

**OBTENCIÓN DE MORTERO A PARTIR DE RESIDUOS DEL BENEFICIO  
GRAVIMÉTRICO DE LA GALENA**

**JUDITH PEREZ CASTILLA  
BARBARA MARICELA PASCUAZA DULCE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**OBTENCIÓN DE MORTERO A PARTIR DE RESIDUOS DEL BENEFICIO  
GRAVIMÉTRICO DE LA GALENA**

**JUDITH PEREZ CASTILLA  
BARBARA MARICELA PASCUAZA DULCE**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Químico**

**Director  
CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO.  
Ingeniero Metalúrgico, MSc**

**Codirector  
WALTER PARDAVÉ LIVIA  
Ingeniero Metalúrgico, MSc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2006**

A Dios, el autor de la vida, mi guía, mi esperanza; por permitirme ser lo que soy.

A mi madre Carmen Rosa, por estar incansablemente a mi lado, brindándome su apoyo, cariño y confianza, por ser la fuente de mi fortaleza y calma en los momentos de debilidad y angustia.

A mi padre José de Jesús, porque aprecio todo lo bueno que me ha sabido dar.

A mis hermanas: Elizabeth, Miriam, Nuris y Neris, porque me ayudaron inmensamente y sin condiciones, por comprenderme, acompañarme en las adversidades y animarme siempre a seguir adelante

A mis hermanos: Eliécer, Germán, Iván, Yobani, Yeis James y Leen Jader, porque la confianza y el alentador apoyo que me brindaron fue un motivo mas para continuar.

JUDITH PEREZ CASTILLA

Al Creador porque solo El lo ha querido así.

A mis padres Mariana y Arturo, por el amor y apoyo incondicional, porque confiaron inagotablemente en mi, y me dieron aliento cuando más lo necesitaba, siempre estuvo su imagen presente en mi aún en la distancia. A ustedes dedico éste y todos mis logros porque me dieron la vida y sembraron en mí las ganas de salir adelante.

A mis hijos Felipe y Sarita: con sus ojitos inocentes me dieron fuerza para culminar. En ustedes deposito mis esperanzas, mi amor y mi orgullo. Porque aunque no lo sepan también tuvieron paciencia mientras llegaba a la meta.

A mi hermano Julián, por apoyarme, escucharme y brindar gran parte de su tiempo y su corazón a mi hijo Felipe.

A mi esposo, compañero, amigo incondicional, mi gran amor Giovanny, por estar ahí cuando más lo necesitaba, por su enorme paciencia, por darme la tranquilidad anhelada y la palabra requerida.

BARBARA

En forma conjunta los autores agradecemos a aquellas personas e instituciones que colaboraron en la realización de este primer ejercicio de investigación:

#### UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

A CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO, Ingeniero Metalúrgico M.Sc. y director de la Investigación por su colaboración y constante apoyo y orientación en cada etapa.

A WALTER PARDAVÉ LIVIA, Ingeniero Metalúrgico M.Sc. y codirector de la Investigación por brindarnos la posibilidad de trabajar con él en este proyecto y quien nos ha dado los mejores aportes.

A C.D.P Joyeros, y en especial a la Ingeniera Eivy; por su gran colaboración y respaldo a la Investigación.

A DANIEL GARAVITO técnico de la escuela de INGENIERIA METALURGICA por su apoyo incondicional y su fe en nosotras.

A JAIRO HERNANDEZ SALAZAR, Técnico del Laboratorio de Materiales por su asesoría y colaboración a lo largo de la Investigación.

A los técnicos EDUARDO, WILSON Y GUILLERMO de la escuela de INGENIERIA QUIMICA por su presta colaboración.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este proyecto.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este proyecto.

## RESUMEN

### TITULO

OBTENCIÓN DE MORTERO A PARTIR DE RESIDUOS DEL BENEFICIO GRAVIMÉTRICO DE LA GALENA\*

### AUTORES:

JUDITH PEREZ CASTILLA

BARBARA MARICELA PASCUAZA DULCE\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Pasivo ambiental, concentración, corrientes laminares, colas de mineral de galena, mortero de cemento, agregado, propiedades fisico-mecánicas.

### DESCRIPCIÓN:

La concentración de minerales como la Galena actualmente se lleva a cabo con agentes químicos, como en el caso de flotación de espumas, generando residuos contaminados que representan pasivos ambientales. Se propone inicialmente la concentración gravimétrica, de mineral de galena, con corrientes laminares de agua en mesa Wilfley y la obtención de colas que pueden ser recicladas como agregado fino en sustitución de la arena, en la fabricación de mortero para la construcción.

Se realizó la caracterización de las colas del mineral de galena (CG), se desarrolló un diseño experimental que permitió llegar a un modelo matemático que describe el comportamiento de las variables de entrada sobre el porcentaje de plomo en las colas. Se prepararon mezclas de mortero, para diferentes porcentajes de colas de galena en arena, se fallaron buscando determinar su resistencia a la compresión, flexión, tracción, además su comportamiento poroso y permeable para compararlos con un diseño de mortero normal (sin CG).

Los resultados mostraron un comportamiento favorable del mortero elaborado con CG, implicando ser muy ventajoso no solo para las características finales del material, siempre y cuando se manejen las dosificaciones adecuadas para el diámetro de partícula escogido, sino también para el medio ambiente como tal.

---

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.  
Director: Custodio Vásquez Quintero.

## SUMMARY

### TITLE:

OBTAINING OF MORTAR TO LEAVE OF RESIDUALS OF THE GRAVIMETRIC BENEFIT OF THE GALENA\*

### AUTHORS:

JUDITH PEREZ CASTILLA

BARBARA MARICELA PASCUAZA DULCE\*\*

### KEY WORDS

Passive environmental, concentration, laminar streams, lines of galena mineral, cement mortar, attaché, physical-mechanical properties.

### DESCRIPTION

The concentration of minerals as the Galena at the moment is carried out with chemical agents, like in the case of flotation of foams, generating polluted residuals that represent passive environmental. It intends the gravimetric concentration initially, of galena mineral, with laminar streams of water in table Wilfley and the obtaining of lines that can be recycled as fine attaché in substitution of the sand, in the mortar production for the construction.

It was carried out the characterization of the lines of the galena mineral (CG), an experimental design was developed that allowed a mathematical model that describes the behavior of the entrance variables on the lead percentage in the lines to arrive. They got ready mortar mixtures, for different percentages of galena lines in sand, they were failed looking for to determine their resistance to the compression, flexion, traction, also their porous and permeable behavior to compare them with a design of normal mortar (without CG).

The results showed a favorable behavior of the mortar elaborated with CG, not implying to be very advantageous alone for the final characteristics of the material, provided the appropriate dosages are managed for the chosen particle diameter, but also for the environment like such.

---

\*Work of degree

\*\*Faculty of Physical-Chemistry Engineerings. School Chemical Engineering.  
Director: Custodio Vásquez Quintero.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA	3
1.2 MORTERO	5
1.2.1 Propiedades del mortero en estado plástico (fresco)	6
1.2.2 Propiedades del mortero en estado endurecido	7
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	8
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL	9
2.2 PRUEBAS PRELIMINARES CONCENTRACIÓN EN MESA WILFLEY	9
2.2.1 Obtención de la muestra	9
2.2.2 Trituración gruesa	9
2.2.3 Trituración fina	10
2.2.4 Molienda	10
2.2.5 Tamizado	10
2.2.6 Concentración en mesa Wilfley	10
2.2.7 Determinación de las variables fijas y los niveles para el	

diseño experimental a partir de las pruebas preliminares	10
2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	11
2.3.1 Requerimientos mínimos para llevar a cabo la parte experimental	11
2.3.2 Selección de variables	12
2.3.3 Análisis estadístico a partir de los resultados del diseño experimental	14
2.4 OBTENCIÓN DE LA MEZCLA DE MORTERO	14
2.4.1 Caracterización de los materiales empleados	14
2.4.2 Diseño de mezcla	16
2.5 COMPORTAMIENTO FISICO-MECÁNICO DEL MORTERO: PRUEBAS DE LABORATORIO	17
3. PRESENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	18
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL DE GALENA	18
3.2 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES FIJAS Y LOS NIVELES PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL A PARTIR DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES	19
3.2.1 Determinación de los niveles para el diámetro de partícula	20
3.2.2 Determinación de los niveles para el ángulo de inclinación	21
3.2.3 Determinación de los niveles para el flujo de agua	21
3.2.4 Determinación de los niveles para el ciclo de pulsación	22
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	23
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	23
3.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	27

3.5.1 Ensayo de Compresión	27
3.5.2 Ensayo de Tracción	29
3.5.3 Ensayo de Flexión	31
3.5.4 Ensayo de Porosidad	33
3.5.5 Ensayo de Permeabilidad	34
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFIA	39

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Niveles de las variables independientes	13
Tabla 2. Pruebas resultantes para el diseño experimental	13
Tabla 3. Peso y porcentaje de plomo de las colas de la etapa Scavenger en pruebas preliminares	19
Tabla 4. Porcentaje de plomo para cada ensayo	23
Tabla 5. Camino de pasos ascendentes para porcentaje de plomo	26
Tabla 6. Respuesta óptima	27

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Distribución de las partículas en los espacios inter-rifles	4
Figura 2. Mesa de sacudidas o mesa Wilfley	4
Figura 3. Diagrama de flujo del Desarrollo Experimental	8
Figura 4. Serie de tamices utilizados en el proyecto	15
Figura 5. Granulometría de la galena utilizada	18
Figura.6. Diámetro de partícula vs. Porcentaje de Plomo	20
Figura 7. Angulo de inclinación de la mesa vs. Porcentaje de plomo	21
Figura 8. Flujo de agua vs. Porcentaje de plomo	22
Figura 9. Ciclo de pulsación vs. Porcentaje de Plomo	22
Figura 10. Mapa de Pareto	24
Figura 11. Principales efectos para porcentaje de plomo	24
Figura 12. Gráfica de interacción para porcentaje de plomo	25
Figura 13. Superficie de respuesta estimada	26
Figura 14. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo	27
Figura 15. Falla de probetas con 40% de colas en arena	29
Figura 16. Deterioro en el curado de probetas con 60% de colas en arena	29
Figura 17. Probetas para ensayo de tracción	29

Figura 18. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo	30
Figura 19. Falla de probetas con 40% de colas en arena	31
Figura 20. Falla de probetas con 40% de colas en arena	32
Figura 21. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo	32
Figura 22. Valores de porosidad	34
Figura 23. Valores de permeabilidad	35

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Mesa concentradora Wilfley	41
ANEXO B. Clasificación de los morteros	43
ANEXO C. Caracterización de los componentes del mortero	47
ANEXO D. Relación entre porcentaje de Fluidez y Relación Agua/Cemento	51
ANEXO E. Etapas para Pruebas Preliminares: Concentración en Mesa Wilfley	52
ANEXO F. Ensayos de laboratorio para Mortero	54
ANEXO G. Caracterización del mineral de Galena	62
ANEXO H. Modelo mejorado por el paquete estadístico	64
ANEXO I. Mineral de Galena (PbS)	65

## INTRODUCCION

Las actividades mineras generan grandes cantidades de contaminantes, dentro de ellos los residuos sólidos, de los cuales los más importantes en términos de volumen son los estériles y desechos de procesamiento como es el caso de las colas obtenidas a partir del beneficio convencional de la galena, por lo cual es muy importante encontrar un aprovechamiento para evitar la disposición de dichos sólidos en escombreras que a la larga representan un pasivo ambiental.

Las prácticas actuales de manejo de residuos sólidos en la industria apuntan hacia dos direcciones: por un lado la minimización y el reaprovechamiento de residuos, por otro el tratamiento y la disposición final.

Siempre hubo interés en minimizar la relación estéril/mineral por razones de costo, de la misma manera que las principales empresas normalmente mantienen una búsqueda constante tratando de aumentar la recuperación de mineral en el proceso de beneficio. Actualmente, como consecuencia de presiones ambientales, algunas empresas de minería están procurando alternativas de utilización de residuos.

Los desechos pueden ser objeto de disposición superficial, subterránea o subacuática. Este último método ha sido a vía de ejemplo condenado por razones ambientales debido a los impactos negativos que provoca a los ecosistemas acuáticos.

Cuando la pulpa de desechos presenta una fracción arenosa es posible utilizarla como material de construcción, en general, cualquier aplicación que conlleve a un nuevo uso de los desechos es favorable.

Estos poseen un valor intrínseco en su capacidad de ser nuevamente utilizados.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Obtener mortero a partir de colas del beneficio gravimétrico de la galena de la zona de Pescadero (Santander).

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Implementar un proceso gravimétrico basado en corrientes laminares de agua que permita un buen grado de separación.

Seleccionar mezclas de colas del beneficio gravimétrico de la galena y material virgen para la obtención de mortero.

Obtener a nivel de laboratorio un mortero, que cumpla con las especificaciones y normas técnicas necesarias, con las mezclas seleccionadas en el paso anterior.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

La concentración gravimétrica se basa en la diferencia de peso específico entre el mineral valioso y los minerales ganga para lograr la separación.

Esta separación es posible debido al diferente comportamiento que presentan las partículas de mineral pesado y la ganga, cuando actúan sobre ellas la fuerza de la gravedad y otras fuerzas en un medio fluido homogéneo.

La concentración gravimétrica se constituye en una alternativa sencilla de alta capacidad, sin reactivos peligrosos, de bajo costo y de una eficacia razonable, para separar minerales pesados valiosos de la carga bruta.

