

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MINERALÓGICA DE MATERIALES  
DE RELAVES MINEROS EN EL CANTÓN ZARUMA, PARA SU UTILIZACIÓN  
EN MEDIDAS DE CIERRE DE GALERÍAS MINERAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO**

**OPCIÓN: ARTÍCULO ACADÉMICO**

**ANDRÉS ISRAEL ZAMBRANO SILVA**

[aizs90@hotmail.com](mailto:aizs90@hotmail.com)

**DIRECTOR: MSc. DIEGO RENATO CÁRDENAS CÁRDENAS**

[diego.cardenas@epn.edu.ec](mailto:diego.cardenas@epn.edu.ec)

**CODIRECTOR: DRA. CAROLINA ISABEL BERNAL CARRERA**

[isabel.bernal@epn.edu.ec](mailto:isabel.bernal@epn.edu.ec)

**Quito, Septiembre 2018**

# DECLARACIÓN

Yo, Andrés Israel Zambrano Silva, declaro bajo juramento que el trabajo 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.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Andrés Israel Zambrano Silva

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Israel Zambrano Silva, bajo mi supervisión.

---

MSc. Diego Renato Cárdenas Cárdenas  
Director del Proyecto

---

Dra. Carolina Isabel Bernal Carrera  
Coodirectora del Proyecto

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Dios por haberme dado la fuerza, sabiduría, constancia y determinación para poder alcanzar el objetivo de mi carrera universitaria.

A mis padres Gerardo y Beatriz que con su ejemplo de humildad, sencillez, perseverancia y valores me han formado como ser humano.

A mi preciosa madre que con su ejemplo de esfuerzo, constancia y amor día a día me dio ejemplo de lucha, sin importar las adversidades de la vida me enseñó el significado de no rendirse a pesar de las circunstancias.

A mi querido padre que con su humildad, sencillez, y amor me enseñó que por más dura que sea la vida siempre se puede ser mejor, y nunca dejar de luchar por las metas que buscamos en la vida.

A mi hermano Javier que con siempre estuvo apoyándome desde que soy pequeño y con el cual nos hemos cuidado y apoyado en todas las circunstancias que nos ha tocado vivir.

A todos los profesores de esta Facultad que me han impartido los conocimientos necesarios para mi formación profesional, en especial al MSc. Diego Cárdenas, al PhD. Pedro Reyes y a la Dra Carolina Bernal por todo su apoyo durante la formación profesional y proceso de titulación .

Finalmente, expreso mi agradecimiento a mis amigos y compañeros Danny E., Elías R., Paúl B., Marcelo C., Luis N., Joselyn R., Ricardo C., Hugo C. Asdrúbal A. JPaul A. Erick C., Cristian P. Andrea P. Valeria N. y demás compañeros de la Facultad, por todo el apoyo y los gratos momentos que hemos compartido a lo largo de nuestra etapa universitaria.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a las personas que han sido mi pilar y mi sustento durante todas las etapas de mi vida, sin ustedes nada de esto no hubiera sido posible, Gerardo, Beatriz, Javier, este logro es por ustedes y para ustedes. Gracias por todo.

***“MI FAMILIA”***

# CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	2
CERTIFICACIÓN .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
DEDICATORIA.....	5
CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
GLOSARIO .....	14
RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	16
<b>CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICATIVO.....	18
1.2 UBICACIÓN Y ACCESOS.....	20
1.3 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS Y CLIMA.....	21
1.4 GEOLOGÍA LOCAL.....	22
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	26
1.6 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	26
<b>CAPÍTULO 2:METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
2.1 MUESTREO DE RELAVE .....	29
2.2 DIFRACCIÓN Y FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	30
2.3 GRANULOMETRIA.....	34
2.4 DOSIFICACIÓN DE MORTEROS.....	36
2.5 ELABORACIÓN DE BRIQUETAS Y CILINDROS.....	39
2.6 ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE.....	46
2.7 LIMITES DE ATTERBERG.....	47
2.8 MÓDULO DE YOUNG Y COEFICIENTE DE POISSON.....	51
2.9 SOFTWARE <i>PHASE2</i> .....	54
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
3.1 FLUOSCENCIA Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	58
3.2 GRANULOMETRIA.....	61
3.3 ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL (Briquetas y Cilindros).....	63

3.4 MODULOS DE YOUNG Y COEFICIENTES DE POISSON.....	85
3.5 LIMITES DE ATTERBERG.....	86
3.6 MODELAMIENTO EN <i>PHASE2</i> .....	89
<b>CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN</b> .....	109
4.1 COMPORTAMIENTO DEL MORTERO DE RELAVE.....	110
4.2 MODELAMIENTO - <i>PHASE2</i> .....	115
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	118
5.1 CONCLUSIONES.....	119
5.2 RECOMENDACIONES.....	120
<b>CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
<b>ANEXOS</b> .....	124
<b>ANEXO 1: TABLA DE CALCULO PARA BRIQUETAS</b> .....	125
<b>ANEXO 2: ENSAYOS MONOAXIALES PARA MODULOS DE YOUNG Y COEFICIENTES DE POISSON</b> .....	135

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b><u>FIGURA 1.</u></b> Ubicación de la Unidad Educativa “La Inmaculada, fe y Alegría” (INIGEM, 2017).....	20
<b><u>FIGURA 2.</u></b> Ubicación del Cantón Zaruma. (INIGEMM, 2017).....	21
<b><u>FIGURA 3.</u></b> Mapa Geológico del Campo Minero de Zaruma-Portovelo, Subdistrito El Oro. Compilado Mapas de Van Thournout et al. 1996 y Aspen et al. 1995 (PRODEMINCA Vol.4, Junio 2000).....	23
<b><u>FIGURA 4.</u></b> Mapa de Estructuras Geológicas del Distrito Minero “Zaruma - Portovelo”. ( <b>Fuente:</b> Dynasty Metals & Mining Inc., 2004.)(INIGEMM, 2017).....	24
<b><u>FIGURA 5.</u></b> Metodología de trabajo.....	28
<b><u>FIGURA 6.</u></b> Moliendas – Planta Jesús del Gran Poder (Portovelo – El Oro).....	29
<b><u>FIGURA 7.</u></b> Tanques de acumulación de relave de Cianuración.....	30
<b><u>FIGURA 8.</u></b> Equipo <b>S8 TIGER</b> para Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X. (DEMEX – 2018).....	31
<b><u>FIGURA 9.</u></b> a) Equipo “ <b>SPECTOPRESS</b> ”; b) Equipo para “ <b>PERLAS FUNDIDAS</b> ”	

(Tomado de: DEMEX, 2018).....	32
<b>FIGURA 10.</b> Equipo <b>D8 ADVACE ECO</b> para Difracción de Rayos X, (Tomado de: DEMEX, 2018).....	34
<b>FIGURA 11.</b> Tamizador Vibratorio <b>“ATM ARROW”</b> . (Tomado de: DEMEX, 2018).....	36
<b>FIGURA 12.</b> Dosificación de morteros. (Tomado de: Ingeniería Civil – EPN, 2018).....	37
<b>FIGURA 13.</b> Equipo de laboratorio para dosificación y elaboración de Briquetas y Cilindros. (Tomado de: Ingeniería Civil – EPN, 2018).....	38
<b>FIGURA 14.</b> a) Balanza digital de precisión <b>“SANTORIUS 3804 MP”</b> ; b) Mezcladora <b>“HOBART”</b> . (Tomado de: LEMSUR – EPN, 2018).....	38
<b>FIGURA 15.</b> Briquetas Ensayo 1, con dosificación (1:1).....	40
<b>FIGURA 16.</b> Briquetas Ensayo 2, con dosificación (2:1) y (1.4:1).....	41
<b>FIGURA 17.</b> Equipo para Compresión Uniaxial <b>“SUZPERCARG”</b> . (Tomado de: LEMSUR, 2018).....	46
<b>FIGURA 18.</b> Límites de Atterberg para Suelos finos.....	47
<b>FIGURA 19.</b> Equipo utilizado para Límites de Atterberg y clasificación SUCS. (Tomado de: LEMSUR, 2018).....	48
<b>FIGURA 20.</b> Módulo de Young. (Tomado de: Apuntes Geofísica – Dr. Mario Ruiz (EPN).....	51
<b>FIGURA 21.</b> Relación entre Deformación Axial y Deformación Trasversal. (Tomado de: Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos de: (Guede D., González P., Caeiro J.R.).....	52
<b>FIGURA 22.</b> a) Sensor <b>Strain Gage</b> y b) <b>Puente de Wheatstone</b> . (Tomado de: LEMSUR, 2018).....	53
<b>FIGURA 23.</b> Modelo en 2D de la zona de estudio en el Cantón Zaruma.....	54
<b>FIGURA 24.</b> Análisis de Difracción de rayos X en relave de cianuración. (Tomado de: DEMEX, 2018).....	58
<b>FIGURA 25.</b> Análisis de Difracción de rayos X en relave de cianuración. (Tomado de: DEMEX, 2018).....	60
<b>FIGURA 26.</b> Curva Granulométrica (DEMEX, 2018) de Relave.....	62

<b><u>FIGURA 27.</u></b> Curva Granulométrica (LEMSUR, 2018) de Relave.....	63
<b><u>FIGURA 28.</u></b> Grafico <b>A</b> valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) vs Tiempo (Días)) y Grafico <b>B</b> valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) para briquetas de dosificación (1:1) a 7 días de curación. ....	65
<b><u>FIGURA 29.</u></b> Gráfico <b>A</b> valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) vs Tiempo (Días)) y Gráfico <b>B</b> valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) para briquetas de Dosificación (1.4:1) y (2:1),a 7 días de curación.....	67
<b><u>FIGURA 30.</u></b> Gráfico <b>A</b> valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) vs Tiempo (Días)) y Gráfico <b>B</b> valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días))- Dosificación (1:1), a 14 días de curación.....	69
<b><u>FIGURA 31.</u></b> Grafico <b>A</b> valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) vs Tiempo (Días)) y Grafico <b>B</b> valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1.4:1) a 14 días de curación.....	70
<b><u>FIGURA 32.</u></b> Grafico <b>A</b> valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) vs Tiempo (Días)) y Grafico <b>B</b> valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1:1), a 28 días de curación.....	72
<b><u>FIGURA 33.</u></b> Gráfico <b>A</b> valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) vs Tiempo (Días)) y Gráfico <b>B</b> valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1.4:1), a 28 días de curación.....	74
<b><u>FIGURA 34.</u></b> Valores de ( $F'c$ ) promedio - Dosificación (1:1). – Relación (A/C): 40%.....	76
<b><u>FIGURA 35.</u></b> Valores de (Carga (Q) promedio vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 40%.....	77
<b><u>FIGURA 36.</u></b> Valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio vs Tiempo (Días)) -Dosificación (1:1), Relación (A/C): 50%.....	78
<b><u>FIGURA 37.</u></b> Valores de (Carga (Q) promedio vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1:1), Relación (A/C): 50%.....	79
<b><u>FIGURA 38.</u></b> Valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio vs Tiempo (Días)) Dosificación (1.4:1), Relación (A/C): 40%.....	80
<b><u>FIGURA 39.</u></b> Valores de Carga (Q) promedio. Dosificación (1.4:1) – Relación (A/C): 40%.....	81

<b><u>FIGURA 40.</u></b> Valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio vs Tiempo (Días)) Dosificación (1.4:1), Relación (A/C): 50%.....	82
<b><u>FIGURA 41.</u></b> Valores de (Carga (Q) promedio vs Tiempo (Días)) -Dosificación (1.4:1), Relación (A/C): 50%.-.....	83
<b><u>FIGURA 42.</u></b> Clasificación SUCS del Relave.....	88
<b><u>FIGURA 43.</u></b> Modelo 2D de la zona de estudio con presencia de diaclasas...89	
<b><u>FIGURA 44.</u></b> Modelo de la zona de estudio en condiciones actuales de capas y galerías.....	91
<b><u>FIGURA 45.</u></b> Modelamiento analizando el Esfuerzo Principal con Galerías Vacías (Estado Actual).....	95
<b><u>FIGURA 46.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con Galerías Vacías (Estado Actual).....	96
<b><u>FIGURA 47.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con Galerías Vacías (Estado Actual).....	96
<b><u>FIGURA 48.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con Galerías Vacías (Estado Actual).....	97
<b><u>FIGURA 49.</u></b> Modelamiento analizando el Esfuerzo principal con relleno de mortero (Y1) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.....	98
<b><u>FIGURA 50.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de Mortero (Y1) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.....	98
<b><u>FIGURA 51.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y1) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.....	99
<b><u>FIGURA 52.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero Y1 – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.....	99
<b><u>FIGURA 53.</u></b> Modelamiento analizando el Esfuerzo principal con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.....	101
<b><u>FIGURA 54.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.....	101
<b><u>FIGURA 55.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.....	102
<b><u>FIGURA 56.</u></b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de	

mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.....	102
<b>FIGURA 57.</b> Modelamiento analizando el Esfuerzo principal con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.....	103
<b>FIGURA 58.</b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.....	104
<b>FIGURA 59.</b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.....	104
<b>FIGURA 60.</b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.....	105
<b>FIGURA 61.</b> Modelamiento analizando el Esfuerzo Principal con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.....	106
<b>FIGURA 62.</b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.....	106
<b>FIGURA 63.</b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.....	107
<b>FIGURA 64.</b> Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.....	107
<b>FIGURA 65.</b> Gráficos de modelamiento de desplazamiento total en vacío y con las cuatro Dosificaciones de morteros (Y1, Y2, Y3, Y4).....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.5.1</b> Tabla de dosificación en proporción (1:1), con variación del contenido de agua en la relación (Agua/Cemento).....	39
<b>TABLA 2.5.2</b> Dosificación de Cemento – Relave con (50 y 40) % de agua...41	41
<b>TABLA 2.5.3</b> Briquetas para ensayos a 14 días de curación.....43	43
<b>TABLA 2.5.4</b> Briquetas de mayor resistencia a la compresión uniaxial.....44	44
<b>TABLA 2.5.5</b> Tabla de Dosificaciones para cilindros.....44	44
<b>TABLA 2.5.6.</b> Dosificación de morteros para 28 días en curación.....45	45
<b>TABLA 2.7.1</b> Ensayo de contenido de Humedad.....48	48

