2	21/4/2023	306	263	230	264	260	309	364	300	219
3	5/5/2023	376	321	291	328	353	388	439	424	274
4	19/5/2023	347	362	282	374	390	404	474	479	296
5	2/6/2023	413	345	333	423	428	513	567	510	315
6	16/6/2023	381	350	365	423	416	517	549	495	317
7	30/6/2023	359	391	389	423	397	406	472	474	320
8	14/7/2023	434	201,7	290	302	453	273	592	553	250

## **ANEXO 12**

### **Resultados de absorción atómica en lixiviados**



**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



**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)

Límites de detección: cadmio = 0,01 mg/L  
cromo = 0,01 mg/L  
plomo = 0,01 mg/L  
níquel = 0,01 mg/L  
zinc = 0,01 mg/L  
manganeso = 0,01 mg/L  
mercurio = 0,1 ug/L  
arsénico = 0,1 ug/L

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

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