#### **Mesa Wilfley**

La mesa concentradora Wilfley es un mecanismo sencillo de concentración gravimétrica que sirve para separar dos o más materiales de distinto peso específico. Consiste en una superficie plana rectangular o romboidal ligeramente inclinada; por lo general constituida de madera revestida con materiales de alto coeficiente de fricción tales como linóleo, caucho, plástico o fibra de vidrio. El tablero posee pendiente ajustable y se ubica sobre unos soportes o guías que permiten que efectúe un movimiento longitudinal vibratorio consistente en un golpe lento hacia delante y un movimiento rápido de retorno.

- **Movimiento de las partículas**

Sobre el tablero las partículas están bajo el efecto de dos fuerzas: la debida al movimiento de vaivén de la mesa que es de aproximadamente de 200 a 300 sacudidas por minuto, y otra perpendicular a la anterior debida a una

película fluyente de agua la cual se hace desde la parte superior de la mesa, obligando así al arrastre de las partículas de mineral a través de la superficie de la mesa, siendo retardado el movimiento por una serie de listones o rifles longitudinales (Figura 1.). En los espacios Inter-rifles las partículas se estratifican de acuerdo a su peso específico y granulometría, de tal modo que las más finas y pesadas quedan en el fondo, mientras que las grandes y livianas se ubican en la parte superior (ver anexo A).

**Figura 1. Distribución de las partículas en los espacios inter-rifles**



Fuente: autoras de esta investigación

**Figura 2. Mesa de sacudidas o mesa Wilfley en laboratorio de la Planta de Aceros UIS**



Fuente: autoras de esta investigación

La concentración en mesa Wilfley presenta ciertas ventajas y desventajas en comparación con otros tipos de concentración (ver Anexo A).

- **Criterio de concentración**

Mide la capacidad que tienen dos minerales de separarse en función de la gravedad. Esta dada por la siguiente expresión:

$$\text{Criterio de concentración (C.C)} = \frac{(\rho_1 - \rho)}{(\rho_2 - \rho)}$$

Donde:  $\rho_1$ = peso específico del mineral pesado

$\rho_2$ = peso específico del mineral liviano

$\rho$ = peso específico del fluido, generalmente agua, se asume igual a

1

Si C.C es mayor o igual a 2.5, la separación es irrealizable para todos los rangos granulométricos superiores a malla 200.

Si C.C esta entre 2.5 y 1.75, la separación es efectiva para granulometrías superiores a malla 100.

Si el C.C esta entre 1.75 y 1.5, la separación es posible para granulometrías superiores a malla 10.

Si el C.C es menor que 1.25 la separación gravimétrica no es aplicable económicamente.

En este proyecto el criterio de concentración C.C= 3.9, lo que demuestra que para granulometrías menores a malla 200, la separación es realizable.

- **Variables de operación**

Entre las variables mas importantes que afectan la operación de la mesa se encuentran:

- ◆ Granulometría de la alimentación
- ◆ Longitud y frecuencia del ciclo de pulsación (stroke).
- ◆ Inclinación de la mesa
- ◆ Cantidad de agua de lavado
- ◆ Rifle y superficie de la plataforma
- ◆ Densidad de pulpa y velocidad de flujo

## **1.2 MORTERO**

El mortero es una mezcla plástica de cemento, agua, arena y aditivos, que dependiendo de la dosificación ofrece la trabajabilidad y resistencia suficientes para ser utilizado básicamente en tres aspectos: pega de unidades de mampostería, relleno en mampostería estructural, recubrimiento de muros y eventualmente en pisos cuyas funciones y definiciones se encuentran bastante diferenciadas.

Dependiendo de las circunstancias particulares de cada proyecto, el criterio para la selección del mortero se debe basar en las propiedades del mortero en estado plástico o en estado endurecido. Ambas son igualmente importantes y necesarias para lograr un buen resultado final.

### **1.2.1 Propiedades del mortero en estado plástico (fresco)**

#### **Manejabilidad**

La manejabilidad en los morteros se refiere a la facilidad de colocación de la mezcla, tanto en unidades de mampostería como en recubrimientos; y depende de la consistencia la cual se refiere al estado de fluidez del mortero. Los factores que influyen en la fluidez se puede nombrar los siguientes: relación agua/cemento, relación cemento/arena y granulometría de la arena, entre otros. (ver Anexo B). Los valores de fluidez cambian también de acuerdo con la utilidad del mortero (ver anexo B).

Para el proyecto se trabajó con una consistencia media plástica, ideal para pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos.

#### **Retención de agua**

Mide la capacidad del mortero de mantener su plasticidad al ponerse en contacto con una superficie absorbente.

La retención del agua incide altamente en la rata de endurecimiento y en la resistencia final a la compresión, es decir, una mezcla incapaz de retener agua no permite la hidratación de los materiales cementantes.

### **Velocidad de endurecimiento**

La hidratación de los materiales cementantes se puede ver afectada por condiciones como el tipo de curado, la humedad de la mezcla o la composición de ésta, factores que producen la mayor parte de la hidratación en las horas iniciales. Una vez evaporada el agua de la mezcla, la hidratación adicional será muy lenta, dependiendo de la humedad ambiental.

## **1.2.2 Propiedades del mortero en estado endurecido**

### **Retracción**

Hace referencia a los cambios de volumen debidos a las reacciones químicas que ocurren en el momento de la hidratación del cemento y que ocasionan la aparición de grietas, especialmente en aquellas con relaciones altas de agua/cemento.

### **Adherencia**

La adherencia es la capacidad del mortero de soportar cargas normales y tangenciales a la superficie de contacto.

### **Resistencia**

El mortero aplicado debe servir de unión resistente, para lo cual se necesita de alta resistencia a la compresión cuando debe soportar altas cargas y sucesivas.

### **Durabilidad**

En un mortero la durabilidad se refiere a la capacidad de resistir a agentes externos como la temperatura, la penetración del agua, el desgaste por

abrasión, la retracción al secado, agentes corrosivos, y ciclos de congelamiento y descongelamiento, etc. sin afectar sus condiciones físico-químicas con el tiempo.

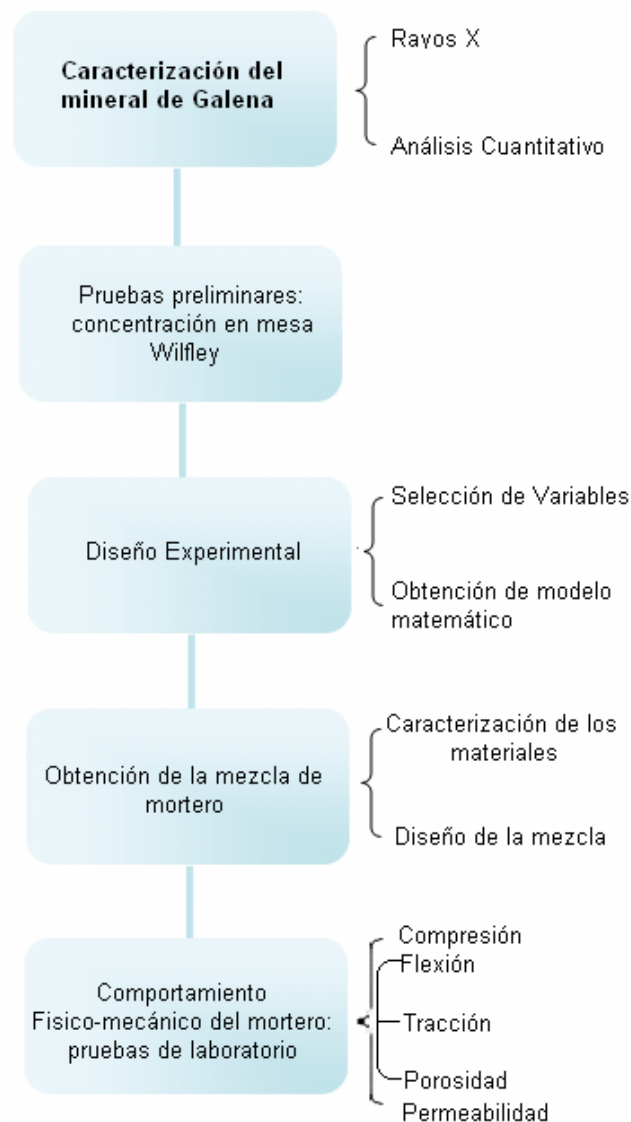
Los morteros se clasifican según:

- ◆ El tipo de composición
- ◆ El tipo de preparación
- ◆ La función que cumplen (Ver Anexo B).

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo en cinco etapas como se ilustra en la figura 3.

**Figura 3. Diagrama de flujo del Desarrollo Experimental.**



## 2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

La caracterización del mineral de Galena (ver Anexo I) se lleva a cabo con el fin de determinar la composición de la muestra empleada para el desarrollo de este trabajo.

Para el presente estudio se caracterizó el mineral de galena realizando 2 tipos de análisis:

- Análisis cualitativo por rayos X (ver Anexo G).
- Análisis cuantitativo elemental de espectrometría por fluorescencia. (ver Anexo G).

## 2.2 PRUEBAS PRELIMINARES CONCENTRACIÓN EN MESA WILFLEY

Se desarrollaron pruebas preliminares con el propósito de determinar los niveles más adecuados para las variables de entrada utilizadas en el diseño experimental.

### Variables utilizadas:

- ◆ Flujo de agua de lavado (L/min.)
- ◆ Diámetro de partícula (Malla Tyler)
- ◆ Ciclo de pulsación (Stroke)
- ◆ Angulo de inclinación

Dichas pruebas se realizaron mediante las siguientes etapas:

**2.2.1 Obtención de la Muestra:** Se obtuvo el mineral de Galena de las pilas ubicadas en la zona de Pescadero (Santander).

**2.2.2 Trituración gruesa:** La trituración se realizó en la trituradora de mandíbula que se encuentra en la planta de aceros Álvaro Quiroga Correa. La muestra fue reducida a un tamaño, entre 1-1.5 cm. (ver Anexo E)

**2.2.3 Trituración fina:** Se realizó en el triturador cónico, igualmente ubicado en la planta de aceros Álvaro Quiroga Correa, donde se obtuvo un tamaño de partícula menor a malla 30 (Tyler). (Anexo E)

**2.2.4 Molienda:** el mineral después de triturado, se molió en el molino de discos ubicado en el laboratorio de la planta de aceros de la UIS.

**2.2.5 Tamizado:** Posteriormente la muestra fue tamizada utilizando los tamices 10, 20, 30, 50, 65, 120 y 200 (Malla Tyler) con el fin de obtener los tamaños de partículas utilizados en las pruebas preliminares de separación en mesa Wilfley.

**2.2.6 Concentración en Mesa Wilfley:** La concentración se realizó en mesa Wilfley ubicada en el laboratorio de la planta de aceros Álvaro Quiroga Correa de la universidad. De acuerdo a la revisión bibliográfica se realizaron los ensayos bajo las siguientes condiciones operativas constantes:

- ◆ 2 etapas: Rougher y Scavenger: (Ver Anexo E).
- ◆ Alimentación: 400 g. de mineral.
- ◆

Los datos obtenidos de peso y porcentaje de plomo de las colas de la etapa Scavenger en las pruebas preliminares se muestran en la tabla 3 (capítulo 3).

### **2.2.7 Determinación de las variables fijas y los niveles para el diseño experimental a partir de las pruebas preliminares**

Para determinar los valores adecuados para trabajar el diseño experimental se determinó mediante espectrometría por fluorescencia el porcentaje de plomo en las colas obtenidas en cada una de las pruebas preliminares. Esto debido a que el objetivo es obtener una buena separación gravimétrica con bajo contenido de plomo en las colas.

- **Diámetro de Partícula**

Se realizó la concentración gravimétrica en mesa Wilfley con distintos diámetros de partícula del mineral (-65, -100, -120 mallas). Durante las pruebas se mantuvo constantes las demás variables: Flujo de agua = 11 l/min.; Angulo= 25°; Ciclo de pulsación= 5; con un peso de alimentación de 400 g.

- **Angulo de inclinación**

Se desarrollaron las pruebas en la mesa Wilfley utilizando diferentes ángulos de inclinación de la mesa (10 °, 15° y 20°); se utilizó una alimentación del mineral de galena de 400 g, las demás variables se mantuvieron constantes: Flujo de agua = 11 l/min.; ciclo de pulsación=5; y Dp = -100.

- **Flujo de agua**

Se realizaron pruebas de separación en la mesa Wilfley variando el flujo de agua (7, 11 y 17 l/min.), se alimentaron 400 g de mineral de galena para cada una de las pruebas, las demás variables se mantuvieron constantes: ciclo de pulsación =5; Dp = -100 y Angulo= 25°.

- **Ciclo de pulsación**

Para determinar el valor de ciclo de pulsación más adecuado se realizaron pruebas para ciclo de pulsación de 4, 5 y 6 mm., manteniendo constantes el Flujo de agua = 11 l/min.; ángulo de inclinación =25° y diámetro de partícula= -100 (malla Tyler), alimentación de 400 g de mineral.

### **2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL DE PRUEBAS DE CONCENTRACION**

Mediante el diseño experimental se planifican racionalmente las experiencias a desarrollar, obteniéndose la información requerida en un número de experimentos ahorrando tiempo y dinero. El diseño experimental se caracteriza por la manipulación de una o más variables a las cuales se les

asignan valores aleatorios para provocar cambios en las variables dependientes.

### **2.3.1 Requerimientos mínimos para llevar a cabo la parte experimental:**

- Homogeneidad del material de alimentación.
- Densidad de pulpa (cualquier fluctuación altera las condiciones de transporte del agua hacia afuera de la corriente).

### **2.3.2 Selección de variables:**

Es una de las etapas más importantes del diseño experimental. Se trata de definir las variables a evaluar y conocer de qué tipo son. El diseño experimental a implementar se basa en el sistema multivariable, que tiene dos tipos de variables: variables de entrada y variables de salida.

#### **Variables de entrada:**

Son las variables independientes, es decir son las que se manipulan y, dependiendo de los valores que se le asignen, determinan el valor de otras variables (variables dependientes).