<b>TABLA 2.7.2</b>	Ensayo para Límite Plástico.....	49
<b>TABLA 2.7.3</b>	Ensayo para Límite Líquido.....	49
<b>TABLA 2.7.4</b>	Ensayo Granulométrico.....	50
<b>TABLA 3.2.1</b>	Ensayo Granulométrico (DEMEX, 2018).....	61
<b>TABLA 3.2.2</b>	Ensayo Granulométrico (LEMSUR, 2018) .....	62
<b>TABLA 3.3.1</b>	Ensayos de compresión uniaxial a los 7 días de curación dosificación (1:1) con diferentes relaciones de (A/C).....	64
<b>TABLA 3.3.2</b>	Ensayos de compresión simple - Dosificación (1.4:1) y (2:1), a 7 días de curación.....	66
<b>TABLA 3.3.3</b>	Ensayos de compresión simple - Dosificación (1:1) a 14 días de curación.....	68
<b>TABLA 3.3.4</b>	Ensayos de compresión simple - Dosificación (1:1), a 28 días de curación.....	70
<b>TABLA 3.3.5</b>	Ensayos de compresión simple - Dosificación (1.4:1), a 28 días de curación.....	71
<b>TABLA 3.3.6</b>	Esfuerzo (F'c) promedio Dosificación (1:1)– Relación (A/C):40%	73
<b>TABLA 3.3.7</b>	Carga (Q) promedio de Dosificación (1:1)– Relación (A/C): 40%	75
<b>TABLA 3.3.8</b>	Esfuerzo (F'c) promedio Dosificación (1:1)– Relación (A/C):50%	77
<b>TABLA 3.3.9</b>	Carga (Q) promedio. Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 50%....	78
<b>TABLA 3.3.10</b>	Esfuerzo (F'c) promedio Dosificación (1.4:1) – (A/C): 40%.....	79
<b>TABLA 3.3.11</b>	Carga (Q) promedio Dosificación (1.4:1)– Relación (A/C):40%..	80
<b>TABLA 3.3.12</b>	Esfuerzo (F'c) promedio Dosificación (1.4:1)– (A/C):50%.....	81
<b>TABLA 3.3.13</b>	Carga (Q) promedio Dosificación (1.4:1)– Relación (A/C):50%..	82
<b>TABLA 3.3.14</b>	Ensayos de Compresión Uniaxial, Dosificación (1:1) y (1.4:1) al (40 y 50) % de relación (A/C). <b>Tomado de:</b> (LEMSUR, 2018).....	83
<b>TABLA 3.3.15</b>	Ensayos de Compresión Uniaxial, Dosificación (1:1) y (1.4:1) al (40 y 50) % de relación (A/C). <b>Tomado de:</b> (LEMSUR, 2018).....	84

<b>TABLA 3.4.1</b> Módulos de Young y Coeficientes de Poisson del Mortero de Relave. Tomado de: (LEMSUR, 2018).....	85
<b>TABLA 3.5.1</b> Límites de Atterberg y Clasificación SUCS. Tomado de: (LEMSUR, 2018).....	87
<b>TABLA 3.6.1</b> Datos Unidades geológicas de la Zona de Estudio. Tomado de: (INIGEMM, 2017).....	90
<b>TABLA 3.6.2</b> Parámetros de capas de roca – RocData.....	93
<b>TABLA 3.6.3</b> Valores de Tracción de morteros de relave.....	94
<b>TABLA 3.6.4</b> Datos de Cohesión y Ángulo de fricción Tomado de: (INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS EN SUELOS - IGNACIO MORILLA ABAD).....	94
<b>TABLA 3.6.5</b> Datos para modelamiento en software “ <i>PHASE 2</i> ”.....	94
<b>TABLA 4.1.1</b> Carga y Resistencia – Dosificación (1:1) al 50% de (A/C).....	111
<b>TABLA 4.1.2</b> Carga y Resistencia – Dosificación (1:1) al 40% de (A/C).....	111
<b>TABLA 4.1.3</b> Carga y Resistencia – Dosificación (1.4:1) al 50% de (A/C).....	112
<b>TABLA 4.1.4</b> Carga y Resistencia – Dosificación (1.4:1) al 40% de (A/C).....	113

## GLOSARIO

**Esfuerzo (F'c)=** Fuerza que actúa sobre un área unitaria sobre la cual se aplica.  
(kg/cm<sup>2</sup>, kN/m<sup>2</sup>)

**Carga (Q)=** Cantidad de masa que genera presión o peso sobre un cuerpo o superficie determinado. (Ton, kg, quintales, libras, etc.)

**Mortero=** Mezcla plástica aglomerante, que resultan de la combinación de agregado fino, agua con un cementante (cemento).

**Relave=** Arena de grano fino residual de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de la extracción de los minerales sulfurados.

**Cianuración=** Técnica metalúrgica para la extracción de oro de mineral baja calidad.

**Lixiviado=** Solución resultante de la percolación de agua meteórica a través del suelo o de desechos sólidos que contiene sustancias solubles (metales, sulfuros, entre otros).

**Socavón=** Hundimiento en superficie, producido por colapsos en subsuperficie sean por acción antrópica (túneles) o de forma natural (Cavernas).

**Galería=** Cavidades subterráneas que se hacen de forma natural o artificial cuya inclinación es horizontal o casi horizontal.

**Molienda=** Proceso mediante el cual se reduce el tamaño del material mineralizado a menos de 0,2 milímetros.

**UG=** Unidad Geológica, terminología usada para diferenciar las capas de roca presentes en la zona de estudio.

**(A/C)=** Proporción de Agua, respecto a la cantidad de material cementante en la dosificación. (Gramos).

**Ángulo de Fricción (ø)=** Ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr. El ángulo de fricción interna de un suelo corresponde al ángulo cuya tangente es el coeficiente promedio de fricción entre las partículas de un suelo.

**Cohesión (c)=** Resistencia al corte del terreno cuando la presión normal efectiva es nula.

**Peso Específico (γ)=** Relación entre el peso de una sustancia y su volumen.

**Tracción (T)=** Formadas en la masa del suelo por efectos de esfuerzos de tracción, son rasgos premonitorios a movimientos de masa, particularmente en el caso de los deslizamientos rotacionales.

# **CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MINERALÓGICA DE MATERIALES DE RELAVES MINEROS EN EL CANTÓN ZARUMA, PARA SU UTILIZACIÓN EN MEDIDAS DE CIERRE DE GALERÍAS MINERAS**

## **RESUMEN**

La actividad minera en Distrito Minero “Zaruma - Portovelo”, ha sido históricamente la base de su economía. Los trabajos de explotación se remontan a la época colonial aproximadamente al año de 1550 hasta la actualidad. Sin embargo la falta de planificación, los trabajos no tecnificados (explotación artesanal), la explotación indiscriminada y la búsqueda de un crecimiento económico por parte de la población han generado graves problemas los cuales afectaron directamente a la ciudad de Zaruma (Socavón en la Unidad Educativa “La Inmaculada, Fe y Alegría”). El cantón Zaruma fue declarado como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en el año de 1998, razón por la cual es de gran valor cultural e histórico para nuestro país y haciendo que su preservación sea prioritaria.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de los materiales de relaves que se generan por la explotación minera en el sector, para utilizarlos como materia prima de “morteros” y realizar obras para estabilización y cierre de galerías mineras de este cantón. Con este estudio se busca proponer soluciones para la problemática de subsidencias que afecta actualmente al Cantón Zaruma.

**Palabras Clave:** Explotación, Mortero, Relave, Geomecánica, Cianuración, Socavón.

## **ABSTRACT**

The Mining District "Zaruma - Portovelo" has a high mining activity that has historically been the basis of its economy. The works of exploitation go back to the colonial period approximately to the year of 1550 until the colonial time. However, lack of planning, non-technified work (artisanal exploitation), indiscriminate exploitation and the search of economic growth by the population have generated serious problems. These which directly affected the city of Zaruma (Subsidence in the Educational Unit "The Immaculate, Fe y Alegría"). The Zaruma town was declared a World Patrimony Site by UNESCO in 1998, which is why it is of great cultural and historical value for our country and making its preservation a priority.

The objective of this work is to perform an analysis of tailings materials generated by mining exploitation in that zone, to use them as raw material for "mortars" to carry out works to stabilize and close mining galleries in this town. The aim of this study is to propose solutions for the subsidence problems that currently affects Zaruma town.

**Key words:** Exploitation, Mortars, Tail, Geomechanics, Subsidence, Cyanuration.

**Capítulo 1**  
**MARCO TEÓRICO**

## 1.1 Antecedentes y Justificativo

El Distrito minero “Zaruma - Portovelo” ha sido históricamente una de las zonas más productivas en el Ecuador desde que inició su explotación en la época colonial en 1549, explotando hasta la actualidad más de 120 toneladas de Oro y 250 toneladas de Plata. Durante 1551 hasta 1871 hubo una considerable actividad prospectiva, muchas vetas fueron descubiertas y explotadas, posteriormente en 1878 se fundó la empresa *Zaruma Gold Mining Company* con capital británico aproximado de 250000 libras Esterlinas esta empresa realizó exploración subterránea y trabajo durante los años de (1880 - 1896). (PRODEMINCA, Vol. 4, Junio 2000)

El periodo más importante de explotación en este distrito minero se dio a inicios de siglo XIX cuando se forma la compañía SADCo (*South American Development Company*), realizó operaciones desde 1896 hasta 1950. Durante (1904 a 1936) la empresa realizó recuperación de oro únicamente por Cianuración, posteriormente empezó la recuperación de sulfuros y concentrados de plata mediante una planta de flotación / Cianuración. Durante los 54 años de trabajo de SADCo se extrajo aproximadamente 3.6Moz de oro con una ley de corte de aproximadamente 14.4 g/t. En 1950 se formó la compañía CAMINE la cual fue reconstituida en la empresa CIMA (*Compañía Industrial Minera Asociada S.A.*), la cual trabajó hasta 1965 con una producción de 1.5 Mt de mineral, (11.7 t) de oro con una ley de corte media de (7.5 g/t), además de (62 g/t) de plata y concentraciones aproximadas de 1% de (Cu y Zn), sin embargo la falta de inversión, la ineficacia de los medios de exploración y la poca producción llevó a la empresa a la quiebra en 1978. (PRODEMINCA, Vol. 4, Junio 2000 e INIGEMM, 2017).

En 1979 hasta 1994 el gobierno Ecuatoriano tomó a cargo la exploración y explotación del “Distrito Minero Aurífero – Polimetálico Portovelo – Zaruma”, por medio de la Dirección General de Geología y Minas (DGGM), posteriormente INEMIN, en el proyecto denominado “Proyecto Portovelo”. Inicialmente este proyecto produjo aproximadamente 100 ton/d, con una ley de corte media de 5g/t,

los mismos valores que paulatinamente fueron decreciendo hasta 30 ton/d. (PRODEMINCA, Vol. 4, Junio 2000 e INIGEMM, 2017).

A partir de 1995 varias empresas internacionales quisieron retomar los trabajos de exploración y explotación, empresas como Corporación TVX, hasta 1998, posteriormente la empresa IAMGOLD adquirió la información de TVX. Toda la información así como las concesiones y propiedades adquiridas por IAMGOLD fueron adquiridas por DYNASTY METALS AND MINING INC, empresa canadiense representada en Ecuador por ELIPE S.A., la cual continúa hasta la actualidad en trabajos de exploración y explotación en el “Distrito minero Portovelo - Zaruma”. Actualmente los trabajos de explotación minera preponderantes se han llevado a cabo de manera artesanal y a pequeña escala, por la empresa BIRA S.A en Zaruma y MINANCA en Portovelo, sin embargo esta explotación artesanal ha generado múltiples problemas en la ciudad de Zaruma. Dichos trabajos ilegales han sido ejecutados de manera irresponsable; generando impactos contra el medio ambiente, además de que atenta contra los pobladores del cantón. (INIGEMM, 2017).

Entre Diciembre de 2016 y Septiembre de 2017 se produjo tres colapsos en la Unidad Educativa “La Inmaculada, fe y alegría”, causando el colapso de dicha unidad educativa y daños a propiedades aledañas, el Cono y Chimenea de colapso fueron estabilizados mediante la intervención del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM). (INIGEMM, 2017).

Según datos de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM), existen galerías mineras por debajo del Distrito Portovelo – Zaruma las cuales se extienden aproximadamente 67km que recorren el área de afectación. (ARCOM, 2017).

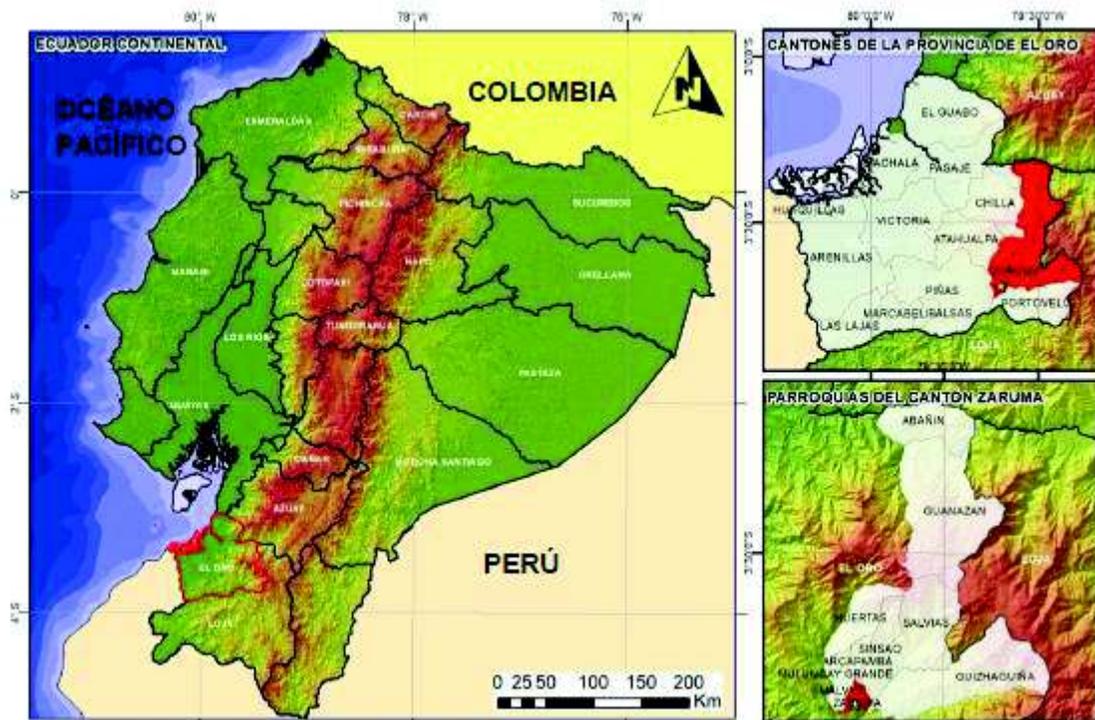
INIGEMM (2016 - 2017), realizó inspecciones en la zona de afectación y mediante estudios multidisciplinarios se corroboró la existencia de galerías ubicadas entre 50 - 80 metros de profundidad. (INIGEMM, 2017).



**FIGURA1.** Ubicación de la Unidad Educativa “La Inmaculada, fe y Alegría” (INIGEM, 2017).

## 1.2 Ubicación y Acceso

El cantón Zaruma se encuentra localizado en la provincia de El Oro al suroeste de Ecuador, se encuentra a una altura de 1200 msnm. Con latitud:  $3^{\circ}41'28''$  S y Longitud:  $79^{\circ}36'42''$  O. El cantón Zaruma limita al Norte con la provincia de Azuay, al Sur con el cantón Portovelo y Piñas, al Este con los cantones Chilla, Pasaje y Atahualpa y al Oeste con la provincia de Loja. (INIGEM, 2017).



**FIGURA 2.** Ubicación del Cantón Zaruma. (INIGEMM, 2017).

Los accesos al cantón Zaruma son por vía terrestre tomando la autopista E35, o por vía aérea utilizando los aeropuertos de Santa Rosa o el aeropuerto de Catamayo, en la provincia de Loja. (INIGEMM, 2017).

### 1.3 Aspectos Demográficos y Clima

El cantón Zaruma presenta dos temporadas marcadas. Invierno de enero a abril y verano desde mayo a diciembre. Zaruma presenta altitudes desde los 600 msnm en las zonas más altas hasta 3771 msnm. Su clima corresponde al de bosque húmedo pre-primario, con una variación de temperatura entre 10 a 24°C. Según INHAMI Y ORSTOM el cantón Zaruma tiene tres tipos climáticos, el Ecuatorial Mesotérmico Semi-Humedo, Ecuatorial Mesotérmico seco y Ecuatorial de alta Montaña. (INIGEMM, 2017).

Zaruma tiene una población de 24.097 habitantes (INEC, 2010), de los cuales 14.420 habitantes (59.8%) viven en el área rural, y 9.677 habitantes (41.2%) viven en el área urbana. (INIGEMM, 2017).

## 1.4 Geología Local

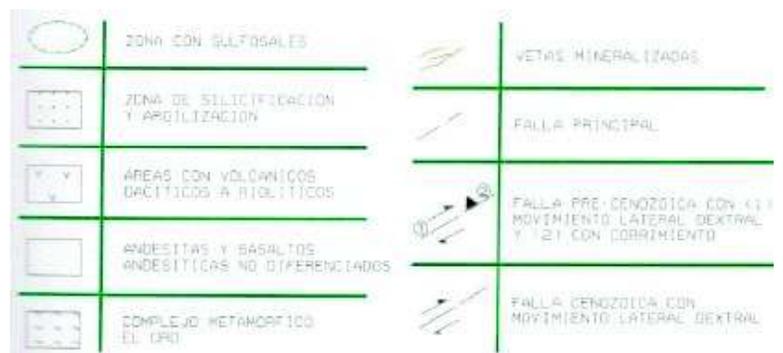
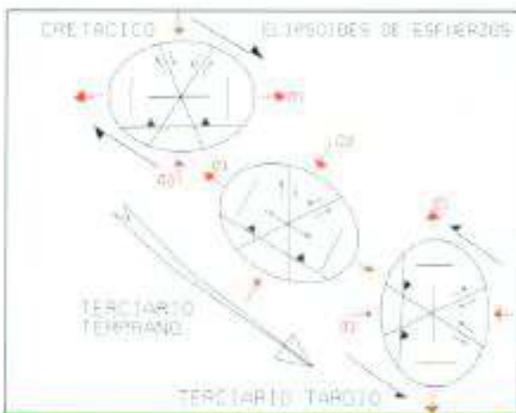
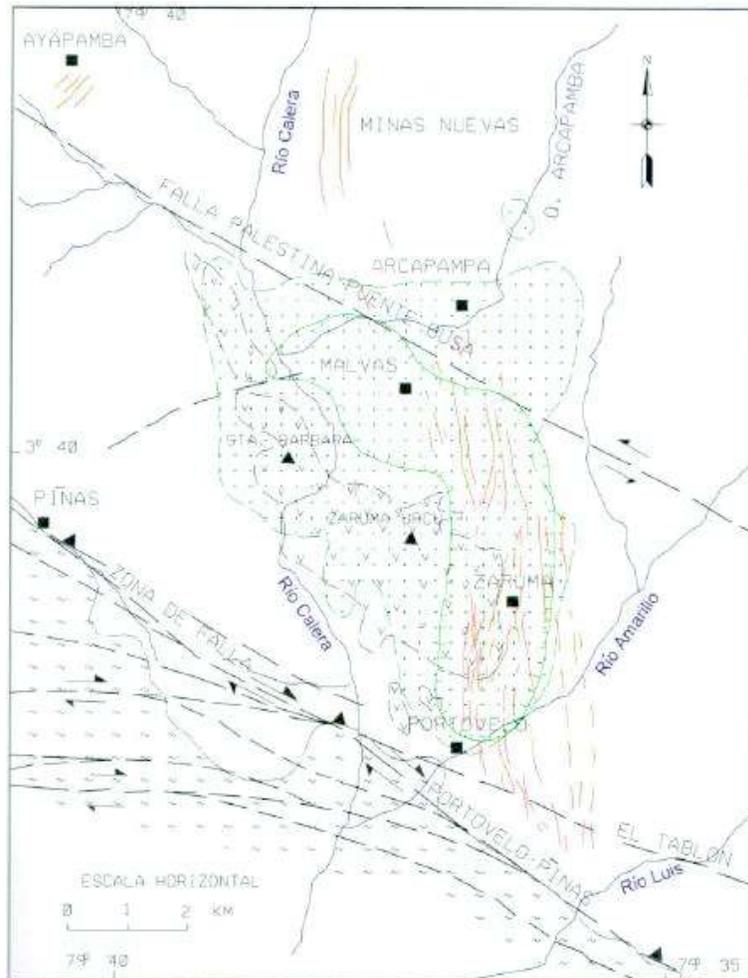
**Morfológicamente** el cantón Zaruma se ubica en los andes meridionales de Ecuador, se caracteriza por la presencia de relieves muy irregulares con pendientes muy inclinadas con variaciones altimétricas entre 800 y 2500 msnm. En esta sección de la cordillera de los Andes tanto la Cordillera Real o central como la Cordillera Occidental desaparecen progresivamente, solo la Cordillera Real se prolonga hasta el límite con Perú. Uno de los rasgos morfológicos más notable es el desarreglo de los relieves en esta sección de los andes Ecuatorianos aquí se caracteriza por una disminución general de altura hacia el SSO. (INIGEMM, 2017).

**Hidrográficamente** el cantón Zaruma se encuentra en la cuenca alta del río Puyango, con una dirección preferencial E – O, la red Hidrográfica principal está conformada por los ríos Amarillo, Calera, Pindo y Moromoro. (INIGEMM, 2017).

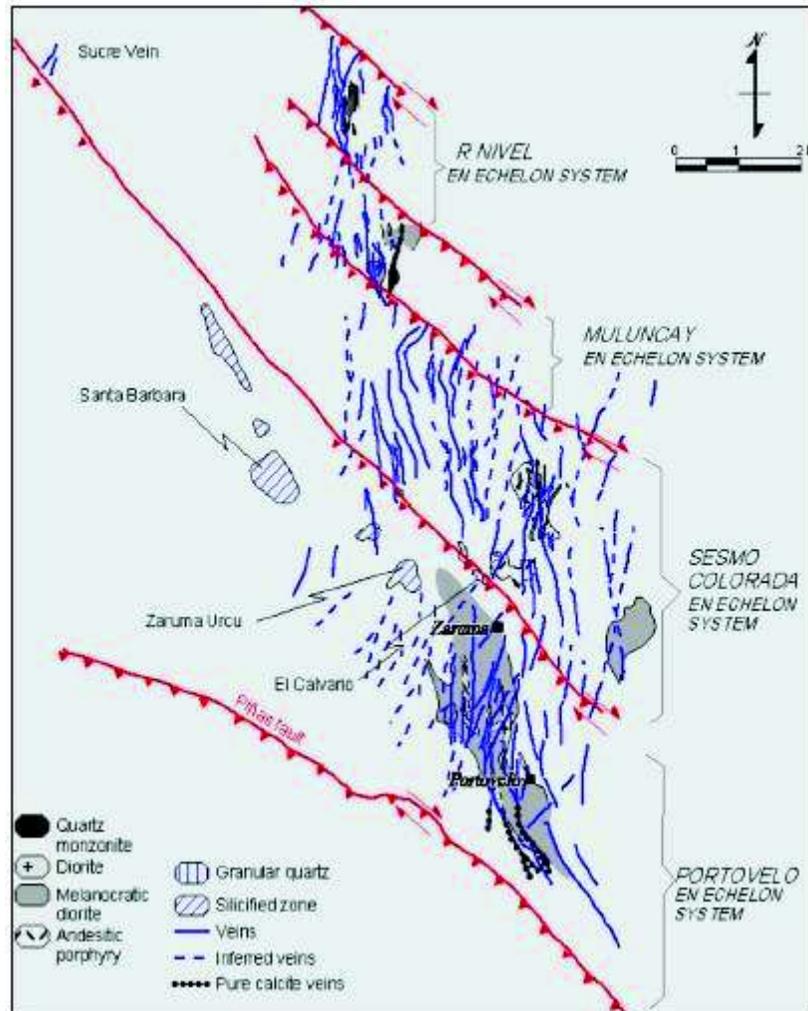
**Estructuralmente**, dentro de la zona de estudio existen zonas de falla muy importantes las cuales controlan el marco geodinámico local. El principal rasgo estructural es el Sistema de Fallas Piñas – Portovelo (P-P), interpretado como falla/ cabalgamiento con dirección (E-O) y edad Mioceno. Este sistema de fallas separa al Complejo Metamórfico del Oro del Grupo Saraguro, además de constituir el límite sur del sistema de vetas auríferas hacia el sur. La Falla Puente Busa – Palestina (P-B-P) se ubica a 10 km al Norte del cantón, es paralela a la Falla (P-P), de la misma edad, orientación, y sentido de movimiento. (PRODEMİNCA Vol.4, Junio 2000).

La ortogonalización (E-O) no ocurrió hasta principios del Mioceno, después de la depositación de la Unidad Portovelo (Grupo Saraguro). Es probable que las vetas mineralizadas con orientación (N-S) se iniciaran durante o inmediatamente antes

del cambio en el régimen de subducción bajo un régimen de esfuerzos compresivos.



**FIGURA 3.** Mapa Geológico del Campo Minero de Zaruma-Portovelo, Subdistrito El Oro. Compilado Mapas de Van Thournout et al. 1996 y Aspen et al. 1995 (PRODEMINCA Vol.4, Junio 2000).



**Figura 4.** Mapa de Estructuras Geológicas del Distrito Minero “Zaruma - Portovelo”. (Fuente: Dynasty Metals & Mining Inc., 2004.)(INIGEMM, 2017)

**Litológicamente** el Distrito Minero “Zaruma – Portovelo”, presenta una mineralización en las andesitas con presencia de silicificación y cierto grado de alteración perteneciente a la Unidad Portovelo que a su vez se encuentra fallada con rocas metamórficas a lo largo del sistema de fallas (P-P), y se superpone disconformemente sobre el Complejo Metamórfico del El Oro. La Unidad Portovelo

presenta en su litología Basaltos andesíticos, lavas andesíticas de afinidad calco - alcalina, brechas, tobas con intercalaciones menores sedimentarias (pizarras, cherts), presenta alteración de tipo propilítica de bajo grado con presencia de (epidota, clorita, y calcita). (Aspen et al. Bonilla, Duque 1995), presentan edades de 21.5 a 28.4 Ma (Oligoceno superior - Mioceno muy temprano), por lo tanto se define a la Unidad Portovelo como perteneciente al Grupo Saraguro. (PRODEMINCA Vol. 4, Junio 2000).

Dentro de la Zona de estudio en la parte más alta se pudo definir adicionalmente a la Unidad Arcillas, compuesta de arcillas de color café amarillento de alta plasticidad provenientes de alteración de rocas alumínicas con pirita y hematita, además de interestratificaciones de minerales secundarios como illita, caolinita, esmectita. Se localiza en la parte más superficial del cantón Zaruma con una potencia de estrato variable de 1 – 15 metros. (INIGEMM, 2017).

En el Distrito Minero “Zaruma - Portovelo” el tipo de yacimiento presente ha sido definido como Vetiforme Epi-Mesotermal, sin embargo en términos de mineralización económica se representa dos tipos principales de vetas en el campo Zaruma – Portovelo:

- Vetas Polimetálicas Mesotermales Aurífera con cuarzo claro, asociado con calcita ± clorita ± fluorita, y una amplia gama de sulfuros incluyendo (pirita ± esfalerita (rica en Hierro) ± galena ± enargita ± molibdenita). El oro es de carácter refractario en este sistema de vetas. (PRODEMINCA, Vol. 4, Junio 2000)
- Las vetas epitermales de cuarzo – calcita ± adularia caracterizadas por ser pobres en sulfuros y ricas en metales preciosos. Se caracteriza por oro / electrum libre y sulfosales de plata (tetraedrita ± tennantita ± proustita ± bournonita), además de escasos sulfuros (pirita ± calcopirita ± marcasita ± galena ± esfalerita). (PRODEMINCA, Vol. 4, Junio 2000).

## **1.5 Objetivo General**

Evaluar la calidad geomecánica de morteros elaborados con material de relave de cianuración, en función de su resistencia a la compresión simple para su utilización en obras de cierre de galerías mineras en el cantón Zaruma.

## **1.6 Objetivos Específicos**

- Diseñar distintos tipos de mezcla (agua, cemento, relave), para la elaboración de briquetas.
- Realizar ensayos de resistencia a la compresión simple sobre las briquetas y cilindros para evaluar sus propiedades resistivas.
- Análisis y caracterización mineralógica del material de relave.
- Análisis del comportamiento tenso-deformacional de los morteros.
- Análisis y clasificación granulométrica del material de Relave
- Obtención de Módulos de Young, Coeficientes de Poisson, y Límites de Atterberg.
- Modelamiento en software Phase 2
- Recomendaciones de la disponibilidad y funcionalidad de posibles obras de cierre de galerías.

# **CAPÍTULO II**

## **METODOLOGIA**

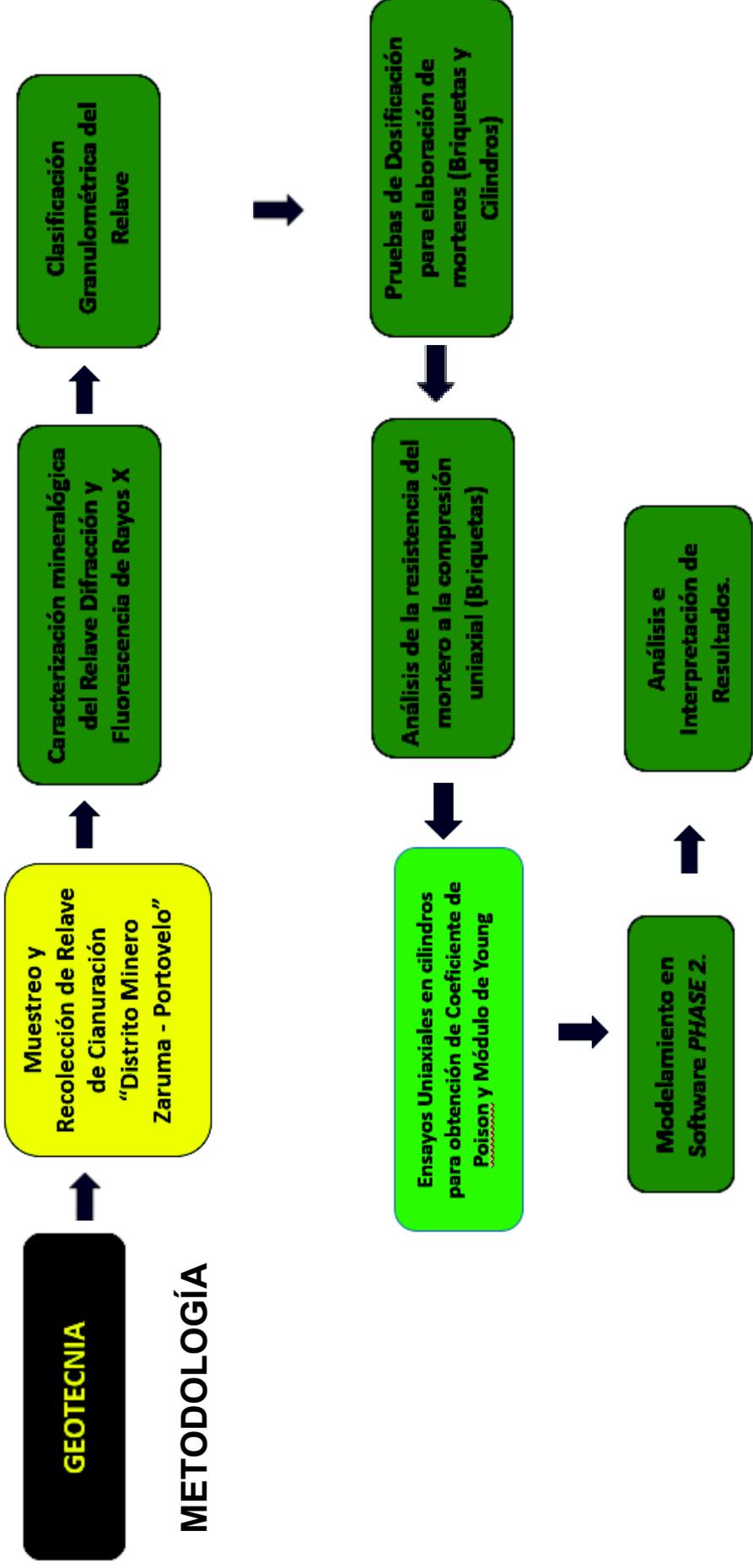


FIGURA 5. Metodología de Trabajo.