Para el presente estudio se definieron tres variables de entrada a cada una se le asignaron 2 niveles de acuerdo a los resultados de las pruebas preliminares:

- Flujo de agua
- Granulometría o diámetro de partícula.
- Angulo de inclinación

#### **Variables de salida:**

Son las variables dependientes. El valor que tomen esta determinado por el valor de las variables de entrada. En este estudio nos interesa la

concentración de plomo en las colas, por lo tanto se define como la variable de salida:

- Concentración de plomo (Pb), en las colas.

**Condiciones operativas constantes:**

Durante la experimentación se mantienen constantes algunas variables de operación. Los valores de cada una de estas variables se obtuvieron de la revisión bibliográfica y de pruebas preliminares:

- Alimentación: 500 g de mineral.
- Ciclo de pulsación: 5

El sistema que se utiliza en diseño de experimentos en la presente investigación es el Factorial  $2^n$  donde la base 2 corresponde al número de valores que toma cada variable, y n el número de variables independientes, luego para nuestro caso se utiliza un diseño factorial  $2^3$ . Este tipo de diseño permite conocer el efecto combinado de las variables independientes y se tienen en cuenta todas las posibles combinaciones de valores para las variables de entrada, resultando así 8 experiencias como se indica en las tablas 1 y 2. Los niveles para cada una de las variables se obtuvieron a partir de las pruebas preliminares.

**Tabla 1. Niveles de las variables independientes**

Variable		Niveles	
<b>A</b>	Flujo (L/min.)	11	14
<b>B</b>	Diámetro de partícula (Malla Tyler)	-100	-120
<b>C</b>	Angulo de inclinación (°)	15	18

**Tabla 2. Pruebas resultantes para el diseño experimental**

Ensayo	Combinaciones		
	A	B	C
1	11	-100	15
2	11	-120	15
3	11	-100	18
4	11	-120	18
5	14	-120	15
6	14	-100	18
7	14	-100	15
8	14	-120	18

### **2.3.3 Análisis estadístico a partir de los resultados del diseño experimental.**

Los resultados obtenidos a partir del diseño experimental permitieron llegar a un modelo matemático por medio de un paquete estadístico. Esto permite por medio de graficas y variables estadísticas analizar los efectos de cada una de las variables y sus posibles interacciones sobre el polinomio respuesta. Mediante el modelo matemático se puede optimizar el porcentaje de plomo en las colas, que para esta investigación se requiere minimizar.

## **2.4 OBTENCIÓN DE LA MEZCLA DE MORTERO**

**2.4.1 Caracterización de los materiales empleados.** Los procedimientos y materiales empleados deben ser controlados por las normas vigentes del país (NTC) y algunas de interés internacional (ASTM), las principales normas a utilizar en la caracterización de los materiales están incluidas a continuación.

◆ **Cemento.** El cemento utilizado es un cemento hidráulico, encargado de brindar la mayor parte de la resistencia al mortero inicialmente, siendo igualmente el primer agente conglomerante del conjunto.

El cemento utilizado es producido por “Cementos Paz del Río”, referenciado como Pórtland Tipo I, en su presentación de 50 Kg. con los siguientes datos:

- Peso Específico (NTC221) 2.93 g/cm<sup>3</sup>
- Tiempo de fraguado (NTC 118) 0.58 horas
- Consistencia normal del cemento (NTC 110) 25.15%

La consistencia del cemento depende de la penetración de Vicat para diferentes porcentajes de agua respecto del peso del cemento, estos datos se muestran en la tabla 1 (ver Anexo C).

◆ **Agua.** Deberá estar limpia, fresca, y exenta de impurezas perjudiciales tales como aceite, ácidos, álcalis, sales, sedimentos, materia orgánica u otras sustancias perjudiciales. Debe cumplir la norma ASTM C-94.

Por lo general, se recomienda que el agua sea potable, sin un pronunciado olor o sabor, esta se puede usar tanto para mezclas de concreto como de mortero.

Se utilizó agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, por lo tanto no se le realizaron análisis químicos, debido a que se considera apropiada para este tipo de mezclas.

◆ **Arena.** La arena utilizada proviene de los depósitos de las riveras del río Chicamocha (Santander). El diámetro de partícula está comprendido entre 0.074 y 4.76 mm. Se hizo la caracterización mediante los siguientes ensayos:

- Tamizado de materiales granulados (Norma NTC 77)
- Método para determinar la masa unitaria de los agregados (Norma NTC 92, ver Anexo C)

- Método para determinar el contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros y hormigones (Norma NTC 127, ver Anexo C)
- Método para determinar el peso específico y absorción de agregados (norma NTC 237, ver Anexo C)

En la figura 4. se observa la serie de tamices utilizados para el proyecto según norma NTC 77.

**Figura 4. Serie de tamices utilizados en el proyecto**



Fuente: autoras de esta investigación

**Análisis granulométrico de la arena:** Se emplearon los siguientes tamices para el análisis granulométrico: No. 4, 8, 16, 30, 50, 100 cumpliendo con la norma NTC 77, (ver Anexo C).

**Ensayo de gravedades específicas, peso unitario y absorción de vacíos para las arenas:** Estos ensayos se realizaron por medio de las normas NTC 92 (Método para determinar la masa unitaria de los agregados), y NTC 237 (Método para determinar el peso específico y la absorción de vacíos. Ver Anexo C).

◆ **Agregado: Colas de la galena.** Se utilizaron las colas obtenidas de la concentración gravimétrica de la galena en mesa Wilfley de las cuales se

escogieron las de menor contenido de Plomo y con diámetro de partícula retenido en malla 120 (Tyler). Se determinó su peso específico y absorción de vacíos (ver Anexo C).

#### 2.4.2 Diseño de mezcla

Las proporciones en volumen de los diferentes tipos de aglomerantes, o de agregados, que integran un mortero, están establecidas por experiencia artesanal y algunos fundamentos teóricos, de acuerdo a su uso o lugar de aplicación.

Para el presente trabajo se utilizó una dosificación de 1:3 en peso, el contenido de agua/cemento de 0.65, que permite alcanzar una fluidez correspondiente al estado plástico (100-120%). (ver Anexo D)

Para el presente trabajo, las proporciones del mortero en peso son:

$$0.65: 1: 3 \text{ (A: C: F)}$$

**Cálculo del contenido de cemento:** Se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$C = \frac{1000}{\left[ \frac{1}{G_c} + \frac{n}{G_A} + \frac{A}{C} \right]}$$

Donde:

$G_c$ = Peso específico del cemento (2.93 g/ml)

$G_A$ = Densidad aparente seca de la arena (2.5 g/ml)

$n$ = Proporción arena cemento

$A/C$ = Relación Agua/Cemento (0.65)

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$C = \frac{1000}{\left[ \frac{1}{2.93} + \frac{3}{2.5} + 0.65 \right]} = 456.35 \text{ Kg}$$

Arena= 3 \* 456.35 = 1369.05 Kg.

Agua= 0.65 \* 456.35 = 296.63 Kg.

Los anteriores cálculos se obtienen para una cantidad de 1m<sup>3</sup> de mortero.

Para la obtención de las proporciones de la mezcla con agregado de colas de mineral de galena, se reemplazará parte del agregado fino por este aditivo, cuyo peso específico es 2.77 g/cm<sup>3</sup>. Las proporciones a reemplazar son: 0, 30, 40 y 60% del volumen total de la arena por partículas del agregado de colas de mineral de Galena retenidas en malla 120 (Tyler).

## **2.5 COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DEL MORTERO: PRUEBAS DE LABORATORIO**

Como parte final del desarrollo de la etapa experimental de este trabajo se realizaron diversos ensayos de caracterización (ver anexo F) de acuerdo a normas NTC del mortero adicionado con agregado de colas de Galena frente a su comportamiento físico mecánico, como son:

- ◆ Compresión (NTC 220)
- ◆ Flexión (NTC 120)
- ◆ Tracción (NTC 119)
- ◆ Porosidad
- ◆ Permeabilidad

### 3. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL DE GALENA

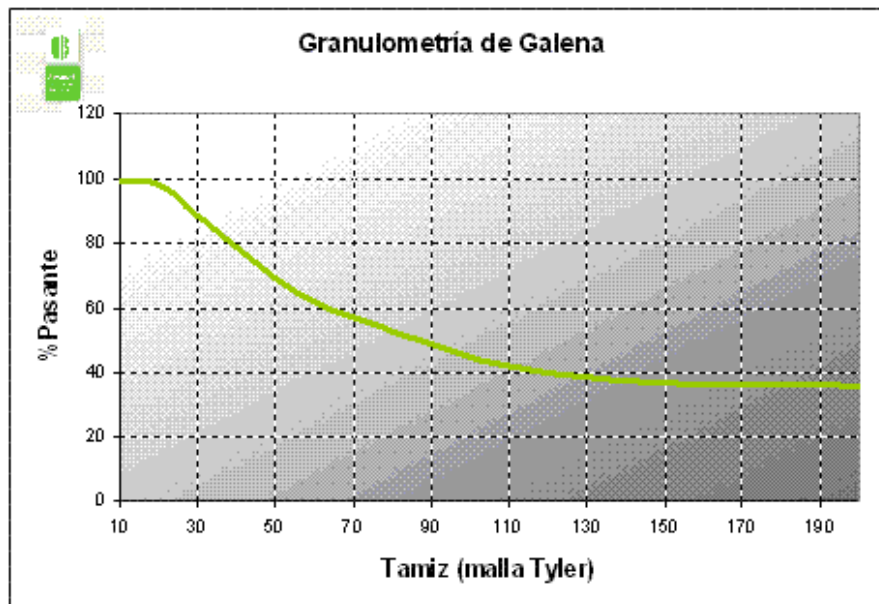
La muestra triturada y molida hasta un tamaño de partícula menor a malla Tyler 120 se analizó por medio de difracción de rayos X, para determinar las especies cristalinas presentes en el mineral. De acuerdo a la figura 1. (ver Anexo G) se observa que las especies que se encuentran presente son: Galena, Cerusita, Fluorita, y Cuarzo.

También se determino el porcentaje de cada elemento presente en el mineral, por medio de espectrometría por fluorescencia de rayos X. (ver Anexo G).

#### Granulometría del mineral de galena:

La muestra de mineral triturada y molida se tamizó para determinar su granulometría. (Ver Anexo G).

Figura 5. Granulometría de la muestra de Galena utilizada.



Fuente: Datos obtenidos en esta investigación.

### **3.2 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES FIJAS Y LOS NIVELES PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL A PARTIR DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES**

Se analizaron las colas obtenidas en la etapa Scavenger para cada una de las pruebas preliminares, por espectrometría por fluorescencia de rayos X, los resultados se indican en la tabla 3.

Analizando los datos que se muestran en la tabla 3. se puede afirmar que al aumentar el flujo de agua aumenta también el porcentaje de plomo en las colas, y a su vez aumenta la cantidad de livianos. Esto se debe a que a mayor flujo, las partículas son más fácil y rápidamente arrastradas hacia el extremo de descarga de colas.

En cuanto al efecto del ángulo de inclinación, se observa que a menor ángulo de inclinación de la mesa, se obtiene menor cantidad de livianos debido a que el agua de lavado se distribuye mejor sobre la superficie de la mesa en el mismo sentido del movimiento del ciclo de pulsación, arrastrado gran parte del mineral hacia el extremo de descarga de pesados.

Por el contrario, cuando se aumenta demasiado el ángulo de inclinación, el mineral es más fácilmente conducido por el flujo de agua hacia el extremo de descarga de livianos obteniéndose mayor cantidad de colas. El porcentaje de plomo en las colas aumenta tanto para ángulos altos como para ángulos bajos.

**Tabla 3. Peso y porcentaje de plomo de las colas de la etapa Scavenger en pruebas preliminares**

Variables	Valores	Peso de colas (g)	Porcentaje de plomo Pb (%)
Flujo de agua (L/min.)	7	301.26	13,21
	11	308.5	8,9776
	17	360	12,014
Angulo de inclinación(°)	10	6.0	4,358
	15	60.2	2,585
	20	244.3	3,684
Diámetro de partícula(malla Tyler)	65	330	11,457
	100	310	9,5921
	120	269.5	6,845
Ciclo de pulsación (stroke)	4	274.2	10,104
	5	308.5	8,8789
	6	318.5	10,302

Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

El efecto del diámetro de partícula sobre la cantidad de colas obtenidas y sobre la concentración de plomo en estas es directamente proporcional. Se aprecia claramente en la Tabla 3. que a mayores diámetros como el retenido en tamiz 65 (Tyler), se obtienen grandes cantidades de colas pero a su vez el contenido de plomo es mayor.

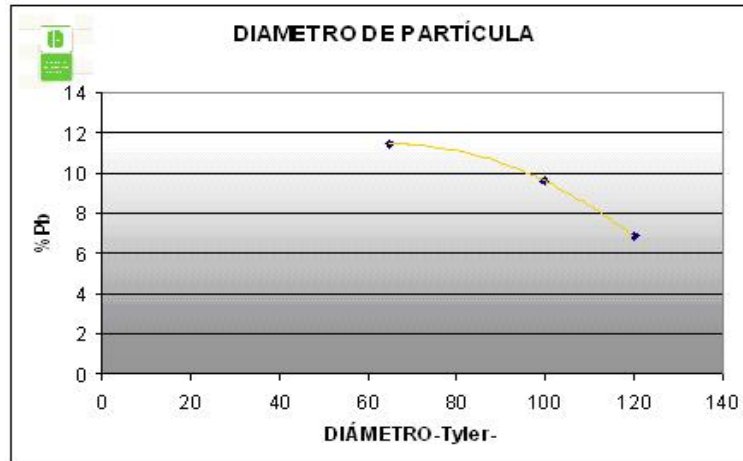
Para analizar el efecto del ciclo de pulsación sobre las pruebas, se observa que a mayores ciclos se obtienen cantidades mayores de colas, esto puede explicarse por el hecho de que un movimiento más rápido de la mesa no permite que las partículas de mineral se distribuyan totalmente sobre los rifles.

### 3.2.1 Determinación de los niveles para el diámetro de partícula

Puesto que lo que nos interesa es obtener colas con el más bajo contenido de plomo posible, para escoger los niveles más apropiados para el diámetro de partícula, se tuvo en cuenta la variación de la concentración de plomo con el diámetro de partícula del mineral empleado. La figura 6 ilustra los resultados obtenidos y se observa que los mejores se obtuvieron con una

granulometría comprendida entre -100 y -120 malla Tyler, por lo tanto se elige este rango para el diseño experimental.

**Figura.6. Diámetro de partícula vs. Porcentaje de Plomo**



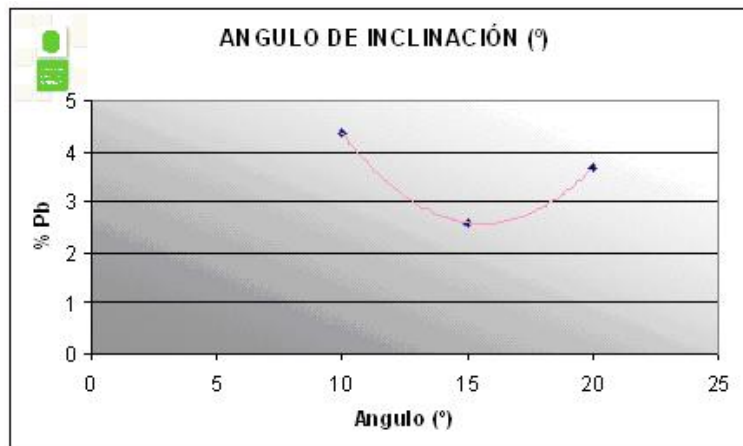
Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

### 3.2.2 Determinación de los niveles para el ángulo de inclinación

Se procedió de igual forma que para la escogencia de los niveles del diámetro de partícula, se analizó la variación del contenido de plomo con respecto a la variación del ángulo de la mesa.

Los resultados se muestran en la figura 7, se observa que el menor contenido de plomo se obtiene para el rango comprendido entre 15° y 18°, siendo éste el de interés para el diseño experimental.

**Figura 7. Angulo de inclinación de la mesa vs. Porcentaje de plomo**

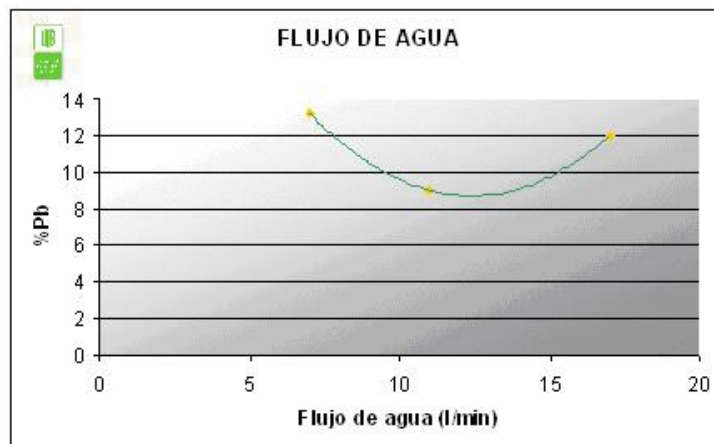


Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

### 3.2.3 Determinación de los niveles para el flujo de agua

Se analizó la variación de la concentración de plomo en las colas de acuerdo a la variación del flujo de agua empleado. Esta variación se ilustra en la figura 8, se observa que el rango más adecuado de flujo de agua esta comprendido entre 11 y 14 l/min. , puesto que es el rango donde se obtiene el más bajo contenido de plomo, por lo tanto se eligen estos valores para el diseño experimental.

**Figura 8. Flujo de agua vs. Porcentaje de plomo**

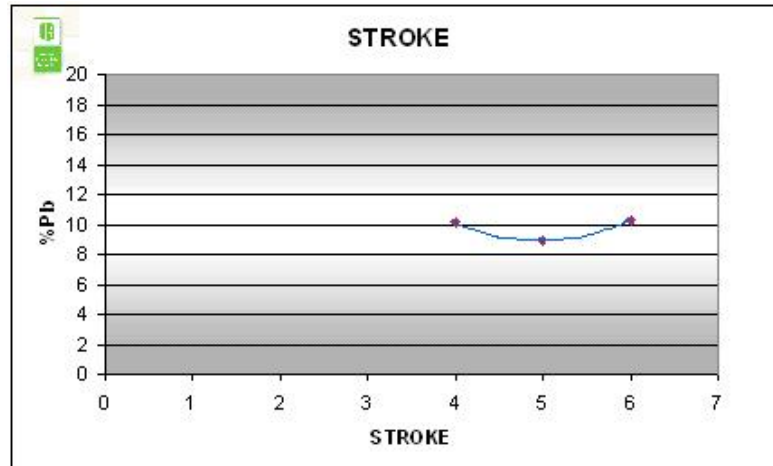


Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

### 3.2.4 Determinación de los niveles para el ciclo de pulsación

Se analizo el porcentaje de plomo en las colas, para cada valor de ciclo de pulsación, los resultados se muestran en la figura 9. Se observa que el menor contenido de plomo se obtiene para un valor de ciclo de pulsación =5; este valor se tomó constante para el diseño experimental.

**Figura 9. Ciclo de pulsación vs. Porcentaje de Plomo**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

### 3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL DE PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Las colas obtenidas en la etapa Scavenger para cada uno de los ensayos del diseño experimental se sometieron a análisis de espectrometría por fluorescencia para determinar el contenido de plomo. Los resultados se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Porcentaje de plomo para cada ensayo**

Ensayos	Repeticiones				Total (% Pb)	Media (% Pb)
	1 (%Pb)	Peso (g)	2 (%Pb)	Peso (g)		
1	3.888	47.1	4.107	60.3	7.995	3.998
2	2.138	142.2	2.019	131.9	4.157	2.079
3	4.312	197.6	4.016	179.4	8.328	4.164
4	2.938	204.2	2.795	200.8	5.733	2.867
5	2.519	189.0	2.673	195.3	5.192	2.596
6	6.759	324.6	6.524	315.9	13.283	6.642
7	3.626	93.1	3.911	101.7	7.537	3.769
8	3.264	234.5	3.351	237.1	6.615	3.308

Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

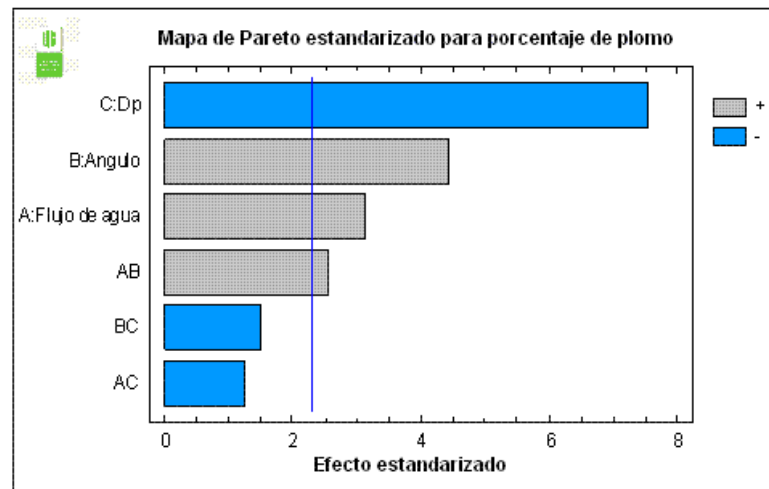
### 3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos del diseño experimental se analizaron por medio de un paquete estadístico para lograr un modelo matemático que represente la

influencia de las variables tomadas en consideración sobre el porcentaje de plomo.

La figura 10. muestra el mapa de pareto estandarizado para porcentaje de plomo. Este tipo de mapas nos permite observar gráficamente la magnitud de influencia de cada una de las variables que intervienen y sus posibles combinaciones. El efecto es significativo si se encuentra a la derecha de la línea azul, y, por el contrario, carece de importancia en el modelo matemático si se encuentra a la izquierda de la línea. Los signos + y – anteceden a cada coeficiente (variables o posible combinación de estas) dentro del polinomio obtenido. Podemos apreciar claramente que en el modelo matemático no solo influyen las tres variables involucradas (diámetro de partícula, ángulo de inclinación y flujo de agua) sino también la combinación del flujo de agua y el ángulo de inclinación.

**Figura 10. Mapa de Pareto**

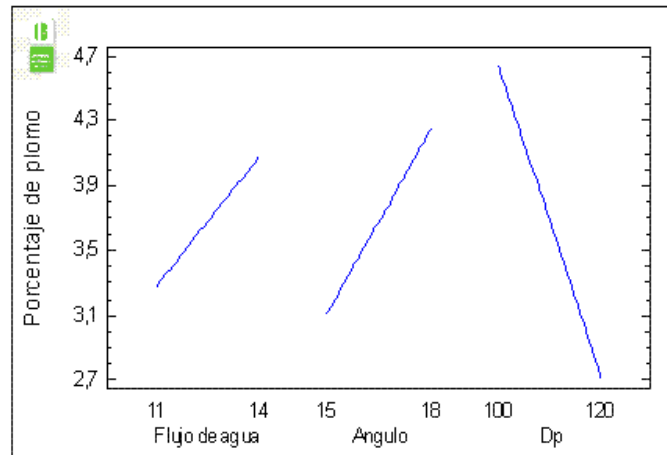


Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

La figura 11, muestra los principales efectos sobre el porcentaje de plomo, en sus respectivos niveles para cada variable según el diseño experimental. Claramente se observa tanto para el flujo de agua, el ángulo como para el diámetro de partícula que un aumento en su valor implica un aumento en el porcentaje de plomo en las colas, siendo esto un efecto indeseable para los propósitos del presente trabajo. A simple vista, se puede deducir que un flujo

de 11 L/min., un ángulo de 15° y un diámetro de partícula correspondiente a malla 120, son los valores más adecuados para obtener bajas concentraciones de plomo en las colas.

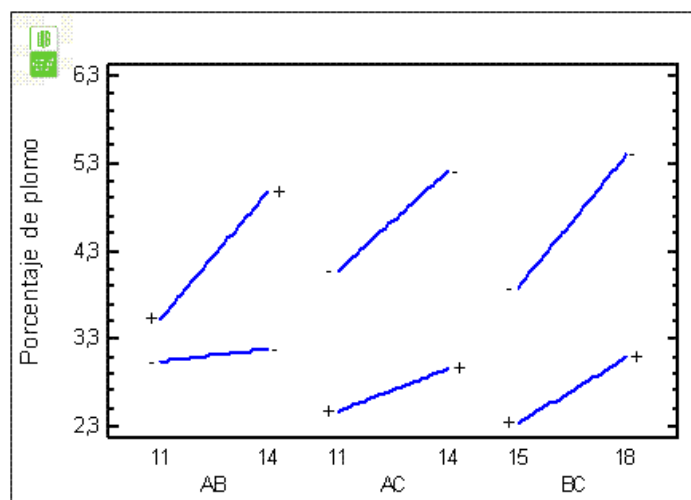
**Figura 11. Principales efectos para porcentaje de plomo**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

La figura 12 muestra gráficamente la interacción entre las variables y su incidencia sobre el porcentaje de plomo. Se puede observar que la interacción más próxima y por lo tanto la mas significativa es la del flujo de agua (A), con ángulo de inclinación (B).

**Figura 12. Gráfica de interacción para porcentaje de plomo**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

Los datos del diseño experimental, se logra obtener el siguiente modelo matemático para porcentaje de plomo:

$$\text{Porcentaje de plomo} = -3,223 - 0,961*\text{Flujo de agua} - 0,036*\text{Angulo} + 0,249*Dp + 0,146111*\text{Flujo de agua}*\text{Angulo} - 0,011*\text{Flujo de agua}*Dp - 0,013*\text{Angulo}*Dp$$

Siendo los dos últimos términos de la ecuación insignificantes, y el polinomio en general válido solamente para los niveles tomados en cuenta para cada variable.

El paquete estadístico utiliza un modelo mejorado que incluye:

- Valor observado para porcentaje de plomo.
- Valor predicho para porcentaje de plomo usando el modelo mejorado por el paquete estadístico.
- Límites con un 95% de confianza para la media. (ver Anexo H)

La tabla 5. muestra un pequeño análisis de sensibilidad, en el que aumentamos el paso para cada variable con el fin de obtener valores de porcentaje de plomo. Este camino parte desde el centro de la región experimental que se puede apreciar en la figura 13., y se puede observar que cambia rápidamente el porcentaje de plomo para pequeños cambios en las variables o factores experimentales. Esto se puede realizar tanto para incrementar o disminuir la variable dependiente, en este caso el porcentaje de plomo.

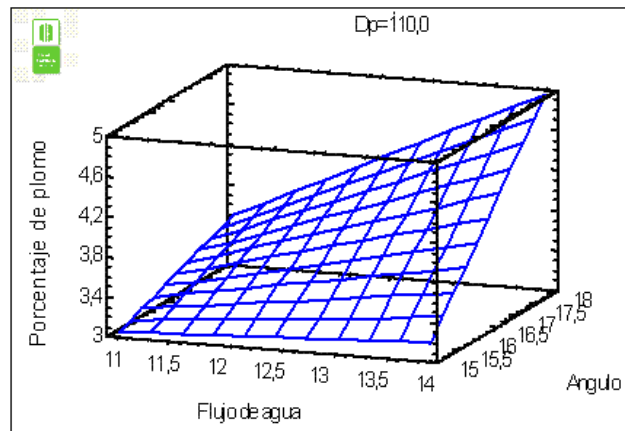
Se generan 6 puntos cambiando el flujo de agua en incrementos de 1.0 L/min. Esta tabla muestra claramente que al aumentar el flujo de agua el porcentaje de plomo en las colas aumenta, siendo ésta una desventaja para los objetivos del presente estudio. Asimismo se observa que el aumento del ángulo y diámetro de partícula permiten obtener porcentajes altos de plomo en las colas.