## 2.1 Muestreo de Relaves de Cianuración

La materia prima a utilizarse en la presente investigación fue obtenida en la planta de beneficio “Jesús del Gran Poder”, la misma que se ubica en la ciudad de Portovelo Provincia de El Oro. El material tratado en esta planta es *“in situ”*, extraído de la Mina “San Antonio”, el material extraído son andesitas silicificadas y con presencia de sulfuros diseminados (Pirita), además de la presencia de carbonatos.



**FIGURA 6.** Moliendas – Planta Jesús del Gran Poder (Portovelo – El Oro).

En la planta de beneficio para la extracción del mineral de interés (Oro y Plata) se utiliza únicamente el método de extracción por Cianuración, el mismo que es una técnica metalúrgica que busca convertir al Oro (insoluble en agua) en aurocianida soluble en agua mediante el proceso de lixiviación. La planta “Jesús del Gran Poder”, trabaja actualmente con 50 toneladas de material por día, el mismo que es

procesado en las moliendas que trituran el material hasta aproximadamente 20 micras  $\mu\text{m}$ .



**FIGURA 7.** Tanques de acumulación de relave de Cianuración.

## **2.2 Fluorescencia y Difracción de Rayos X**

**Fluorescencia de Rayos X.-** Es una técnica analítica utilizada para el estudio de sustancias o materia inorgánica, es conocida también como *espectrografía de emisión por rayos X*. En esta técnica se analiza una muestra del material de interés la cual debe estar triturada a tamaño de polvo fino y este es encapsulado en una píldora esférica o disco con ayuda de aglutinante. La muestra posteriormente es irradiada durante un corto periodo de tiempo por rayos X generados en un tubo de rayos X de alta intensidad. La energía de rayos X que absorbe la muestra genera un *espectro de emisión de rayos X*, el mismo que es característico de cada elemento de la muestra. El análisis cualitativo por fluorescencia de rayos X solo identifica las líneas espectrales observadas en los

elementos responsables de su generación, este método puede utilizarse para la determinación de elementos en abundancia, como también para la determinación de elementos traza. Esta técnica es ampliamente utilizada para sectores industriales como minería, industria de vidrio, manufactura de metales y aleaciones, cerámica, control de polución y protección medioambiental. (Manual de Mineralogía, Vol.1 Cornelis Klein \ Cornelius S. Hurlbut, Jr.)

Para el análisis de la muestra de relave de cianuración el equipo a utilizarse es el “*S8 TIGER – BRUKER*” (Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X de dispersión por longitud de onda de gama alta), es utilizado para aplicaciones industriales incluidos refinería, fabricación de cemento, minería, entre otras. Presenta un sistema óptico de Rayos X, un nuevo tubo de rayos X de alta intensidad el cual excita la muestra de manera más eficaz mejorando los límites de detección, precisión, y resolución de elementos, analizando todos los elementos desde el Berilo hasta el Uranio. (Bruker Official WebSite).



**FIGURA 8.** Equipo **S8 TIGER** para Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X. (DEMEX,2018).

Se realiza de dos formas el análisis de Fluorescencia de Rayos X:

1. El material es triturado ha tamaño de polvo, posteriormente el mismo es compactado en el equipo **“SPECTRO – PRESS”** y prensado en “pastilla” con aglomerante, este es un análisis semicuantitativo rápido. (Figura 9)
2. Para un análisis cuantitativo se utiliza “perlas fundidas”, es decir, el material triturado es fundido en un crisol de platino a 1100 °C y es colado en moldes previo a su ingreso al equipo de fluorescencia.

a)



b)



**FIGURA 9.** a) Equipo **“SPECTOPRESS”**; b) Equipo para **“PERLAS FUNDIDAS”**

Tomado de: DEMEX, 2018

Los resultados obtenidos son para análisis químico elemental elemento por elemento, siempre y cuando exista en la muestra una concentración mayor al 0.01%, el tiempo de análisis dura aproximadamente veinte minutos y se utiliza un gramaje de aproximadamente 10 gramos.

**Difracción de Rayos X.**- Es un fenómeno físico el cual se produce cuando un haz de rayos X con una longitud de onda determinada interacciona con una sustancia o materia cristalina. Se basa en la dispersión del haz de rayos X en parte de la muestra (manteniendo la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas las cuales se dispersan en determinadas direcciones en el espacio. Para el análisis de difracción de rayos X es importante que la muestra sea triturada a tamaño de polvo fino, este método registra las reflexiones generadas por el haz monocromático de rayos X.

El fenómeno de difracción de rayos puede ser descrito mediante la Ley de Bragg (Ruiz M, 2014).

$$n*\lambda = 2d*sen\theta$$

**Ecuación 1**

$\lambda$ : longitud de onda de rayos X  
 $n$ : número entero  
 $d$ : distancia entre planos de la red cristalina  
 $\theta$ : ángulo entre rayos incidentes y los planos de dispersión.

Esta ley permite estudiar las direcciones en que la difracción de rayos X sobre una superficie cristalina determinada produce interferencias constructivas.

La difracción de rayos X en muestras policristalinas nos permite identificar las fases cristalinas presentes (cada sólido cristalino posee un difractograma característico), identificación de sustancias cristalinas desconocidas, especificación de arcillas control de calidad de materias primas y productos finas, entre otras. (Cornelis Klein & Cornelius S. Hurlbut, Jr. 2006 – Manual de Mineralogía, Vol 1.)

Para el análisis de la muestra de relave de cianuración se utilizara el equipo “D8 ADVACE ECO”, el cual presenta una fuente de rayos X de alto- brillo de 1kW, lo cual proporciona una duración más larga y eficiente, reduciendo el consumo de energía eliminando la necesidad de agua para el enfriamiento externo.

Utiliza un detector unidimensional para mediciones de difracción de rayos X ultra rápidas (125 veces), y de alta calidad



**FIGURA 10.** Equipo **D8 ADVANCE ECO** para Difracción de Rayos X

Tomado de: DEMEX, 2018

## 2.3 Granulometría

Análisis granulométrico se define como la medición de los granos de una fracción de suelo o muestra sedimentaria, el análisis mecánico determina el rango de tamaños de las partículas presentes expresado en porcentaje del total de una muestra seca.

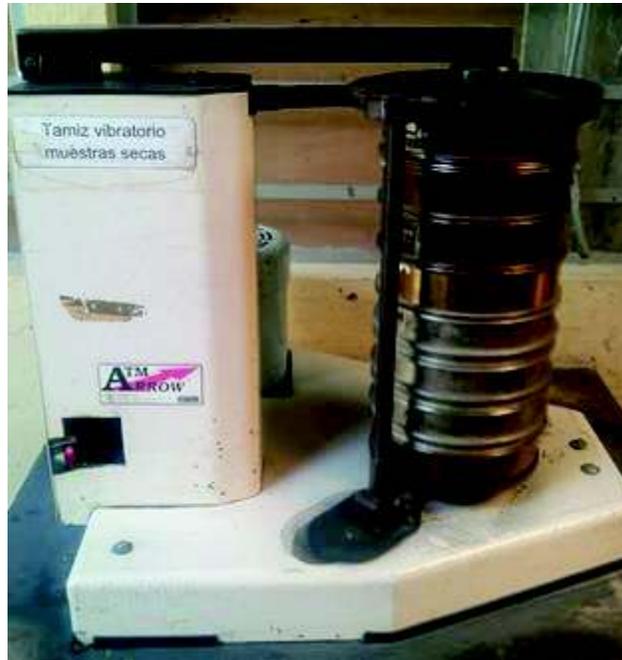
Generalmente se utilizan dos métodos. (Braja M. Das, 2006)

- a) *Análisis Granulométrico*, el cual se aplica para partículas que presentan porcentajes considerables de tamaños mayores a 0.075mm de diámetro, consiste en agitar la muestra a través de tamices con aperturas cada vez menores por medio de una tamizadora la cual puede ser manual o automática. Una vez terminada la agitación en cada tamiz se retiene una determinada cantidad de muestra. Los cálculos para determinar la cantidad

de muestra en cada tamiz se lo realiza en una hoja semilogarítmica con el porcentaje de material fino en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas el tamaño de apertura de los tamices (Escala logarítmica). (Braja M. Das, 2006).

b) *Análisis Hidrométrico*, este análisis es el método más utilizado para determinar el porcentaje de partículas que pasan el tamiz No. 200, es decir, partículas que presentan un diámetro menor a 0.075mm. La muestra es separada por cuarteo o cualquier otro método que permita la correcta selección de la fracción representativa de muestra. Este método se basa en la sedimentación de material fino en suspensión en un líquido, una vez que la muestra de suelo se dispersa en el agua las partículas se asientan a diferentes velocidades dependiendo de la forma, tamaño, peso y de la viscosidad del agua. En las pruebas con hidrómetro usualmente se utilizan 50 o 100 g de muestra seca, el cilindro de sedimentación tiene 45.7 cm de largo, 6.4 cm de diámetro y un volumen de 1000 ml. (Braja M. Das, 2006).

Para el análisis granulométrico del relave de Cianuración el equipo a utilizarse es el Tamizador vibratorio para muestras secas “*ATM ARROW*”, su función es la de separar el material de interés con una serie de mallas metálicas con diferente apertura, el proceso se lo efectúa por medio de agitación en seco, el objetivo de este ensayo es determinar el tamaño de partícula del material de interés



**FIGURA 11.** Tamizador Vibratorio “**ATM ARROW**”

Tomado de: DEMEX, 2018

## **2.4 Dosificación para Morteros**

Dosificación es un proceso el cual implica establecer las proporciones adecuadas para los materiales a utilizarse en la elaboración de Mortero, Hormigón, Concreto, etc. Para obtener una resistencia y durabilidad adecuada la cual sea la ideal para el proyecto a realizarse. Para una correcta dosificación se debe tomar en cuenta múltiples factores como el tipo de material, condiciones ambientales, cantidad de agua, entre otros. Sin embargo dada la complejidad de una correcta dosificación se han desarrollado numerosas metodologías en cuales siempre destacan:

**Relación Agua – Cemento**, donde el porcentaje de agua varía dependiendo la cantidad de cemento que se utilizó. Al mezclarse ambos materiales forman una “pasta”, la cual actúa como aglomerante al endurecerse y mantiene unido a los granos y demás componentes de la mezcla. Mientras mayor sea la cantidad de agua presente en la mezcla, el mortero elaborado tendrá una mayor trabajabilidad, sin embargo esto disminuirá su resistencia y durabilidad.



**FIGURA 12.** Dosificación de morteros

**Tomado de:** Ingeniería Civil – EPN, 2018

Para el presente estudio se han realizado varios ensayos de dosificación, con los ensayos, se utilizaron los siguientes equipos de laboratorio facilitados por la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional, los equipos constan de:

- Probetas de 200, 300 y 500 ml, espátula, moldes para briquetas, apisonador (Figura12)
- Balanza digital de precisión **“SANTORIUS 3804 MP”** (Figura 14 – a)
- Mezcladora **“HOBART”**, de tres velocidades. (Figura 14 - b)



**FIGURA 13.** Equipo de laboratorio para dosificación y elaboración de Briquetas y Cilindros. Tomado de: Ingeniería Civil – EPN, 2018

a)



b)



**FIGURA 14.** a) Balanza digital de precisión “**SANTORIUS 3804 MP**”; b) Mezcladora “**HOBART**”. Tomado de: LEMSUR – EPN, 2018.

## 2.5 Elaboración de Briquetas y cilindros

Una vez realizada la dosificación para la elaboración de briquetas y cilindros se realizó dos ensayos de dosificación (1:1) con variación del contenido de agua desde (70 – 40) % con el objetivo de analizar la resistencia de las respectivas briquetas a la compresión uniaxial. Los cilindros serán elaborados con la dosificación de las briquetas que presenten la mayor resistencia, el objetivo de los mismos es obtener Coeficiente de Poisson, Modulo de Deformabilidad de Young y el peso específico.

### Ensayo 1.

Se realizó la dosificación en proporción (1:1), es decir, se utilizó la misma cantidad de relave, respecto a la cantidad cemento medido en gramos. La cantidad de agua utilizada varia en porcentaje respecto a la cantidad de cemento, para el presente ensayo el porcentaje de agua vario entre (40 – 70) %. Se elaboraron 8 cubos de 5 cm. para evaluar la resistencia con esta dosificación **Ver tabla 2.1.**

**TABLA 2.5.1** Tabla de dosificación en proporción (1:1), con variación del contenido de agua en la relación (Agua/Cemento)

Muestra	Cantidad de Cemento (g)	Cantidad de Relave (g)	Relación	Cantidad de Agua (g)	% (Agua / Cemento)
A1	300	300	(1:1)	210	70
A2	300	300	(1:1)	210	70
B1	300	300	(1:1)	180	60
B2	300	300	(1:1)	180	60
C1	300	300	(1:1)	150	50
C2	300	300	(1:1)	150	50
D1	300	300	(1:1)	120	40

D2	300	300	(1:1)	120	40
----	-----	-----	-------	-----	----



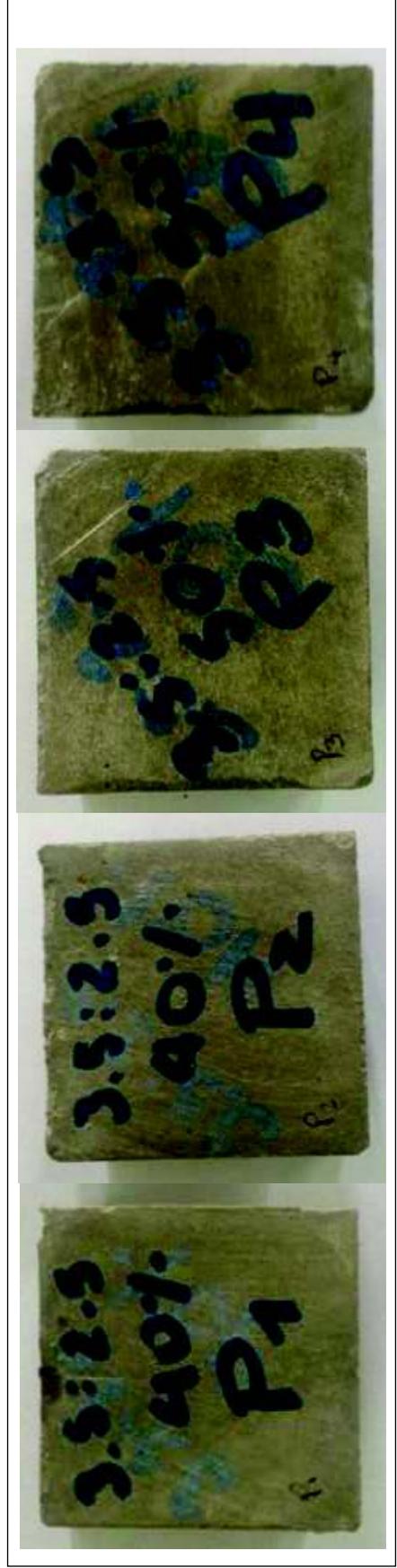
**FIGURA 15.** Briquetas Ensayo 1, con dosificación (1:1)