**Tabla 5. Camino de pasos ascendentes para porcentaje de plomo.**

Flujo de agua (L/min.)	Angulo (°)	Dp (Malla Tyler)	Porcentaje de plomo predicho (%)
12,5	16,5	110,0	3,6775
13,5	17,7539	98,2277	6,05472
14,5	18,8926	89,6331	8,84557
15,5	19,9938	82,1311	12,171
16,5	21,0762	75,2011	16,0514
17,5	22,1472	68,6249	20,4921

Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

**Figura 13. Superficie de respuesta estimada.**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

La tabla 6. muestra la respuesta óptima para el modelo matemático. Como lo que se pretende es minimizar el porcentaje de plomo en las colas, el valor óptimo de porcentaje de plomo a partir del modelo mejorado por el paquete estadístico es 2.42637%.

**Tabla 6. Respuesta óptima.**

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Flujo de agua (L/min.)	11,0	14,0	11.0
Angulo (°)	15,0	18,0	15.0
Dp (malla Tyler)	100,0	120,0	120.0

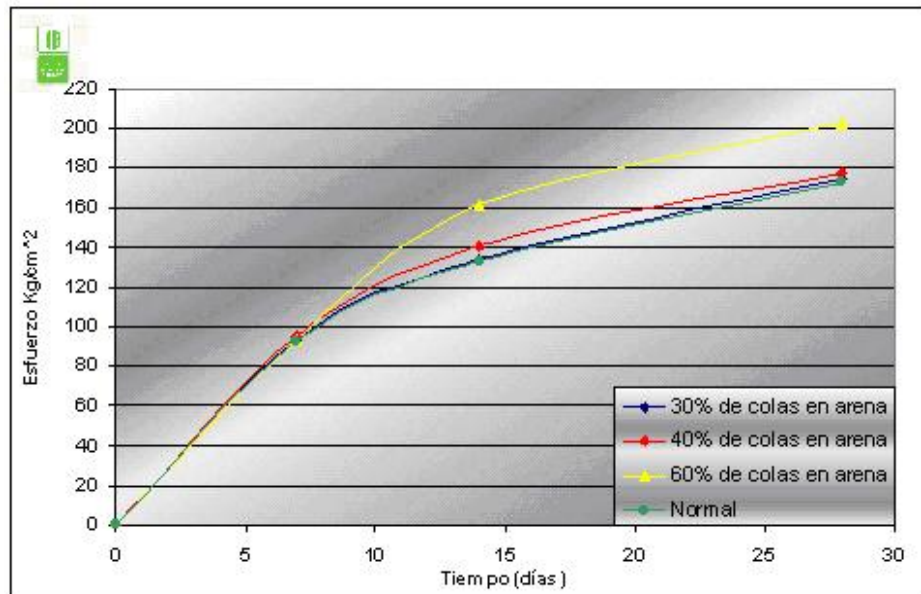
Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

### 3.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS DEL MORTERO OBTENIDO

#### 3.5.1 Ensayo de Compresión

Para analizar la resistencia en mortero con adiciones de colas de la concentración gravimétrica de la galena, se realizaron mezclas reemplazando la arena en diferentes porcentajes (30%, 40% y 60%) por dichas colas. Se realizaron tres probetas cúbicas de 5 cm. de lado para cada tipo de mezcla y se sometieron a ensayos de compresión para 7, 14 y 28 días de curado, y de esta forma determinar la influencia del contenido de colas sobre la resistencia de la mezcla como se ilustra en la figura 14.

**Figura 14. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

Los resultados ilustrados en la figura 14. muestran que un 30% de colas en arena tiene resistencia a la compresión similar a un mortero normal ( 0% de colas en arena) para todos los periodos de curado; para 7 días de curado se presenta una aumento del 1.26%, para un periodo de curado de 14 días el aumento en el esfuerzo de compresión es de 0.72% y para 28 días es de

0.66%. En el caso de la mezcla en la que se reemplaza arena por colas en un 40%, la resistencia a la compresión aumenta con respecto al mortero normal. Se observa un aumento del 2.81% para un periodo de curado de 7 días, del 5.30% para un periodo de 14 días y del 2.89% para un periodo de 28 días.

Este comportamiento puede explicarse por el hecho de que las colas son ricas en sílice y fluorita las cuales le confieren una mayor resistencia al mortero y a que las poseen un diámetro de partícula fino que al mezclarse con la arena normal, cuyo diámetro de partículas es mayor, el mortero se torna mas compacto, pues las partículas finas llenan los más pequeños intersticios que quedan entre los granos de arena.

Para un mortero con 60% de colas en arena, a simple vista se observa un aumento significativo de la resistencia a la compresión con respecto al mortero normal para los periodos de curado de 14 y 28 días, siendo del 21% y del 17.15% respectivamente. Sin embargo, en la experiencia obtenida en esta investigación se dificultó su manipulación en estado fresco y se presentó cierto deterioro y disgregación en el período de curado (Figura 16), por lo tanto se eligió el 40% como el porcentaje de colas en la arena más adecuado para fabricar mortero y para someterlo a los demás ensayos (tracción, flexión, porosidad y permeabilidad).

**Figura 15. Falla de probetas con 40% de colas en arena.**



Fuente: Autoras de ésta investigación.

**Figura 16. Deterioro de probetas con 60% de colas en arena**



Fuente: Autoras de ésta investigación.

### **3.5.2 Ensayo de Tracción**

**Figura 17. Probetas para ensayo de tracción**

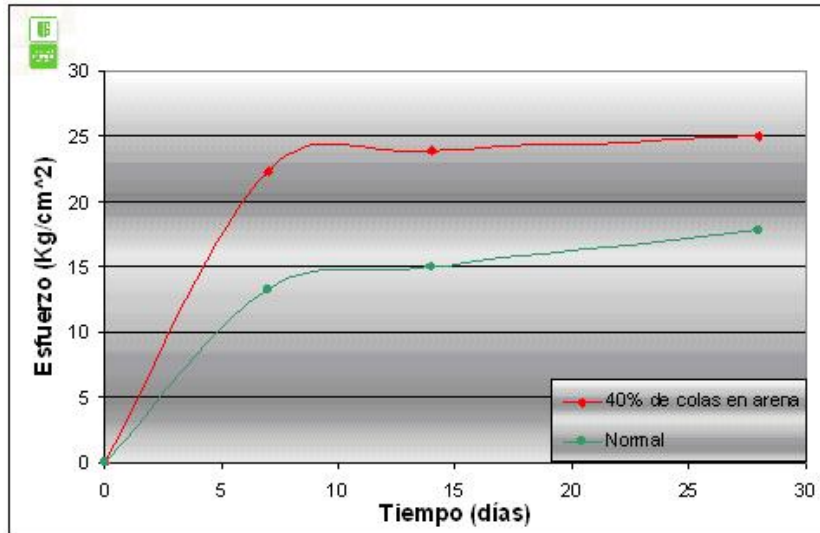


Fuente: Autoras de ésta investigación.

Para el análisis de la resistencia a la tracción en mortero con adición de 40% de colas, se fabricaron 3 probetas para cada periodo de curado de 7, 14 y 28 días (Figura 17.)

Los resultados de este ensayo se expresaran en unidades de esfuerzo ( $\text{Kg-f/cm}^2$ ), calculándolos de la ecuación  $d=F/A$ , donde,  $d$  es el esfuerzo en el mortero,  $F$  es la fuerza aplicada y  $A$  es el área de la sección transversal de la probeta en estudio,  $6.25 \text{ cm}^2$ .

**Figura 18. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

En la figura 18. se aprecia que la resistencia a la tracción es mayor para todos los periodos de curado en el mortero con 40% de colas en arena con respecto al mortero normal, es decir, que esta propiedad se mejora considerablemente con la adición de las colas de la galena. Para un periodo de curado de 7 días la resistencia a la tracción aumenta en un 67.89%; para un periodo de curado de 14 días y 28 días el aumento en la resistencia a la tracción es de 59.67% y 40.21% respectivamente.

**Figura 19. Falla de probetas con 40% de colas en arena.**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

Este comportamiento confirma que las colas de galena, por su diámetro de partícula y composición, hacen que la mezcla sea más compacta y presente mayor resistencia a la tracción.

### 3.5.3 Ensayo de Flexión

Para el análisis de la resistencia a la flexión en el mortero con adición de colas de galena, se fabricaron tres probetas cúbicas para un 40% de colas en arena y para un período de curado de 7, 14 y 28 días.

Los resultados de este ensayo se expresan en unidades de esfuerzo (Kg.-f/cm<sup>2</sup>); el valor de resistencia corresponde el comportamiento de una viga apoyada con una carga central y su cálculo obedece la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{3 * F * L}{2 * a^3}$$

Donde  $\delta$ = Resistencia a la flexión (Kg.-f/cm<sup>2</sup>)

F= Fuerza aplicada al sistema (Kg.-f)

L= Longitud efectiva entre apoyos (14 cm.)

a= Longitud del lado de sección transversal de la viga (4 cm.)

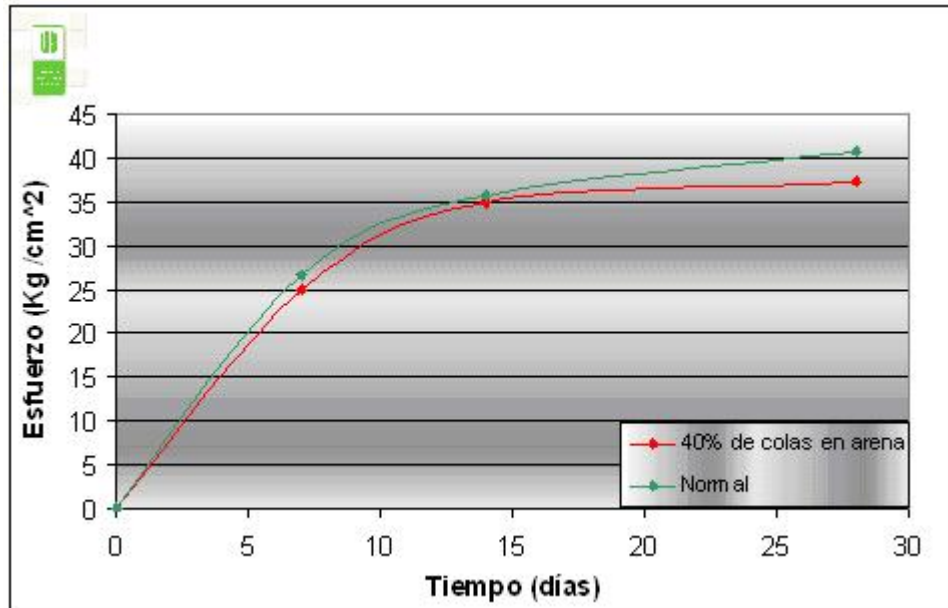
La falla de la probeta ocurre en el momento en el que se somete la sección transversal del elemento, que genera tracción en las fibras exteriores y opuestas a la aplicación de la carga. La probeta se rompe generando la línea de falla como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20. Falla de probetas con 40% de colas en arena**



Fuente: Autoras de ésta investigación.

**Figura 21. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

Analizando la Figura 21. se puede observar que la resistencia a la flexión, para un 40% de colas en arena de la mezcla, disminuye en un 1.88% con respecto al mortero normal para los primeros 14 días de curado. De 14 a 28 días la disminución del esfuerzo a la flexión con respecto al mortero normal es de 9.36%, lo cual representa una disminución mayor.

### 3.5.4 Ensayo de Porosidad

El porosímetro de campo Ruska mide volúmenes del desplazamiento del pistón que corresponden al volumen de sólidos o granos de la muestra, y el volumen total de la muestra; posteriormente, estas medidas se convierten a  $\text{cm}^3$  por medio de las curvas de calibración del manual del porosímetro.

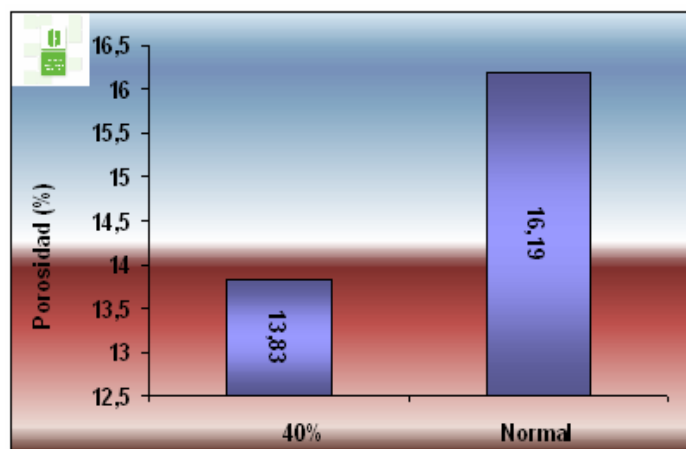
En este caso se determino el valor del volumen de grano, mediante el porosímetro; y el volumen total de la muestra se determino mediante la medición de la longitud de cada uno de los lados de las muestras.