## Ensayo 2

Para la segunda dosificación se cambió la proporción de Cemento - Relave, es decir, se utilizó dos dosificaciones. La primera se utilizó 400 gramos de Relave y 200 gramos de cemento, el porcentaje (A/C) utilizado para este ensayo vario entre (40 y 50) % de agua, es decir, se utilizó 150 gramos y 120 gramos de agua respectivamente. Se elaboraron 8 cubos de 5 cm. para evaluar la resistencia con esta dosificación **Ver tabla 2.5.2**

**TABLA 2.5.2** Dosificación de Cemento – Relave con (50 y 40) % de agua.

Muestra	Cantidad de Cemento (g)	Cantidad de Relave (g)	Relación	Cantidad de Agua (g)	% (Agua / Cemento)
Q1	400	200	(2:1)	120	40
Q2	400	200	(2:1)	120	40
Q3	400	200	(2:1)	150	50
Q4	400	200	(2:1)	150	50
P1	350	250	(1.4:1)	120	40
P2	350	250	(1.4:1)	120	40
P3	350	250	(1.4:1)	150	50
P4	350	250	(1.4:1)	150	50





**FIGURA 16.** Briquetas Ensayo 2, con dosificación (2:1) y (1.4:1)

### **Ensayo 3**

Una vez realizado las pruebas de compresión uniaxial a los 8 días de curación, se elaboraron ocho briquetas adicionales con las dosificaciones hechas en los ensayos uno y dos al (40 y 50) % de agua respectivamente. Dichos cubos serán ensayados a los 14 días de curación para poder observar como aumenta la resistencia a la compresión simple. **Ver Tabla 2.5.3**

**TABLA 2.5.3** Briquetas para ensayos a 14 días de curación.

Muestra	Cantidad de Cemento (g)	Cantidad de Relave (g)	Relación	Cantidad de Agua (g)	% (Agua / Cemento)
M1	350	250	(1.4:1)	120	40
M2	350	250	(1.4:1)	120	40
M3	350	250	(1.4:1)	150	50
M4	350	250	(1.4:1)	150	50
N1	300	300	(1:1)	120	40
N2	300	300	(1:1)	120	40
N3	300	300	(1:1)	150	50
N4	300	300	(1:1)	150	50

Una vez realizada las dosificaciones antes mencionadas estas serán ensayadas para determinar su Resistencia a la Compresión Simple (RCS), posteriormente se elaborarán 28 briquetas con las dosificaciones que presenten los valores de Esfuerzo ( $F'c$ ) y Carga (Q) las cuales se dejaron en curación durante 28 días para alcanzar la máxima resistencia del hormigón. **Ver Tabla 2.5.4**

**TABLA 2.5.4** Briquetas de mayor resistencia a la compresión simple o uniaxial.

Muestra	Cantidad de Cemento (g)	Cantidad de Relave (g)	Cantidad de Agua (g)	% (Agua / Cemento)
<b>C2</b>	300	300	150	50
<b>D1</b>	300	300	120	40
<b>P1</b>	350	250	120	40
<b>P2</b>	350	250	120	40

Para la elaboración de cuatro cilindros se utilizó con las relaciones de relave – cemento [(1:1) y (1.4:1)] especificadas en la **tabla 4**. La cantidad de relave, agua y cemento utilizado en relación (1:1) fue de relave 1525 g, cemento 1525 g, agua al 50% (762.5g) y al 40% (610.4g). La segunda dosificación utilizada es con relación (1.4:1) de relave – cemento, es decir se utilizó 1750 g de relave, 1250 g de cemento y, agua al 50% (762.5g) y al 40% (610.4g). **Ver Tabla 2.5.5**

**TABLA 2.5.5** Tabla de Dosificaciones para cilindros.

Muestra (Cilindros)	Cantidad de Cemento (g)	Cantidad de Relave (g)	Relación	Cantidad de Agua (g)	% (Agua / Cemento)
<b>Y1</b>	1525	1525	(1:1)	762.5	50
<b>Y2</b>	1525	1525	(1:1)	610	40
<b>Y3</b>	1750	1750	(1.4:1)	762.5	50
<b>Y4</b>	1750	1750	(1.4:1)	610	40

Los cilindros serán utilizados para determinar el Módulo de deformabilidad de Young, Coeficiente de Poisson y peso específico, los mismos que serán analizados a los 28 días de curación (sumergidos en agua), tiempo en el cual el hormigón alcanza su punto máximo de resistencia.

#### **Ensayo 4.**

Con las dosificaciones establecidas en relación (1:1) y (1.4:1) con (40 y 50) % de agua, se elaboraran veinte briquetas, cinco de cada dosificación y se las ensayara después de 28 días de curación, con el objetivo de determinar cuál es la máxima resistencia que alcanzan las briquetas. **Ver Tabla 2.5.6**

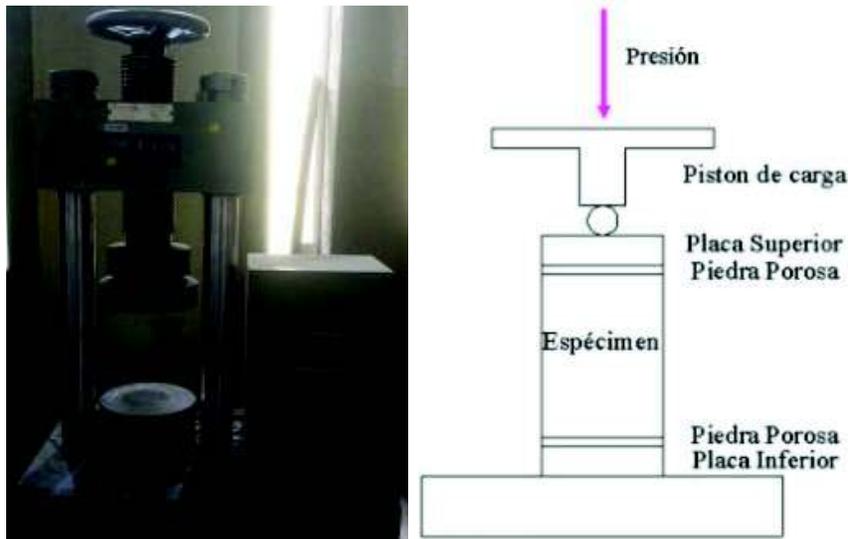
**TABLA 2.5.6.** Dosificación de morteros para 28 días en curación.

Muestra	Cantidad de Cemento (g)	Cantidad de Relave (g)	Relación	% (Agua / Cemento)	Cantidad de Agua (g)
V1	350	250	(1.4:1)	40	120
V2	350	250	(1.4:1)	40	120
V3	350	250	(1.4:1)	40	120
V4	350	250	(1.4:1)	40	120
V5	350	250	(1.4:1)	40	120
W1	350	250	(1.4:1)	50	150
W2	350	250	(1.4:1)	50	150
W3	350	250	(1.4:1)	50	150
W4	350	250	(1.4:1)	50	150
W5	350	250	(1.4:1)	50	150
X1	300	300	(1:1)	40	120
X2	300	300	(1:1)	40	120
X3	300	300	(1:1)	40	120
X4	300	300	(1:1)	40	120
X5	300	300	(1:1)	40	120
Z1	300	300	(1:1)	50	150
Z2	300	300	(1:1)	50	150
Z3	300	300	(1:1)	50	150
Z4	300	300	(1:1)	50	150
Z5	300	300	(1:1)	50	150

## 2.6 Ensayos de Compresión Simple

La Resistencia a la Compresión Simple o Uniaxial se define como el esfuerzo axial máximo que resiste un determinado material (probetas o cuerpos cilíndricos), antes de fracturarse, es conocido también como la resistencia a la compresión no confinada. (Schlumberger Oilfield Glossary, 1998).

Los ensayos de compresión simple realizados en las 44 briquetas y 4 cilindros se los desarrollo en tres etapas de 8, 14, y 28 días, tiempo en el que se pudo observar que a mayor tiempo de curación las briquetas soportaban mayor carga y por consiguiente su resistencia a la compresión uniaxial era mayor, para estos ensayos se utilizó el equipo “SUZPERCARG”, este equipo sirve para aplicar carga puntual (en toneladas) sobre las briquetas o cilindros consta de una lector digital el cual muestra la carga aplicada, una curva de resistencia, y el esfuerzo en (kg/cm<sup>2</sup>), el equipo automáticamente deja de aplicar presión con el cuerpo evaluado llega al punto de ruptura, consta además de un cabezal fijo y una válvula de descarga.



**FIGURA 17.** Equipo para Compresión Uniaxial “SUZPERCARG”. (Tomado de LEMSUR, 2018).





**FIGURA 19.** Equipo utilizado para Límites de Atterberg y clasificación SUCS.  
(Tomado de: LEMSUR, 2018)

1. Para determinar el contenido de humedad presente en el relave se tomó una muestra de 100g de relave aproximadamente repartidos en dos recipientes, primero se obtuvo el peso del recipiente vacío y posteriormente el peso del recipiente más el peso de la muestra de relave. Cada muestra se la pone en el horno de secado durante 24 horas y se vuelve a pesar, de esta manera se determina como disminuye el peso, una vez eliminado el contenido de humedad de la muestra.

**TABLA 2.7.1** Ensayo de contenido de Humedad.

<b>Contenido de Humedad</b>		
<b>Capsula</b>	<b>M28</b>	<b>D12</b>
<b>Peso Capsula (g)</b>	9,789	9,983
<b>Peso Capsula + Suelo Húmedo (g)</b>	59,799	59,993
<b>Peso Capsula + Suelo seco (g)</b>	59,224	59,46

2. El límite plástico por definición es la cantidad de humedad mínima que debe presentar un suelo o material fino para tener un comportamiento plástico, para nuestro estudio se realizó una mezcla del material de relave con agua y se elaboró cilindros de aproximadamente 3mm de diámetro por 10 cm de largo. En este ensayo se busca determinar cuándo un cilindro empieza a presentar pequeñas fisuras o grietas, en este punto se pesa los cilindros y se suma este peso al peso de la capsula tomado en cuenta que el gramaje entre ambos pesos debe superar a los 7g, posteriormente se deja secar durante 24 horas y se pesa nuevamente el suelo seco.

**TABLA 2.7.2** Ensayo para Límite Plástico.

<b>Límite Plástico</b>		
<b>Capsula</b>	<b>S68</b>	<b>S63</b>
<b>Peso Capsula (g)</b>	5,405	5,113
<b>Peso Capsula + Suelo Húmedo (g)</b>	7,186	7,015
<b>Peso Capsula + Suelo seco (g)</b>	<b>6,935</b>	<b>6,734</b>

3. El límite líquido por definición es el contenido de humedad de una muestra de material fino, la cual se expresa en porcentaje respecto al peso del suelo seco, para nuestro ensayo se coloca una cantidad de relave con agua en la cuchara Casagrande, la cual es separada por medio del rayador, se contabilizan el número de golpes que se necesitan para que el material se vuelva a unir en una sección aproximada de 1cm. El ensayo se lo realiza tres veces donde la mezcla utilizada debe caer en los tres intervalos de golpes (15-25), (20-30), (25-35).

**TABLA 2.7.3** Ensayo para Límite Líquido.

<b>Límite Líquido</b>			
<b>Capsula</b>	<b>E1</b>	<b>MG18</b>	<b>R24</b>
<b>Peso Capsula (g)</b>	9,658	9,542	10,064
<b>N° Golpes</b>	15	34	22
<b>Peso Capsula + Suelo Húmedo (g)</b>	18,542	16,655	18,724
<b>Peso Capsula + Suelo seco (g)</b>	<b>16,557</b>	<b>15,193</b>	<b>16,926</b>

Para el análisis granulométrico se trabajó con una muestra de relave de 50 gramos, la misma que colocho en los tamices N° (10, 40, 200 y bandeja), este materia se lava con agua hasta que su color sea translucido, el material retenido se lo seca durante 24 horas y se lo tamiza nuevamente para pesar la cantidad de material seco retenido en cada tamiz.

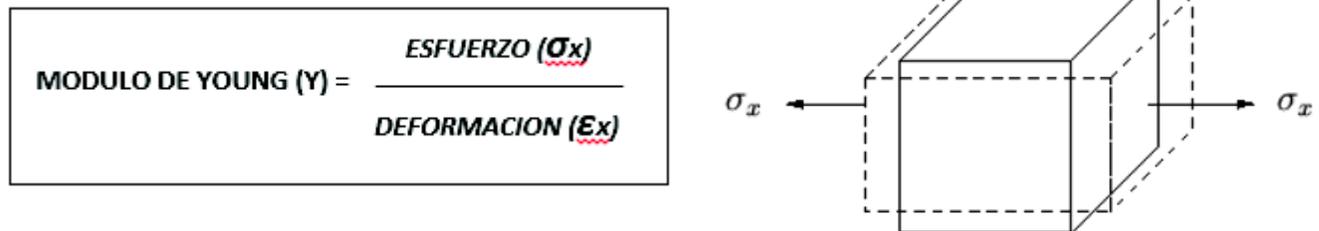
**TABLA 2.7.4** Ensayo Granulométrico.

<b>Granulometría</b>	
<b>Capsula</b>	<b>M30</b>
<b>Peso inicial (g)</b>	50g
<b>P. Capsula + P. Seco (g)</b>	24,61
<b>N° Tamiz</b>	<b>Material Retenido (g)</b>
<b>10</b>	0
<b>40</b>	0,07
<b>200</b>	13,165
<b>Bandeja</b>	1,01

## 2.8 Modulo de Young y Coeficiente de Poisson

**Módulo de Young**, también conocido como módulo de elasticidad, es un parámetro utilizado para caracterizar el comportamiento de un material cuando se aplica una fuerza determinada. Para un cuerpo elástico e isótropo este módulo tiene un valor constante sea para tracción o compresión, es decir, el módulo de Young para este tipo de cuerpos es independiente del régimen de esfuerzo y propio de cada material siempre y cuando el régimen de esfuerzos no exceda el límite elástico de dicho material.

Si se aplica una fuerza  $F$ , a un cuerpo de una longitud inicial  $l_0$ , se define al módulo de Young como la relación entre el alargamiento o deformación  $(l - l_0)$  del cuerpo posterior a la aplicación de la fuerza  $F$ . Se lo mide en unidades de esfuerzo o presión.



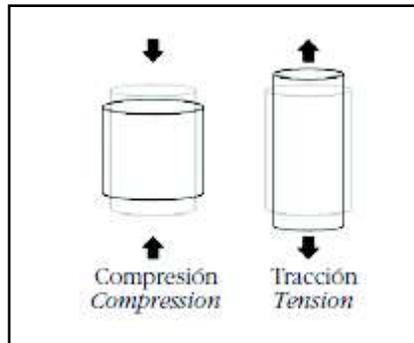
**FIGURA 20.** Módulo de Young

**Tomado de:** Ruiz M., 2014.

### **Coeficiente de Poisson**

Si se somete a un cuerpo a una fuerza uniaxial ( $F$ ), provocara un acortamiento de las dimensiones del cuerpo en la dirección que se haya aplicado la fuerza, es decir, si se aplica una fuerza en el eje longitudinal generará una disminución de las dimensiones en este eje y un aumento de las mismas en el eje perpendicular a la fuerza, de la misma manera si se aplica una fuerza de tracción o tensión en el eje transversal se producirá el aumento de las dimensiones en el eje axial y una

disminución en el eje donde se aplicó la fuerza. (Tomado de: Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos de: **Guede D., González P., Caeiro J.R.**)



**FIGURA 21.** Relación entre Deformación Axial y Deformación Trasversal

Tomado de: Guede D., González P., Caeiro J.R., 2013, Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos.