Después de convertir las lecturas de  $R_{core}$  a  $cm^3$ , y de obtener el volumen total ( $R_{Hg}$ ) en  $cm^3$  para cada muestra, se determina el porcentaje de porosidad mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Porosidad (\%)} = (1 - (R_{core} / R_{Hg})) * 100$$

La figura 22. ilustra los datos obtenidos de porosidad para mortero normal, y para mortero en el que se reemplaza 40% de la arena por colas de la galena.

**Figura 22. Valores de porosidad**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

Al analizar la figura 22. se observa que para un mortero normal la porosidad equivale a un 16.19%, mientras que para un mortero con agregado de colas de galena en un 40% en arena, la porosidad disminuye en un 2.36% con respecto al mortero normal. Esto es posible debido a que las partículas más finas de las colas ocupan los intersticios de la arena que posee partículas más gruesas. Este efecto hace que la mezcla se compacte aún más y, por consiguiente, la porosidad disminuya.

### 3.5.5 Ensayo de permeabilidad

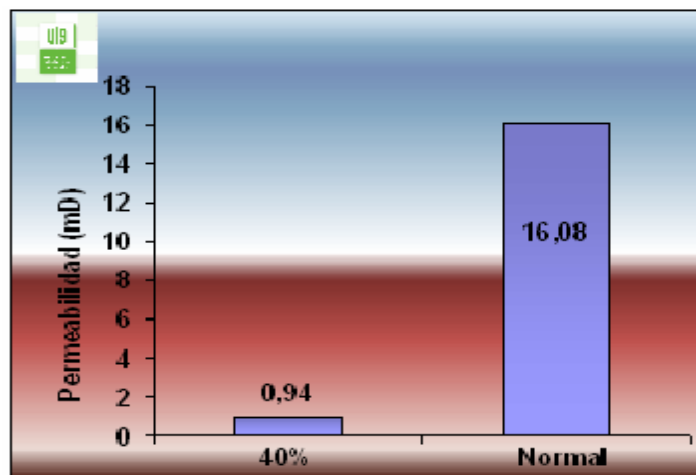
La permeabilidad se obtuvo mediante el permeámetro de gas de Ruska, esta se calculó conociendo el caudal de gas que pasa a través del núcleo, el gradiente de presión, la viscosidad del gas y las dimensiones de la muestra.

La viscosidad del gas (cp) se determinó conociendo la temperatura ambiente a la cual se desarrollo el ensayo. Con las lecturas flowmeter, Rf, y la escala de flowmeter (S, M, o L) se obtuvieron el flujo promedio del gas, Q (cm/s), mediante gráficos de conversión; conociendo estos valores, el gradiente de presión (atm), el área transversal de la muestra, A (cm<sup>2</sup>), y longitud de la muestra, L (cm.), se obtiene la permeabilidad (mildarcys) utilizando la siguiente expresión:

$$K = \mu * Q * L / A * P \text{ (mD)}$$

En la figura 23. se muestran los resultados obtenidos para la permeabilidad de mortero normal, y para el mortero elaborado reemplazando el 40% de la arena por colas de la galena.

**Figura 23. Valores de permeabilidad**



Fuente: Datos obtenidos en ésta investigación.

A partir de los valores obtenidos, se puede analizar que la permeabilidad de la muestra de 40 % de colas en arena es mucho mas pequeña que la de un mortero normal, debido a la dificultad con la que el gas, en este caso el aire, atraviesa la muestra que es mucho mas compacta pues la mayoría de los intersticios se encuentran ocupados por las partículas finas de las colas.

## CONCLUSIONES

- ◆ De acuerdo a los resultados de la concentración gravimétrica en la mesa Wilfley, se puede concluir que se obtiene una buena concentración de la galena cuando se trabaja con diámetros de partículas pequeños (menores que malla 100), esto se debe a que hay un mayor grado de liberación del mineral, también favorece la separación un ángulo de inclinación intermedio, pues esto permite una mejor distribución del mineral sobre la superficie de la mesa.
- ◆ El flujo de agua de lavado es muy importante, ya que este tiene una gran influencia sobre el arrastre de las partículas dependiendo de la densidad de estas, hacia el extremo de salida de livianos o pesados.
- ◆ Es muy favorable la concentración de la galena en la mesa Wilfley, ya que existe una gran diferencia entre las densidades específicas del mineral de interés (PbS) y las gangas o colas ricas en sílice y fluorita.
- ◆ Las colas obtenidas a partir de la concentración bajo las condiciones óptimas de operación, presentan un contenido relativamente bajo de plomo, lo cual no representa un riesgo significativo al utilizarse en la elaboración de mortero para usos convencionales.
- ◆ La concentración en mesa Wilfley, aunque requiera grandes cantidades de agua, no genera un impacto ambiental tan grande como

el ocasionado por otro tipo de concentraciones en las que se hace uso de agentes químicos contaminantes.

- ◆ No es favorable en la elaboración de mortero reemplazar la arena por colas de mineral de Galena en más de un 50%, debido a que un diámetro de partícula tan pequeño, hace que la mezcla requiera de más aglomerante que evite la disgregación del mortero.
- ◆ La utilización en los morteros de colas de mineral de galena, reemplazando un 40% de la arena por estas, aumenta en cierta medida la resistencia a la compresión y a la tracción con respecto al mortero normal, esto constituye una alternativa y el punto de partida de nuevas investigaciones relacionadas con la utilización de colas del beneficio tanto de la galena como de otros minerales.
- ◆ La porosidad disminuye al reemplazar la arena por un 40% de colas de galena, evidenciando la mayor compactación de la mezcla por efectos del menor tamaño de partícula de las colas utilizadas.
- ◆ En el mortero fabricado con colas de galena la permeabilidad disminuye con respecto al mortero normal, debido a la dificultad con la que el aire, atraviesa la muestra que es mucho mas compacta pues la mayoría de los intersticios se encuentran ocupados por las partículas finas de las colas.
- ◆ El mortero obtenido con la mezcla que incluye colas de gravimetría de beneficio de la galena cumple con especificaciones técnicas (normas NTC).

## RECOMENDACIONES

- ◆ Realizar análisis comparativo tecnológico y económico de beneficio gravimétrico y de flotación de la Galena.
- ◆ Realizar pruebas de obtención de morteros a partir de mezclas que incluyen colas de gravimetría con otros equipos de concentración.
- ◆ Fabricar otros productos para fines ornamentales, a partir de las colas gravimétricas de la Galena.

## BIBLIOGRAFIA

ELEMENTOS DE PREPARACIÓN DE MINERALES. Taggart Arthurf. Madrid, España. Interciencia 1966.

KELLY, E and SPOTTISWOOD, D. Introduction to Mineral Processing. John Wilwy & Sons, Inc. 1982.

PEDRAZA ROSAS, Julio elías. Manual de Procesos de Minerales II. Concentración. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Facultad de Ciencias Físico-Químicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1992.

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO- MECÁNICAS DE UN MORTERO MODIFICADO CON PET RECICLADO. Zabala Pérez Omar Humberto, Sánchez Neira Oscar Javier. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.

OBTENCION Y EVALUACIÓN DEL MORTERO MAGNÉTICO. Gómez Contreras Kelly Esperanza; Gómez Contreras Sandra Liliana. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

<http://www.gama-peru.org/jornada-hg/pantoja.pdf>

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/recurmetal/pag89\\_93.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/recurmetal/pag89_93.pdf)

<http://geologia.igeolcu.unam.mx/Lugis/Molienda.pdf>

<http://ingeominas.gov.co>

# **ANEXOS**

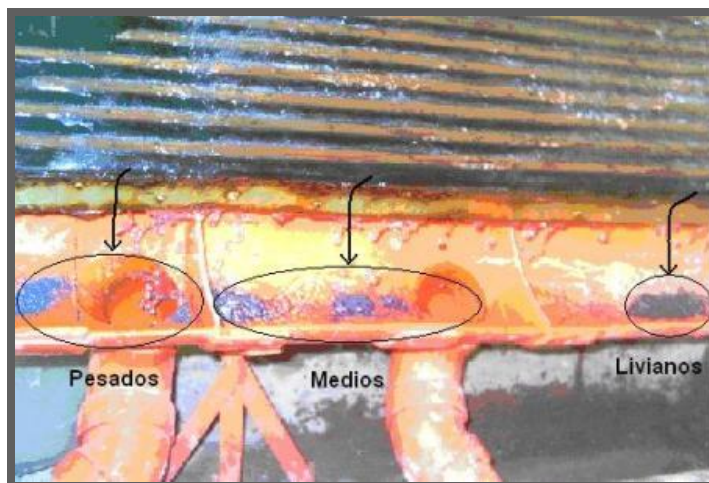
## ANEXO A

### Mesa concentradora Wilfley

- **Ventajas**

- ◆ Descarga continua de productos
- ◆ Permite obtener toda una gama de productos (concentrados o pesados, medios, colas o livianos)
- ◆ Comportamiento visible del material sobre el tablero
- ◆ Costo de producción relativamente bajo
- ◆ Gran flexibilidad
- ◆ Manejo y supervisión relativamente simple
- ◆ Posibilidad de recuperar otros minerales valiosos acompañantes
- ◆ Condiciones de trabajo seguras
- ◆ Buena recuperación y un alto índice de enriquecimiento, poco uso de agua y energía
- ◆ Posibilidad de su producción en países de desarrollo.

**Figura 1. Productos obtenidos en mesa Wilfley.**



Fuente: Autoras de ésta investigación

- **Desventajas**

- ◆ Precio relativamente alto (en relación a su capacidad)
- ◆ Requiere alimentación constante
- ◆ Requiere supervisión continua
- ◆ Requiere motor

- **Tipos básicos**

Hay dos tipos de mesas, la arenadora, que trabaja con material de 3 mm. hasta la malla 200, y la mesa de fangos que trabaja con tamaños de partículas menores a la malla 200; se diferencian en la profundidad y la extensión del sistema de rifles, haciendo profundos los de la mesa arenadora y más superficiales los de la mesa para fangos.

## ANEXO B

### Clasificación de los morteros

Los morteros pueden clasificarse de diferentes maneras, entre ellas se tienen:

**Según el tipo de composición:** Se basa en la clasificación según el tipo de aglutinante o el material distintivo en la fabricación del mortero. Entre estos tenemos:

- ◆ Morteros de cemento: es el tipo de mortero más usado, su principal característica es su alta resistencia y durabilidad.
- ◆ Morteros calcáreos: su componente aglutinante es la cal, se caracteriza por su manejabilidad.
- ◆ Mortero combinado: sus elementos aglutinantes son el cemento Pórtland y la cal hidratada. Esta mezcla se caracteriza por poseer una buena manejabilidad y una resistencia aceptable.
- ◆ Mortero celular: se caracteriza por la incorporación de aire, adición de espuma o cascarilla de arroz. Su principal propiedad es su bajo peso.
- ◆ Mortero polimérico: se caracteriza por poseer propiedades plásticas.

### Según el tipo de preparación

- ◆ Mortero premezclado
- ◆ Mortero preparado in situ

### Según el tipo de función que cumplen

- ◆ Mortero sin función estructural o morteros de recubrimiento; sirven para:
  - Friso o pañete

- Retención de agua
- Pega de enchapes
- ◆ Mortero con función estructural:
  - Morteros para elementos estructurales
  - Morteros de mampostería
  - Morteros de pega

## **Tipos de corrosión o afectación de la durabilidad de un mortero**

### **Corrosión externa**

◆ **Corrosión física:** hace referencia al desprendimiento del material por desgaste mecánico al contacto con agentes externos que gastan sus capas superficiales, más conocido como erosión.

◆ **Corrosión química:** ocurre cuando una disolución agresiva ataca al material, intercambiando iones. Se presenta de dos formas:

- **Corrosión por cambio iónico:** debida a la reacción de cambio entre cargas eléctricas de los componentes de la pasta endurecida de cemento y las sustancias presentes en el agua agresiva.

- **Corrosión por expansión:** se presenta en la superficie de mortero una acción fisico-química instantánea que produce desgaste e intercambio aniónico, lo cual inicia la destrucción del mortero. Esto produce en la estructura expansiones y dilataciones reiteradas que aflojan la composición de la matriz de mortero y producen su inminente desintegración.

◆ **Corrosión por lixiviación:** Causada por la acción de aguas poco carbonadas, aguas blandas y aguas que contienen ácido carbónico.

### **Corrosión interna**

◆ Exceso de yeso en el cemento que se pone en contacto con una solución de cal.

- ◆ Adición excesiva de cenizas volantes al cemento.

**Ataques al mortero por parte del medio ambiente:**

◆ **Ataque por sulfatos:** interacción fisico-química entre los minerales constituyentes de la pasta de mortero y los iones sulfatos presentes en el medio. Manifestaciones:

- Ataque en forma de expansión
- Pérdida de masa o desintegración
- Agrietamiento
- Carbonatación: inclusión de CO<sub>2</sub> atmosférico que reduce la alcalinidad de la pasta y produce la despasivación y como consecuencia la corrosión del acero en elementos estructurales.
- Ciclo de hielo y deshielo: consiste en la congelación y descongelación del agua absorbida por la mezcla de mortero que al pasar de un estado a otro, genera tensiones que agrietan internamente la estructura y generan la pérdida de resistencia y durabilidad.

**Tabla 1. Aplicaciones de morteros según su fluidez**

Consistencia	% fluidez	Condiciones de colocación	Ejemplos de tipo de estructura	Ejemplos del sistema de colocación
Dura (seca)	80-100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento en túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
Media (plástica)	100-120	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres
Fluida (húmeda)	120-150	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección

Fuente: SANCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y el mortero. Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 1987.

**Tabla 2. Uso de los morteros de cemento.**

<b>Mortero</b>	<b>Usos</b>
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones y rellenos
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanque subterráneos. Rellenos
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos
1:5	Pañetes exteriores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos.
1:6 y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler muy pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones.