El coeficiente de Poisson es la relación adimensional que existe entre la deformación Transversal o radial y la deformación longitudinal o axial.

$$\text{COEFICIENTE DE POISSÓN} = \frac{\epsilon \text{ TRANSVERSAL}}{\epsilon \text{ AXIAL}}$$

Los equipos utilizados para determina los módulos de Young y Coeficientes de Poisson para cada dosificación fueron la máquina de compresión simple “**SUZPERCARG**”, El Puente de “**WHEATSTONE**” y los sensores “**STRAIN GAGE**” mismos que se utilizaron en sentido transversal y longitudinal para medir la deformación de los cilindros en ambos sentidos

a)



b)



**FIGURA 22.** a) Sensor *Strain Gage* y b) *Puente de Wheatstone*

Tomado de: LEMSUR, 2018

Para la obtención de los coeficientes de Poisson y el módulos de Young, se coloca dos Sensores Strain Gage por cilindro, uno de forma vertical y otro de forma longitudinal a noventa grados uno respecto del otro pero con una separación aproximada de  $\frac{1}{4}$  de la circunferencia, estos sensores son conectados mediante cables a la Fuente de Wheatstone donde se registran los valores de deformación, los mismos se los mide en tres intervalos. El primer intervalo mide la deformación transversal y longitudinal de (500 en 500) kg de carga puntual hasta alcanzar las cinco toneladas. El segundo intervalo trabaja de (1000 en 1000) kg hasta las 10 toneladas de carga puntual, y finalmente el tercer intervalo se lo trabaja de (2000 en 2000) kg hasta alcanzar el punto de ruptura del cilindro. Vale recalcar que en cada intervalo una vez finalizado se debe encerrar el Puente de Wheatstone para volver a medir los diferentes valores de deformación para los siguientes intervalos, adicionalmente para el análisis y comportamiento del mortero dentro de los cilindros se evaluara la resistencia a la compresión simple comparando con lo obtenido en las briquetas y el tipo de falla que presenten los cilindros al momento de la ruptura.

## 2.9 Software Phase 2

Para el modelamiento tenso – deformacional del mortero de relave se utilizara el software Phase2 (Versión 5.0) perteneciente a Rocscience, dicho programa es utilizado para el análisis de esfuerzos sobre elementos finito en dos dimensiones. El programa Phase2 realiza el modelamiento en cuerpos plásticos y elásticos sea roca o suelo, es decir, presenta una amplia gama de opciones que permiten realizar análisis para ingeniería sea en proyectos subterráneos o en superficie.

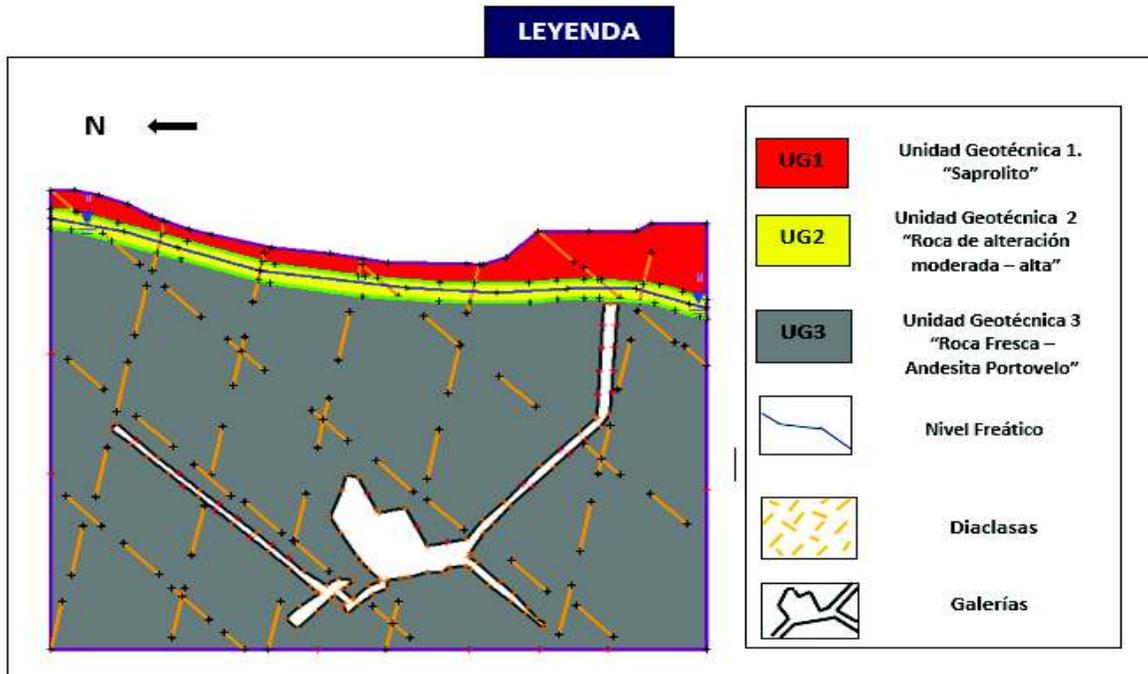
Algunas ventajas de este programa es que nos permite crear modelos complejos de manera rápida y precisa, algunas de principales aplicaciones que ofrece este software son la creación de modelos para túneles en roca débil, minas a cielo abierto con taludes, potencial de cavernas subterráneas, entre otras.

Dentro del presente estudio, se utiliza este software para observar el comportamiento del mortero como relleno de las galerías mineras, para el análisis trabajaremos principalmente con datos de profundidad, litología, RQD, dimensiones de las galerías, módulos de Young y coeficientes de Poisson (del mortero), los valores de resistencia a la compresión simple, etc. El objetivo es determinar si el mortero analizado puede brindar una solución integral al problema de los socavones ocurridos en el cantón Zaruma.

El modelo de las galerías mineras de nuestra zona de estudio fue desarrollado por el INIGEMM en el ESTUDIO MULTIDISCIPLINARIO PARA ESTABILIDAD DE CONO Y CHIMENEA DE COLAPSO DE LA UNIDAD EDUCATIVA “LA INMACULADA, FÉ Y ALEGRIA – CANTÓN ZARUMA”, el mismo que fue terminado en Octubre de 2017. Con este modelo en dos dimensiones se representa la ubicación y distribución de galerías en la zona de afectación y posibles zonas vulnerables. El modelo en dos dimensiones de la ubicación de las galerías en la zona de estudio, así como las capas de roca sobreyacentes fue realizado en AutoCAD civil 3D 2013, el mismo se lo guarda en formato DXF para ser usado en el software *PHASE 2*, de esta manera se simularán las condiciones de las galerías y cavidades Pre – inyección y Post- inyección del mortero de

relave, para analizar su comportamiento como relleno de galerías y la deformación de las mismas.

El modelamiento de las galerías mineras en subsuelo fue desarrollado y facilitado para el presente estudio por INIGEMM, 2017.



**FIGURA 23.** Modelo en 2D de la zona de estudio en el Cantón Zaruma (Modificado de Burbano D. en INIGEMM, 2017).

Dentro de la zona de estudio se definieron tres unidades Geotécnicas (UG), las mismas se detallan a continuación.

### 1. UG1 – Saprolito

Presenta una potencia de estrato de (1 a 10) m, los cuales disminuyen su espesor hacia el norte, son arcillas de color amarillento a rojiza con presencia de clastos de rocas angulosos fuertemente meteorizados y cierta mineralización con presencia principalmente de Pirita. (INIGEMM, 2017).

## **2. UG2 – Roca con alteración moderada a alta**

Esta unidad geotécnica presenta un espesor promedio entre (4 y 5) m se encuentra ubicado bajo la UG1, y está conformada principalmente por andesitas con un grado moderado a alto de alteración además de arcillas de color café amarillento de alta plasticidad. Esta UG es una zona transicional y podría interpretarse como la parte más alterada de la Unidad Portovelo.

## **3. UG3 – Roca fresca – Andesita Portovelo**

Pertenece a la Unidad Portovelo, son andesitas de color gris – plomo que presentan un grado bajo de alteración, se caracteriza principalmente por presentar un cierto grado de silicificación, un fuerte fracturamiento donde se emplazan vetas principalmente de cuarzo, además presenta mineralización principalmente con Pirita y Calcopirita. En ciertas zonas se encuentran brechas volcánicas con microestructura clástica, con presencia de clastos de rocas ígneas, sedimentarias, volcanoclásticas, y una matriz arcillosa con presencia de sulfuros. Presenta una potencia de estrato que oscila entre los (50 a 65) m dentro de nuestra zona de estudio.

Para el modelamiento propuesto se tomó como base el modelo de la zona de afectación en el cantón Zaruma, del cual se utilizó las galerías en sub-superficie y las capas sobre dichas galerías. Para una mayor fiabilidad en el modelo se han utilizado las profundidades de cada material obtenidas mediante sondeos geotécnicos ejecutados, características geotécnicas de las diferentes capas de roca, así como también las propiedades del mortero de relave.

**CAPITULO III**  
**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

### 3.1 Fluorescencia y Difracción de Rayos X

Una vez realizado los análisis de Fluorescencia de rayos X y Difracción de rayos X del relave de cianuración se logró caracterizar el contenido mineralógico del relave, así como también determinar los elementos mayores presentes en el mismo.

#### Difracción de rayos X.

Para este proceso el equipo usado fue *D8 Advance* y el software *Diffra plus*, los resultados obtenidos de la muestra de relave se determinó en base a la cantidad de material cristalino presente en la muestra. Además se determinó la presencia de material amorfo no diferenciable.

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Contenido (%)
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	45
Caolinita	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	15
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	13
Clinocloro	(Mg,Fe) <sub>5</sub> Al(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	10
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	8
Flogopita	KMg <sub>3</sub> (F,OH) <sub>2</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	3
Pirita	FeS <sub>2</sub>	2
Gypsum	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	1
Esfalerita	ZnS	1

**FIGURA 24.** Análisis de Difracción de rayos X en relave de cianuración  
Tomado de: DEMEX, 2018

La presencia abundante de cuarzo evidencia la cantidad de vetas presentes en la zona, además de zonas donde la roca caja (Andesita Portovelo), se encuentra silicificadas, por tanto la abundancia de este mineral es coherente con el tipo de yacimiento presente en la zona. La presencia de Muscovita y Flogopita, marca un contacto entre la roca caja de la zona y los paquetes metamórficos de la zona, mismos que están sobre la Andesita Portovelo (Unidad Portovelo), dichos paquetes metamórficos están alterados a saprolitos en su mayoría, sin embargo en ciertas zonas se puede evidenciar el contacto entre ambos tipos de rocas. (M. Turner, 2014).

La presencia de sulfuros en nuestra muestra de relave alcanza un valor de 6%, además los sulfuros encontrados refleja la mineralización típica de la zona en un porcentaje que podría ser mayor, en este caso se estima que un porcentaje de minerales no se los pudo identificar ya que al usar cianuro muchas veces este destruye las estructuras cristalinas y el material se lo clasifica como amorfo.

La presencia de Caolinita en el relave representa un total del 15% de la composición mineralógica, es un silicato de aluminio hidratado formado por la descomposición de feldespatos, dentro de nuestra zona de estudio esta arcilla se encuentra interestratificada con esmectita dentro de la unidad arcillas (INIGEMM, 2017), para nuestro estudio UG2. Dentro de las propiedades de éste mineral se destaca que es una arcilla de plasticidad baja a media, es higroscópica (absorbe agua), absorbente, en este punto es de gran utilidad tomando en cuenta que el relave al mezclarse con el agua genera productos de lixiviación, el contenido considerable de esta arcilla podría actuar como aislante de posibles contaminantes. Además cuenta con propiedades, como no ser toxico, moldeable y actúa como material cubriente, entre otras. (DEMEX, 2018). Todas estas propiedades potencialmente ayudarían no solo a controlar la emisión de productos de lixiviación, sino también a reducir la porosidad, mejorar la trabajabilidad de nuestro mortero en sus diferentes dosificaciones.

## **Fluorescencia de rayos X.**

Para este análisis la muestra de relave pasa por un proceso de calcinación durante media hora a una temperatura de 950°C, donde se determina el porcentaje de pérdida de la muestra el cual fue de 4,74%, posterior a este procedimiento se analizó la muestra en el equipo *X S8 Tiger* y con el software *Spectra Pluss*. A continuación se detallan los resultados obtenidos de del análisis:

Elemento	Muestra 1
	Contenido %
Si	24,89
Fe	4,51
Al	4,31
Ca	3,44
K	1,82
S	1,34
Mg	0,62
Mn	0,27
Na	0,23
Ti	0,21
P	0,05

**FIGURA 25.** Análisis de Difracción de rayos X en relave de cianuración  
Tomado de: DEMEX, 2018

Como se puede evidenciar los elementos Si, Fe, Al, Ca, K, S, y Mg también aparecen como parte de la fórmula mineralógica de los compuestos de los análisis de difracción, en el orden presente se determinó la abundancia de los mismos. La presencia de elementos como Mn, el cual no aparece en la estructura

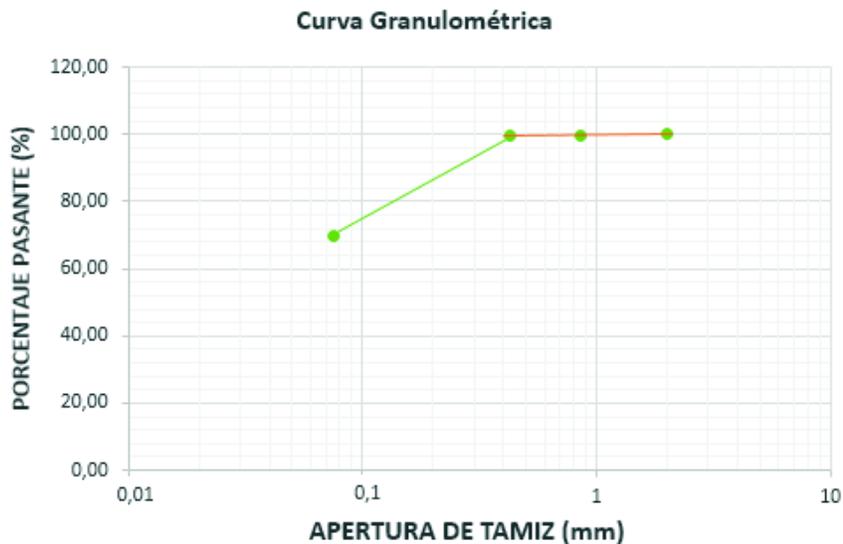
mineralógica del relave se atribuye a que la caja (Andesita Portovelo) es enriquecida en este elemento, esto también es observable en los análisis de agua de mina los cuales reflejaron que cuando el agua atraviesa la caja se enriquece en este elemento. (INIGEMM, 2017). Los elementos Na, Ti, P, podrían perecer a especies mineralógicas las cuales no pudieron ser diferenciadas en el análisis de Difracción de rayos X y fue catalogada como materia amorfa.

### 3.2 Granulometría

Una vez realizada la caracterización mineralógica del relave, se realizó el respectivo análisis granulométrico de nuestro material, el objetivo principal fue determinar el tamaño de partícula de nuestro relave para la elaboración de los morteros. Para el presente ensayo se realizaron 2 granulometrías por parte de DEMEX y LEMSUR.