**Fuente. SANCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y el mortero. Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 1987.**

## ANEXO C

### Caracterización de los componentes del mortero

**Tabla 1. Datos de consistencia del cemento**

CEMENTO	AGUA		PENETRACIÓN	
gramos	%	ml.	Parcial	Promedio
500	26	130	18	18.7
500	26	130	18.5	
500	26	130	18	
500	25	125	9.5	9
500	25	125	8.5	
500	25	125	9	
500	24	120	6.5	6.33
500	24	120	6.5	
500	24	120	6	

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

**Figura 1. Gráfica de la consistencia del cemento.**



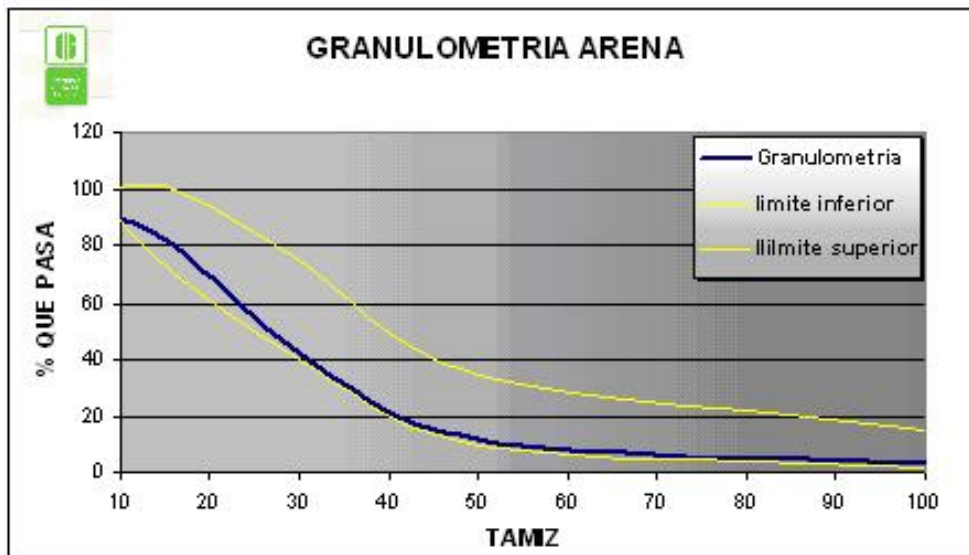
Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

Tabla 2. Granulometría de la arena

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
Tamiz No.	Tamaño (mm)	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
4	4.76	45.8	4.58	4.58	95.42
8	2.38	35.8	3.58	8.16	91.84
16	1.19	118.6	11.86	20.02	79.98
30	0.595	398.6	39.86	59.88	40.12
50	0.297	287.3	28.73	88.61	11.39
100	0.149	80.0	8.00	96.61	3.39
<b>Fondo</b>		33.0	3.30	99.91	0.09
<b>Total</b>		999.1	99.91	<b>Peso muestra</b>	1000 g
<b>Módulo de finura</b>	2.78				

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

Figura 2. Granulometría arena



Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

**Figura 3. Determinación de materia orgánica en arena**



**Fuente: Autoras de este proyecto.**

Este ensayo se realizó mediante el método para determinar el contenido aproximado de materia orgánica en arenas utilizadas en la preparación de morteros y hormigones, descrito en la norma NTC 127.

Se colocó una cantidad de arena (aproximadamente 130 cm<sup>3</sup>) en un frasco y se agregó solución de hidróxido de sodio. Se tapó el frasco, se agitó vigorosamente y se dejó reposar por 24 horas. Después de este tiempo se comparó el color de la solución normal de referencia (hidróxido de sodio), con la del líquido contenido en el frasco con arena. Como el color obtenido fue equivalente al de la muestra de referencia: Contenido de materia Orgánica = 0%.

**Tabla 3. Cálculo de la gravedad específica (Arena).**

GRAVEDADES ESPECÍFICAS			
DATOS:			
A= Peso del frasco+ Agua hasta la marca, en el aire.....		<u>665</u>	Gramos
B= Peso de la muestra en condición S.S.S. en el aire.....		<u>500</u>	Gramos
C= Peso de la muestra. Frasco y agua agregada hasta la marca, en el aire....		<u>965</u>	Gramos
D= Peso de la muestra secada al horno.....		<u>495</u>	Gramos
CÁLCULOS:			
Gravedad específica real.....	$\frac{D}{(A - C + D)}$	=	$\frac{2.54}{}$
Gravedad específica aparente.....	$\frac{D}{(A + B - C)}$	=	$\frac{2.48}{}$
Gravedad específica aparente S.S.S.....	$\frac{B}{(A + B - C)}$	=	$\frac{2.50}{}$ E

**Tabla 4. Cálculo del peso unitario y porcentaje de absorción y de vacíos (Arena)**

PESO UNITARIO NORMANTC 92		
CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR:		
P1= Peso del medidor + vidrio .....		<u>3.04</u> Gramos
P2= Peso del medidor + vidrio + agua.....		Gramos
V= Volumen del medidor.....	$\frac{(P_2 - P_1)}{1000} =$	<u>2.85</u> dm <sup>3</sup>
DATOS:		
Pm = Peso del medidor vacío.....		<u>2540</u> Gramos
Pc= Peso del medidor+ material S.S.S. compactado.....		<u>6885</u> Gramos
Ps = Peso del medidor+ material S.S.S. suelto.....		<u>6281</u> Gramos
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado	$\frac{(Pc - Pm)}{V} =$	<u>1524.6</u> F
Peso unitario del agregado S.S.S. suelto	$\frac{(Ps - Pm)}{V} =$	<u>1312.6</u>
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN Y DE VACÍOS (NORMANTC 237)		
% de absorción.....	$(B-D)*100/D$	<u>=1.01</u> %
% de vacíos.....	$\frac{(E*1000 - F)}{E *10}$	<u>=39.016</u> %

**Tabla 5. Gravedades específicas y porcentaje de absorción (colas de Galena)**

GRAVEDADES ESPECÍFICAS		
DATOS:		
A= Peso del frasco+ Agua hasta la marca, en el aire.....		<u>665</u> Gramos
B= Peso de la muestra en condición S.S.S. en el aire.....		<u>500</u> Gramos
C= Peso de la muestra. Frasco y agua agregada hasta la marca, en el aire ....		<u>990</u> Gramos
D= Peso de la muestra secada al horno.....		<u>485</u> Gramos
CÁLCULOS:		
Gravedad específica real.....	$\frac{D}{(A - C + D)} =$	<u>3.03</u>
Gravedad específica aparente.....	$\frac{D}{(A + B - C)} =$	<u>2.77</u>
Gravedad específica aparente S.S.S.....	$\frac{B}{(A + B - C)} =$	<u>2.86</u>
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (NORMANTC 237)		
% de absorción.....	$(B-D)*100/D$	<u>=3.09</u> %

## ANEXO D.

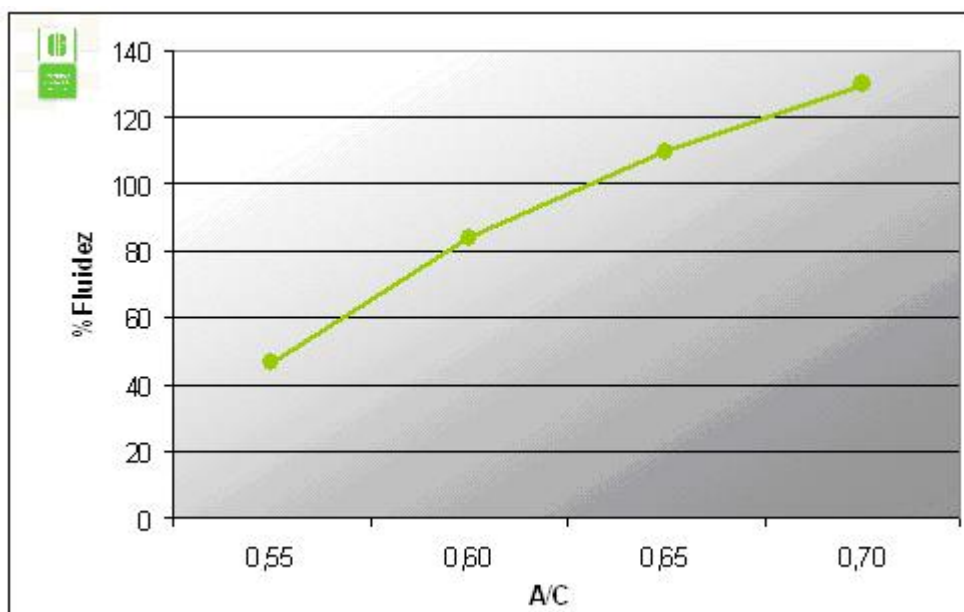
### Relación entre porcentaje de Fluidéz y Relación Agua/Cemento

Tabla 1. Relación entre porcentaje de Fluidéz y Relación A/C

Relación A/C	Rayas	Diámetro	Fluidéz
0.55	10.82	148.74	46.40
0.60	20.23	186.98	84.04
0.65	26.61	212.91	109.56
0.70	31.65	233.40	129.72

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este trabajo.

Figura 1. % de Fluidéz vs. Relación A/C



Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

## ANEXO E.

### Etapas para Pruebas Preliminares: Concentración en Mesa Wilfley

#### ◆ Trituración gruesa.

Figura 1. Trituradora de mandíbula



Fuente: Autoras de este proyecto

#### ◆ Trituración fina

Figura 2. Triturador Cónico



Fuente: Autoras de este proyecto

◆ Molienda

Figura 3. Molino de disco

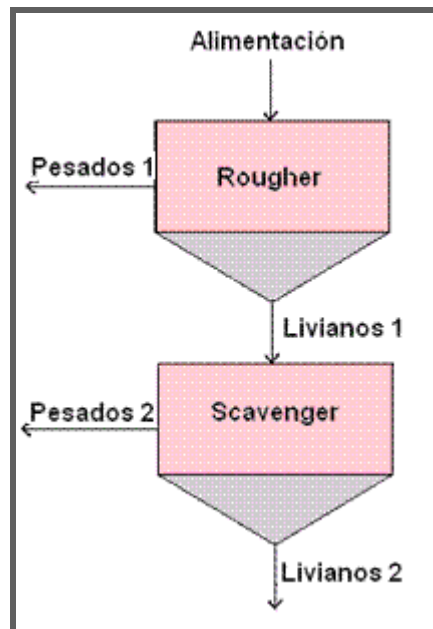


Fuente: Autoras de este proyecto

◆ Tamizado

◆ Concentración en Mesa Wilfley

Figura 4. Circuito de alimentación gravimétrica en la mesa Wilfley



Fuente: Autoras de este proyecto

## ANEXO F.

### Ensayos de laboratorio para Mortero

#### Ensayo de Compresión.

Figura 1. Máquina universal de ensayos TREBEL.



Fuente: autoras de esta investigación

Este ensayo mide el comportamiento del mortero de cemento hidráulico, bajo cargas de compresión.

Para éste ensayo se emplearon probetas cúbicas de 50 mm. de lado, las cuales fueron fundidas conforme a la norma NTC 220 (Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm. de lado). Se mantuvo gran rigurosidad en los requerimientos de la norma para los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas. Este ensayo de compresión de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL (Figura 1.), ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la escuela de Ingeniería Civil, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas. En la evaluación de los resultados se tomó en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en

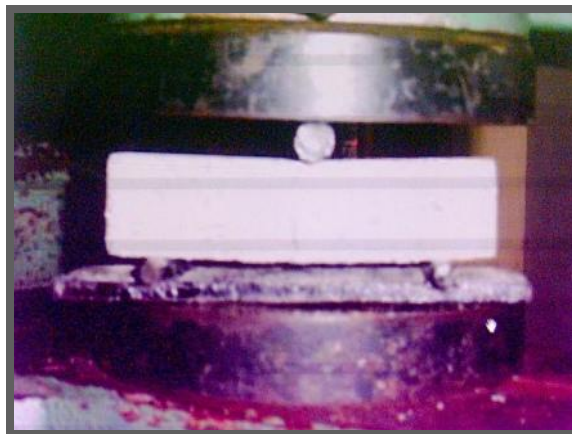
cuanto a los cubos defectuosos y sus correspondientes valores de aceptación.

La resistencia a la compresión de los morteros se evaluó para 7, 14 y 28 días debido a la gran influencia que poseen estas edades dentro de las diferentes propiedades del mortero y la gran importancia para la caracterización de una mezcla.

Igualmente se consideró de gran importancia este ensayo para determinar la resistencia en dichos tiempos para probetas que contenían proporciones de 0, 30, 40 y 60% de partículas de agregado de colas de galena en el volumen total de la arena.

### **Ensayo de Flexión**

**Figura 2. Montaje para el ensayo de Flexión**



**Fuente: Autoras de este proyecto.**

Por medio de esta prueba se puede determinar la resistencia a la flexión de un mortero de cemento hidráulico.

Para este ensayo se fabricaron probetas de una longitud de 16 cm. y una sección cuadrada de 3.55 cm. de lado. Dichas probetas se fundieron de acuerdo a la norma NTC 120 (Método para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico), empleando las herramientas correspondientes tales como molde, compactador, guías del compactador,

etc. Se mantuvo gran rigurosidad en los requerimientos de la norma para los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas. El ensayo de flexión de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL (Figura 2), ubicada en el Laboratorio de Resistencia de materiales de la escuela de Ingeniería Civil, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos. Para este ensayo se reemplazó el montaje recomendado por la norma, debido a la dificultad en la obtención del dispositivo para el apoyo de las probetas en el apoyo de la carga, por otro realizado con materiales encontrados en laboratorio y que cumple satisfactoriamente con la función deseada.

### **Ensayo de Tracción**

**Figura 3. Montaje ensayo de Tracción**



**Fuente: Autoras de este proyecto.**

El ensayo de tracción determina el comportamiento de cemento hidráulico bajo cargas de tensión.

Para este ensayo se utilizaron probetas fundidas de acuerdo a la norma NTC 119 (Método para determinar la resistencia a la tensión de morteros de cemento hidráulico).

Los procesos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas requeridos en la norma NTC 119 se realizaron cuidadosamente para atender a sus requerimientos.

El ensayo de tracción de las probetas se realizó de acuerdo al montaje de la Figura 3, siendo adaptada a las correspondientes exigencias de la norma cumpliendo los requerimientos necesarios para el propósito y dentro de los rangos de carga y velocidad permitidos. Así mismo, se tomó en cuenta las indicaciones complementarias de la norma en cuanto al tratamiento de las probetas y su selección para la evaluación de los resultados.

### **Ensayo de Porosidad.**

**Figura 4. Porosímetro de Campo Ruska**



**Fuente: Autoras de este proyecto.**

Por medio de este ensayo se determina la porosidad de muestras sólidas empleando el Porosímetro de campo Ruska mostrado en la figura 4.

El principio de esta prueba es la ley de Boyle para determinar la porosidad. Las medidas obtenidas son valores de porosidad efectiva. La determinación de la porosidad se realiza midiendo el volumen de sólidos o granos de la muestra seguida por una medición del volumen total de la muestra.

Para realizar la prueba se emplearon los siguientes equipos y herramientas:

- Porosímetro de campo Ruska

- Cápsula contenedora
- Guantes profilácticos
- Muestras de mortero previamente preparadas (para 40% de colas en arena y 0% de colas en arena).

### **Procedimiento experimental para Ensayo de Porosidad**

- ◆ Se fabricaron 3 probetas cúbicas de 5 cm de lado y de 40 % de colas en arena. Se sometieron a curado de 28 días. Después de este período se cortaron 2 cubos de 2 cm. de lado aproximadamente de cada probeta (Figura 5), previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta.
- ◆ Chequear que el porosímetro tenga buenas condiciones de operación (sin fugas en el sistema al hacer presión).
- ◆ Seleccionar previamente la copa más pequeña que pueda alojar la muestra y ajustarla vacía al porosímetro.
- ◆ Con la válvula de descarga abierta llevar el pistón un poco más atrás de la posición de operación. Cada copa tiene una posición específica de inicio así:
  - Copa pequeña: 150
  - Copa media: 250
  - Copa grande: 400
- ◆ Llevar el mecanismo del pistón hacia delante hasta su posición de inicio y no retroceder para evitar el backlash.
- ◆ Cerrar la válvula de descarga y llevar el pistón hacia delante hasta que la lectura de la manga micrométrica sea cero. El nivel de mercurio alcanzado es tomado como referencia: lleve la marca del nivel hasta este punto.
- ◆ Cerrar la válvula de alivio suavemente antes de llevar el pistón un poco mas atrás de su respectiva posición de inicio.

- ◆ Colocar el corazón o muestra dentro de la copa ajustada a cero y anclarla al bloque del manifold.
- ◆ Con la válvula de alivio abierta llevar al pistón hacia delante hasta su posición de inicio correspondiente, sin retroceder.
- ◆ Cerrar la válvula de alivio y llevar el pistón suavemente hacia delante hasta alcanzar el nivel de mercurio de referencia anterior, se debe registrar la medida del micrómetro como  $R_{core}$  que es proporcional al volumen de sólidos de la muestra. Abrir la válvula de alivio y retirar la copa del manifold.
- ◆ Se repiten los pasos anteriores y se obtiene un estimativo proporcional al volumen de mercurio en la copa, el volumen bruto de la muestra se designa como  $R_{Hg}$ .

**Figura 5. Muestras utilizadas en el ensayo de porosidad.**



Fuente: Autoras de este proyecto.

## Ensayo de Permeabilidad

**Figura 6. Permeámetro de Gas Ruska**



**Fuente: Autoras de este proyecto**

Por medio de este ensayo se determina la permeabilidad de morteros, mediante la utilización del permeámetro de gas Ruska. (Figura 6).

La permeabilidad al gas de una muestra de mortero obedece a la ley de Darcy, midiendo en un rotámetro la tasa de flujo de un gas, en este caso el aire, que se hace pasar a través de la muestra bajo un gradiente de presión. Se conoce la viscosidad del gas a la temperatura de trabajo.

El valor de permeabilidad que se determina en el permeámetro de gas es de permeabilidad absoluta. La permeabilidad se calcula a partir del caudal de gas que pasa a través del núcleo, las dimensiones del mismo, el gradiente de presión y la viscosidad del gas.

Los equipos y herramientas utilizados para el ensayo fueron:

- Permeámetro de gas Ruska con accesorios
- Muestras de mortero previamente preparadas (para 40% de colas en arena y 0% de colas en arena).

## Procedimiento experimental para Ensayo de Permeabilidad

- ◆ Se fabricaron 3 probetas cúbicas de 5 cm. de lado y se sometieron a un período de curado de 28 días para un 40% de colas en arena. De cada cubo se cortaron 2 cubos de aproximadamente 2 cm de lado cada uno previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta.
- ◆ De las muestras, se escogió la más adecuada para el receptor de caucho (más precisa), se insertó la copa y se ajustó el permeámetro (Figura 7).
- ◆ Se comienza por probar la posición “large” de la válvula selectora del flowmeter y se fija una presión de 0.25 atm. en el manómetro. Si el flotador (esfera) se encuentra en el rango de lectura entre 20 y 140 divisiones, se toma la lectura justo en el centro del flotador suspendido; de lo contrario se prueba la posición “médium” y se fija una presión de 0.50 atm., verificar si es posible tomar la lectura, de lo contrario se prueba con la siguiente posición “small”, fijando una presión de 1 atm. y tomar la lectura.
- ◆ Durante el procedimiento tomar la temperatura del aire y hallar la viscosidad equivalente.
- ◆ Cerrar la válvula reguladora y retirar la muestra.

**Figura 7. Muestra ajustada al receptor de caucho**

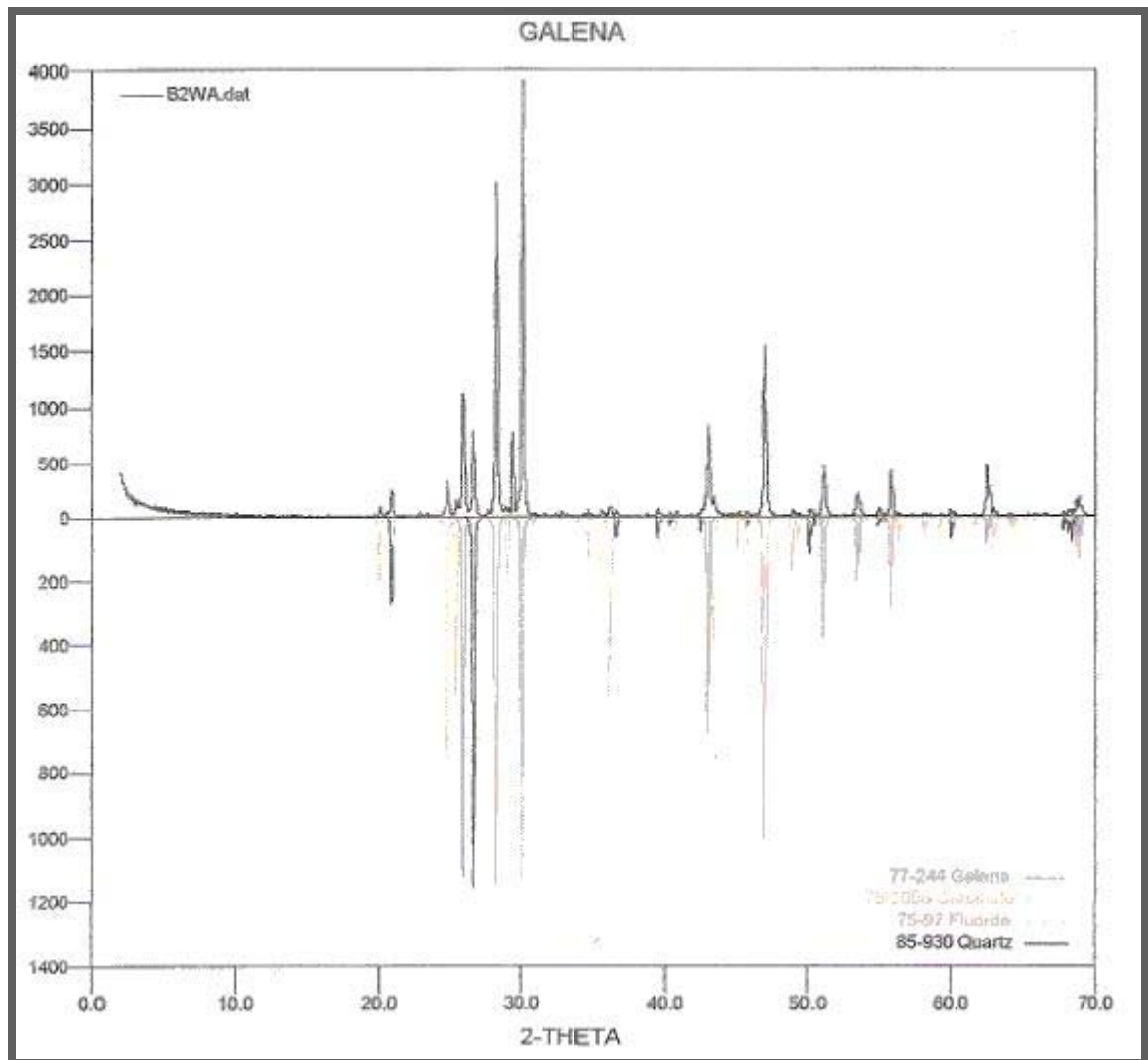


Fuente: Autoras de este proyecto

## ANEXO G.

### Caracterización del mineral de Galena

Figura 1. Análisis cualitativo por rayos X de muestra de Galena utilizada.



Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

**Tabla 1. Espectrometría por fluorescencia para muestra de mineral de Galena de pescadero (Santander)**

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
CaF <sub>2</sub>	54.849 %
SiO <sub>2</sub>	17.678 %
PbO	16.203 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.230 %
SO <sub>3</sub>	3.230 %
BaO	2.974 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.343 %
MnO	0.291 %
K <sub>2</sub> O	0.118 %
MgO	0.104 %
SrO	0.061 %
ZnO	0.057 %
CuO	0.037 %
ZrO <sub>2</sub>	0.025 %
NiO	0.009 %

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

**Tabla 2. Granulometría de la muestra de galena**

<b>Análisis Granulométrico</b>			
<b>Tamiz</b>	<b>%Peso</b>	<b>Retenido</b>	<b>Pasante</b>
10	0,92	0,92	99,08
20	0,76	1,68	98,32
30	9,5	11,18	88,82
50	19,6	30,78	69,22
65	9,9	40,68	59,32
120	19,58	60,26	39,74
200	4,26	64,52	35,48
<b>fondo</b>	32,68	<b>Peso muestra</b>	500 g
<b>total</b>	97,2		

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

## ANEXO H

### Modelo mejorado por el paquete estadístico

**Tabla 1. Resultados estimados para porcentaje de plomo**

Fila	Valor observado	Valor mejorado	Valor mas bajo con un 95% de confianza para la media	Valor mas alto con un 95% de confianza para la media
1	3,888	3,65262	2,81618	4,48907
2	3,626	4,11937	3,28293	4,95582
3	4,312	4,51487	3,67843	5,35132
4	6,759	6,29662	5,46018	7,13307
5	2,138	2,42937	1,59293	3,26582
6	2,519	2,25112	1,41468	3,08757
7	2,938	2,52162	1,68518	3,35807
8	3,264	3,65837	2,82193	4,49482
9	4,107	3,64663	2,81018	4,48307
10	3,911	4,11337	3,27693	4,94982
11	4,016	4,50887	3,67243	5,34532
12	6,524	6,29062	5,45418	7,12707
13	2,019	2,42338	1,58693	3,25982
14	2,673	2,24513	1,40868	3,08157
15	2,795	2,51562	1,67918	3,35207
16	3,351	3,65238	2,81593	4,48882

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto.

## ANEXO I

### Mineral de Galena (PbS)

#### Características:

La estructura cristalina de la galena es del tipo de NaCl. Predominan cristales de hábito cubooctaédrico. Suele formar agregados granulares enteros.

El mineral posee un brillo metálico fuerte, en las caras a veces opaco. Es característico el clivaje perfecto. Frágil, aunque maleable y fácil de fundir. Su dureza es baja: 2.5 densidad considerable de 7.5.

**Figura 1. Mineral de galena utilizado en el proyecto**



Fuente: autoras de esta investigación

#### Origen:

- ◆ **Hidrotermal** (de temperaturas medias y bajas): se encuentra en vetas y cuerpos metasomáticos. Es característica la asociación estrecha de la galena a la esfalerita y los sulfuros de plata y cobre en las menas

polimetálicas. Se encuentra también junto con la pirita, la pirrotita y otros sulfuros, la baritina, el cuarzo y la calcita.

◆ **Sedimentario:** es decir, va formando impregnaciones, principalmente en las rocas carbonatadas bituminosas. La galena es inestable en la zona de oxidación y se descompone fácilmente con formación de la cerusita, la anglesita, la pirorfitita y otros minerales.

**Yacimientos:**

Los yacimientos principales se encuentran en Chile, Bolivia, Perú, México y Estados Unidos.

Para este proyecto se obtuvo el mineral de galena del yacimiento ubicado en la zona de Pescadero (Santander).

**Aplicación:**

La galena es una importantísima mena de plomo, de la cual se extrae a la vez la plata, el bismuto y otros metales.