**TABLA 3.2.1** Ensayo Granulométrico DEMEX, 2018.

GRANULOMETRIA DEMEX					
TAMIZ No.	ABERTURA TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASANTE (%)
10	2	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0,850	0,30	0,10	0,10	99,90
40	0,425	0,10	0,03	0,17	99,83
200	0,075	30,10	10,02	30,28	69,72
Pasa 200	-	209,50	69,72	-	30,78



**FIGURA 26.** Curva Granulométrica (DEMEX, 2018) de Relave.

Se puede observar que el material de relave presenta tamaños de partículas fino, el material empieza a tener porcentajes retenidos considerables a partir del Tamiz de malla # 70 con una abertura de 0,212 mm, vale recalcar que para el análisis comparativo de ambos ensayos granulométricos se tomaron las mismas mallas, el detalle del ensayo granulométrico de DEMEX se presenta en la sección de anexos. La mayor cantidad de material retenido se da en el tamiz número 200 con abertura para partículas hasta 0,075mm, lo cual confirma que el relave presenta tamaños de partícula de fino a muy fino.

**TABLA 3.2.2** Ensayo Granulométrico LEMSUR, 2018.

<b>GRANULOMETRIA LEMSUR</b>					
<b>NORMA: ASTM D 421</b>		<b>ASTM D 422</b>		<b>PESO INICIAL: 50,00</b>	
<b>TAMIZ No.</b>	<b>ABERTURA TAMIZ (mm)</b>	<b>PESO RETENIDO (gr)</b>	<b>PORCENTAJE RETENIDO (%)</b>	<b>PORCENTAJE ACUMULADO (%)</b>	<b>PORCENTAJE PASANTE (%)</b>
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0,85	0,00	0,00	0,00	100,00
40	0,43	0,07	0,10	0,10	99,90
200	0,08	13,17	26,80	26,80	73,20
Pasa 200	-	36,21	73,20	100,00	0,00

El ensayo granulométrico de la misma manera ubica al relave como un material con tamaño de grano de fino a muy fino, como se observa el 73% del material pasa el tamiz 200, es decir partículas con tamaño inferior a los 0,075mm. De esta manera ambos ensayos presentan curvas granulométricas similares, clasificando al relave de nuestro estudio como material fino a muy fino.

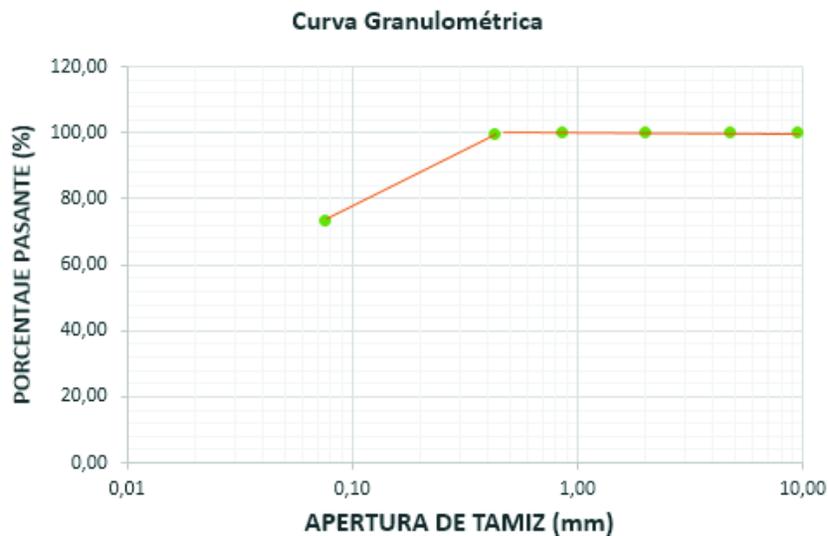


FIGURA 27. Curva Granulométrica (LEMSUR, 2018) de Relave.

### 3.3 Ensayos de Compresión Uniaxial (Briquetas y Cilindros)

Una vez realizada la dosificación de morteros se procedió a la curación de briquetas durante intervalos de 7, 14, 28 días y de cilindros por 28 días para observar el comportamiento de los mismos. Las dosificaciones experimentadas fueron (1:1), (2:1), (1.4:1). La teoría para la elaboración de morteros y hormigones tradicionales indica que a los 28 días de curación estos alcanzan su resistencia máxima (Braja M. Das – 2006.), con este antecedente se realizó los respectivos ensayos en los intervalos de tiempo especificados para observar si se cumple

dicho comportamiento con el material de relave. Los cálculos realizados para determinar la resistencia a la compresión uniaxial pueden observarse a detalle en la sección de anexos.

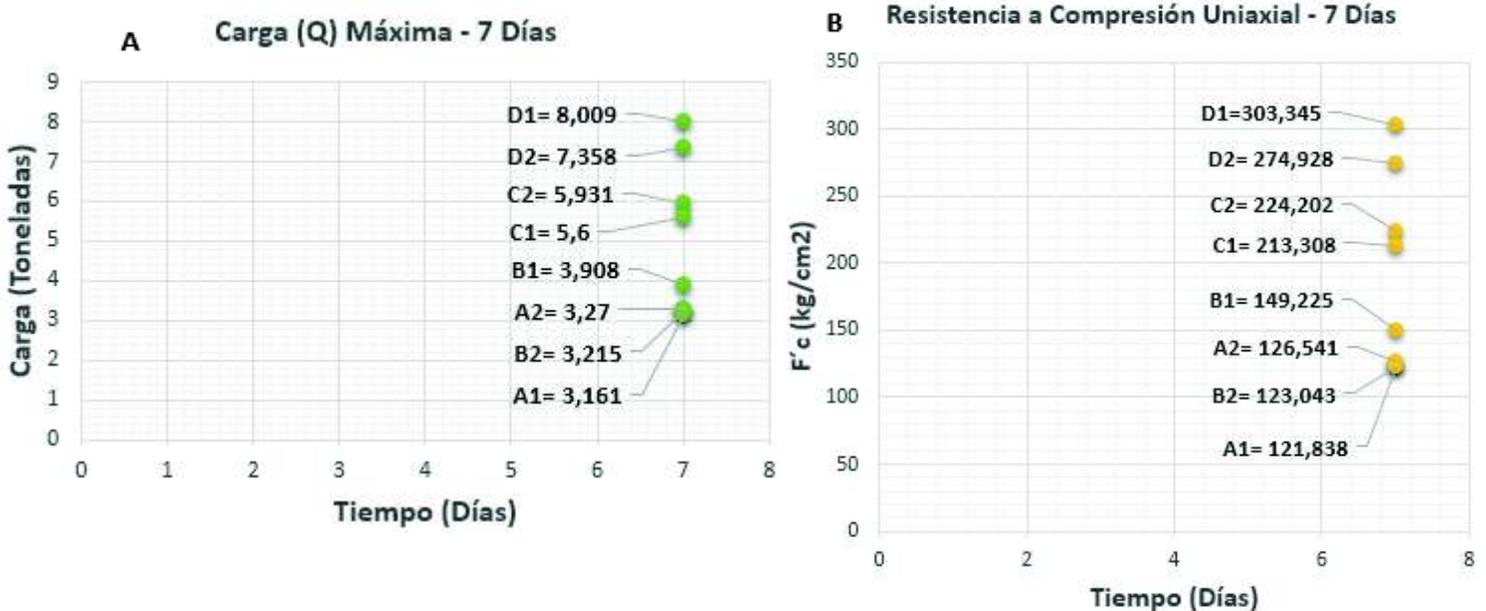
### Ensayo a 7 días de curación - Dosificación (1:1)

El primer ensayo de dosificación se lo realizó en iguales proporciones de cemento y relave, haciendo variable el contenido de (agua – cemento). Como ensayo inicial se realizaron 8 briquetas a 7 días de curación de las cuales posteriormente se seleccionó las que presentaron la mayor resistencia para realizar los ensayos posteriores. En la siguiente tabla se detalla los resultados de carga y esfuerzo de las briquetas.

**TABLA 3.3.1** Ensayos de compresión uniaxial a los 7 días de curación dosificación (1:1) con diferentes relaciones de (A/C).

Relación (A/C): 70%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	Q' (ton)	Q máx. (ton)
A1	7	(1:1)	121,838	3,161	124,1895	126,541	3,2155	3,27
A2		(1:1)	126,541	3,27				
Relación (A/C): 60%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	Q' (ton)	Q máx. (ton)
B1	7	(1:1)	149,225	3,908	136,134	149,225	3,5615	3,908
B2		(1:1)	123,043	3,215				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	Q' (ton)	Q máx. (ton)
C1	7	(1:1)	213,308	5,6	218,755	224,202	5,7655	5,931
C2		(1:1)	224,202	5,931				
Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	Q' (ton)	Q máx. (ton)
D1	7	(1:1)	303,345	8,009	274,928	274,928	7,358	7,358
D2		(1:1)	274,928	7,358				

Como podemos observar, las presentes briquetas varían su contenido de agua entre (70 a 40) % respecto a la cantidad de cemento, mientras mayor cantidad de agua posee cada mezcla, su trabajabilidad es mayor, sin embargo como podemos observar en la **TABLA 3.3.1** que mientras mayor cantidad de agua posee el mortero la carga máxima que soporta es menor y por ende su resistencia a la compresión uniaxial también será menor.



**FIGURA 28.** Grafico **A** valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) y Grafico **B** valores de (Esfuerzo (F'c) vs Tiempo (Días)) para briquetas de dosificación (1:1) a 7 días de curación.

La tendencia observada en la **FIGURA 28** nos indica claramente que la cantidad de carga máxima (Q) gráfico (A) y esfuerzo (F'c) gráfico (B) está relacionada directamente a la cantidad de agua (A/C) que posee. Una vez realizado los ensayos de resistencia a la compresión simple se determinó que las briquetas (D1, D2, C1, C2) presentaron los valores más altos de carga y esfuerzo, es decir,

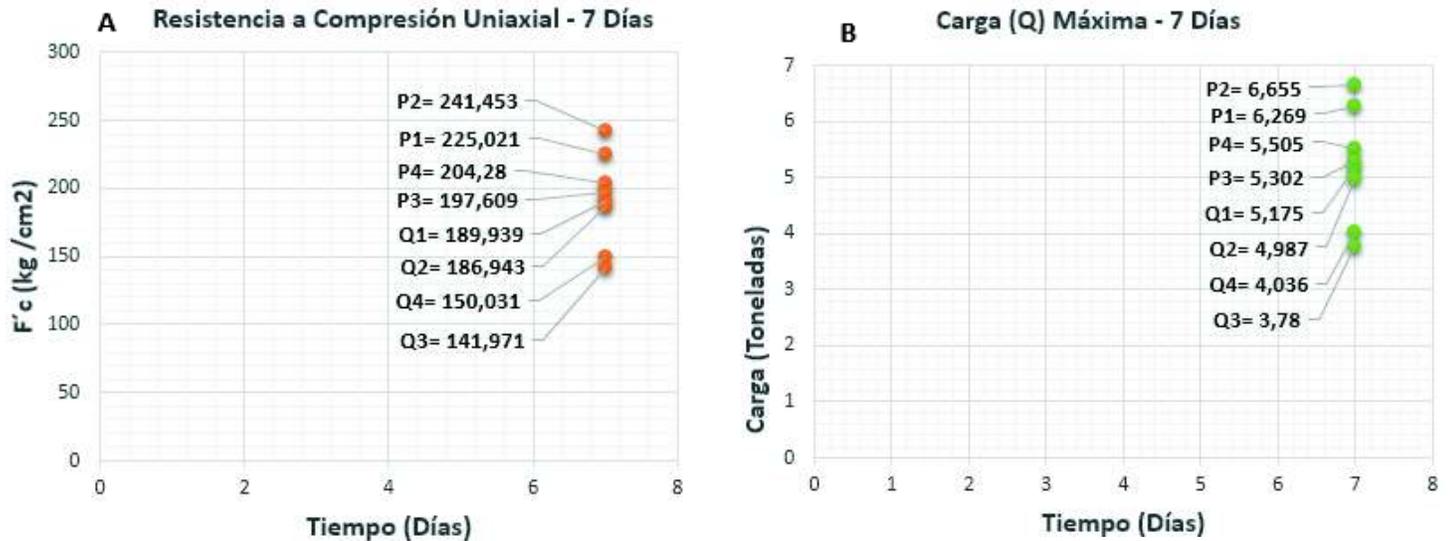
las dosificaciones con relación (A/C) de (40 y 50) % y proporción de Relave – Cemento (1:1). Ambas dosificaciones serán ensayadas a 14 y 28 días de curación.

### Ensayo a 7 días de curación - Dosificación (2:1) y (1.4:1)

Esta dosificación se la realizó con el objetivo de determinar el comportamiento del mortero con más cantidad de relave. Ya que para optimizar los procesos se cree adecuado utilizar una mayor cantidad de sólidos de relave. Las presentes dosificaciones presentaron los siguientes resultados.

**TABLA 3.3.2** Ensayos de compresión simple, dosificación (1.4:1) y (2:1), a los 7 días de curación.

Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
Q1	7	(2:1)	189,939	5,175	188,441	189,939	5,081	5,175
Q2		(2:1)	186,943	4,987				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
Q3	7	(2:1)	141,971	3,78	146,001	150,031	3,908	4,036
Q4		(2:1)	150,031	4,036				
Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
P1	7	(1.4:1)	225,021	6,269	233,237	241,453	6,462	6,655
P2		(1.4:1)	241,453	6,655				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
P3	7	(1.4:1)	197,609	5,302	200,9445	204,28	5,4035	5,505
P4		(1.4:1)	204,28	5,505				



**FIGURA 29.** Gráfico **A** valores de (Esfuerzo (F'c) vs Tiempo (Días)) y Gráfico **B** valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) para briquetas de Dosificación (1.4:1) y (2:1), a 7 días de curación.

Como podemos observar a mayor contenido de relave la carga (Q) y el esfuerzo (F'c) que resiste cada briqueta es menor, sin embargo se confirma que en las 3 dosificaciones experimentadas a menor contenido de agua (40) % los resultados obtenidos son los mejores y potencialmente los más idóneos para nuestro proyecto. En este ensayo los mejores valores corresponden a las dosificación (1.4:1) de Relave – Cemento, por lo tanto esta dosificación se la ensayara a 14 y 28 días de curación.

La **FIGURA 29** evidencia que para obtener una mayor resistencia a la compresión simple y mayor carga se necesita que el contenido de agua – cemento sea del (40 o 50) %, además se pudo verificar que a menor contenido de cemento se reduce la carga (Q) y el esfuerzo (F'c) en su respectiva dosificación. Observando el grafico A y el grafico B se puede observar claramente que los valores de carga y esfuerzo de cada dosificación son mayores con mayor cantidad de cemento y menor contenido de agua.

Con los datos obtenidos, se determinó que las dosificaciones (1:1) y (1.4:1), al (40 y 50) % de agua son las más idóneas para nuestro estudio, por lo tanto se elaboraron 8 briquetas con las siguientes características: con dosificación (1:1) al (40 y 50) % de agua 4 briquetas y 4 briquetas de dosificación (1.4:1) al (40 y 50) % de agua, las mismas que se las ensayo a los 14 días de curación.

Adicionalmente se elaboraron 20 briquetas para ser ensayadas a los 28 días de curación, de las cuales la mitad corresponden a la dosificación (1:1) al (40 y 50) % de agua y la otra mitad a (1.4:1) al (40 y 50) % de agua respectivamente.

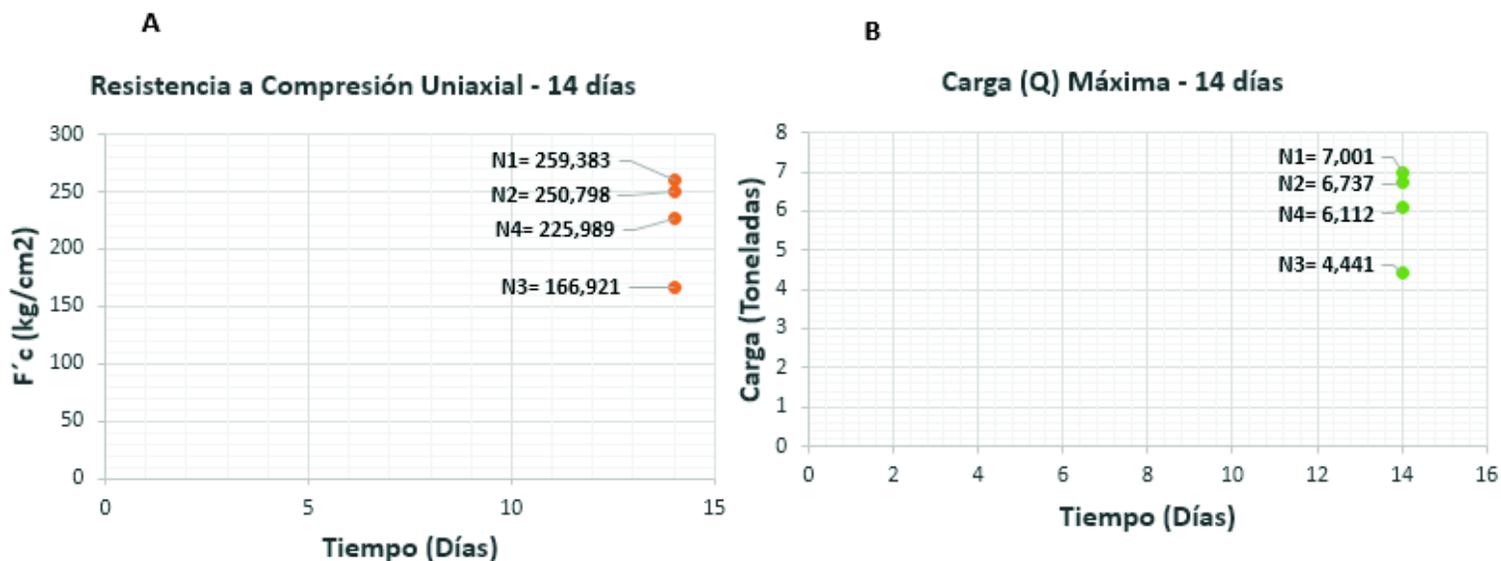
### Ensayo a 14 días de curación

En este intervalo de tiempo se realizaron 8 briquetas de dosificación (1:1) y (1.4:1), ya que las mismas ensayadas a 7 días, presentaron los mejores valores de resistencia a la compresión uniaxial. En la teoría usada habitualmente en ingeniería civil a mayor tiempo de curación, aumenta la resistencia del mortero. Una vez transcurrido los 14 días se obtuvieron los siguientes resultados.

### Dosificación (1:1)

**TABLA 3.3.3** Ensayos de compresión simple, dosificación (1:1) a 14 días de curación.

Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
N1	14	(1:1)	259,383	7,001	255,0905	259,383	6,869	7,001
N2		(1:1)	250,798	6,737				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
N3	14	(1:1)	166,921	4,441	225,989	225,989	6,112	6,112
N4		(1:1)	225,989	6,112				



**FIGURA 30.** Gráfico **A** valores de (Esfuerzo (F'c) vs Tiempo (Días)) y Gráfico **B** valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días))- Dosificación (1:1), a 14 días de curación.

Los valores obtenidos al igual que las briquetas ensayadas a los 7 días, presentan valores de esfuerzo (F'c) y carga (Q) mayores cuando el contenido de agua es menor, sin embargo, a diferencia de lo que sucede con los morteros ordinarios, podemos observar en el grafico A y en el grafico B éstos morteros ensayados a 14 días presentan una disminución en los valores de resistencia y de carga. Para esta comparación entre las mismas dosificaciones no se tomó en cuenta la briqueta N3, debido a que presentó una fisura desde su elaboración. En relación (A/C) al 40% podemos observar una reducción de la resistencia de 7,215%; y de la carga de 6,645%. En relación (A/C) al 50% se observa un mínimo incremento en la resistencia de 3,201%; y en carga de 5,669%.

### Dosificación (1.4:1)

**TABLA 3.3.4** Ensayos de compresión simple - Dosificación (1.4:1), a 14 días de curación

Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
M1	14	(1.4:1)	259,400	6,942	268,651	277,901	7,2475	7,553
M2		(1.4:1)	277,901	7,553				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
M3	14	(1.4:1)	214,801	5,627	216,345	217,889	5,6565	5,686
M4		(1.4:1)	217,889	5,686				

A

B



**FIGURA 31.** Gráfico **A** valores de (Esfuerzo (F'c) vs Tiempo (Días)) y Gráfico **B** valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1.4:1) a 14 días de curación.

Los valores obtenidos tanto para el esfuerzo (F'c) y carga (Q) son mayores cuando el contenido de agua es menor. Comparativamente entre las briquetas

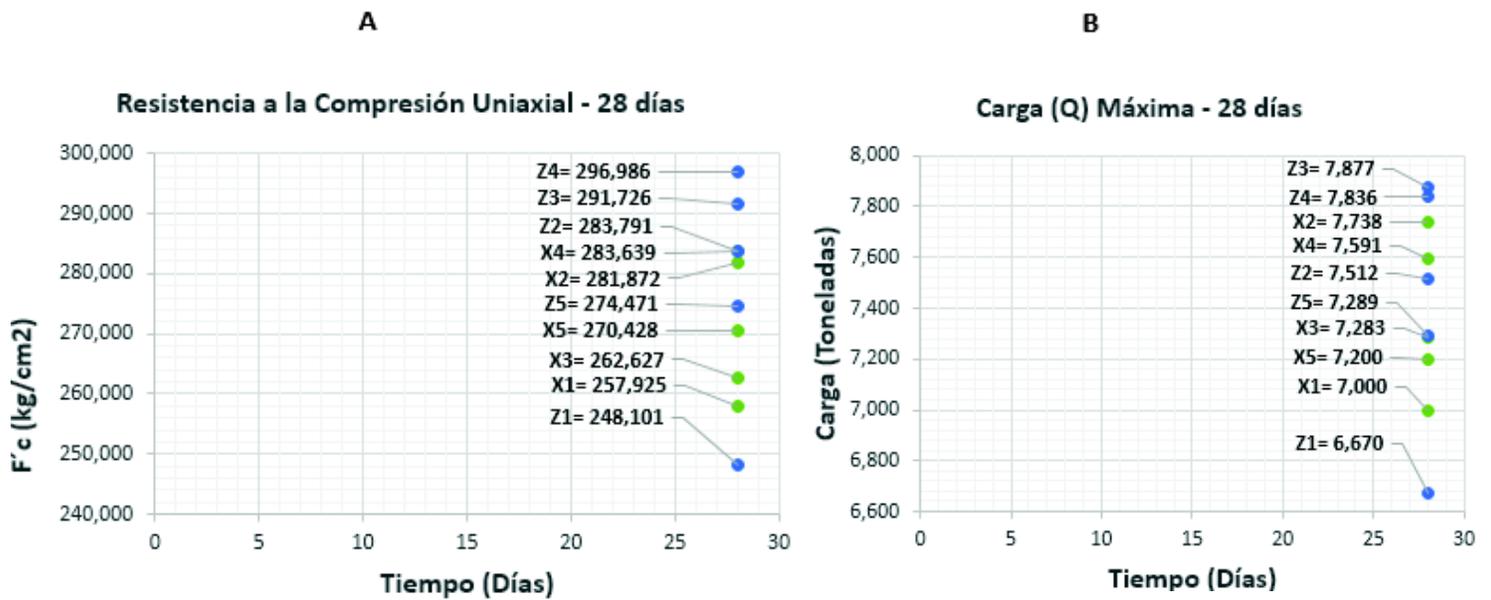
ensayadas a los 7 días esta dosificación presenta las siguientes variaciones: la carga en proporción (A/C) al 40% presenta un incremento del 10,83% en carga y un 13,182% en el esfuerzo. La carga soportada en proporción (A/C) al 50% presenta un incremento de 4,471% en carga y en el esfuerzo un incremento del 7.118%. En este caso nuestra dosificación cumple que a mayor tiempo de curación incrementa la resistencia del mortero.

### Ensayo a 28 días de curación

#### Dosificación (1:1)

**TABLA 3.3.5** Ensayos de compresión simple - Dosificación (1:1), a 28 días de curación.

Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
X1	28	(1:1)	257,925	7,000	271,298	283,639	7,362	7,738
X2		(1:1)	281,872	7,738				
X3		(1:1)	262,627	7,283				
X4		(1:1)	283,639	7,591				
X5		(1:1)	270,428	7,200				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	F'c (kg/cm2)	Carga (Q) (ton)	F'c (kg/cm2)	F'c máx. (kg/cm2)	Q' (ton)	Q máx. (ton)
Z1	28	(1:1)	248,101	6,670	279,015	296,986	7,437	7,877
Z2		(1:1)	283,791	7,512				
Z3		(1:1)	291,726	7,877				
Z4		(1:1)	296,986	7,836				
Z5		(1:1)	274,471	7,289				



**FIGURA 32.** Grafico **A** valores de (Esfuerzo (F'c) vs Tiempo (Días)) y Grafico **B** valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1:1), a 28 días de curación.

Los resultados obtenidos a los 28 días de curación presentan un aumento respecto a los valores de resistencia a la compresión simple y carga soportada en comparación a los ensayos realizados a 7 y 14 días respectivamente. Como se puede apreciar que los valores más altos de (F'c y Q) corresponden a las briquetas Z4 Y Z3 las cuales tienen relación (A/C) de 50%. En términos generales se puede observar que las briquetas con relación (A/C) al 40% presentan valores de (F'c) con un incremento del 5, 97% respecto a las briquetas ensayadas a 14 días y una reducción del 1.32% respecto a las briquetas de 7 días. Los valores de carga también presentan un incremento del 6,69% respecto a las briquetas de 14 días y del 0,05% respecto las briquetas de 7 días, vale recalcar que la briqueta D1 no fue considerada por su valor anómalo de carga y esfuerzo.

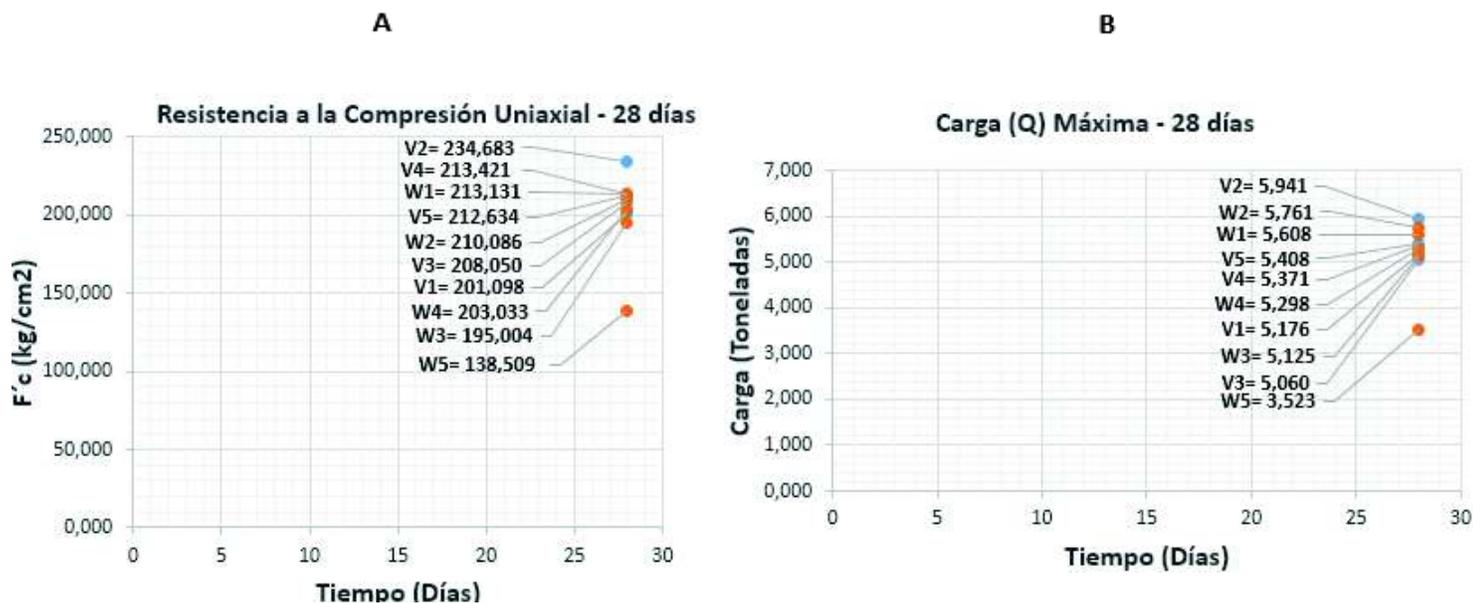
Las briquetas con relación (A/C) al 50% presentan un incremento en los valores de esfuerzo ( $F'c$ ) del 19% respecto a las briquetas de 14 días y un incremento del 22% respecto a las briquetas de 7 días. Los valores de carga presentan un incremento del 17,81% respecto a las briquetas de 14 días y un incremento del 22.46% respecto a las briquetas de 7 días. Vale recalcar que para los ensayos de 14 días la briqueta N3 no fue considerada debido a que se encontraba fisurada desde su fabricación.

Por lo tanto se puede determinar que el comportamiento del relave con el cemento presenta una tendencia similar a los morteros comunes para la dosificación (1:1) al 50% de (A/C). Al 40% de (A/C), se alcanza la máxima resistencia a los 28 días sin embargo a los 14 días sufre una reducción considerable, lo cual no coincide con la teoría usada habitualmente, podría tratarse de una reacción que presenten los sulfuros con el cemento, o quizá una falla de fabricación por lo cual es recomendable realizar mayor cantidad de ensayos a 14 días.

### Dosificación (1.4:1)

**TABLA 3.3.6** Ensayos de compresión simple - Dosificación (1.4:1), a 28 días de curación.

Relación (A/C): 40%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	$F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (Q) (ton)	$F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F'c$ máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	$Q'$ (ton)	Q máx. (ton)
V1	28	(1.4:1)	201,098	5,176	213,977	234,683	5,391	5,941
V2		(1.4:1)	234,683	5,941				
V3		(1.4:1)	208,050	5,060				
V4		(1.4:1)	213,421	5,371				
V5		(1.4:1)	212,634	5,408				
Relación (A/C): 50%								
Muestra	Tiempo (d)	Relación	$F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga (Q) (ton)	$F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F'c$ máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	$Q'$ (ton)	Q máx. (ton)
W1	28	(1.4:1)	213,131	5,608	205,314	213,131	5,448	5,761
W2		(1.4:1)	210,086	5,761				
W3		(1.4:1)	195,004	5,125				
W4		(1.4:1)	203,033	5,298				
W5		(1.4:1)	138,509	3,523				



**FIGURA 33.** Gráfico **A** valores de (Esfuerzo (F'c) vs Tiempo (Días)) y Gráfico **B** valores de (Carga (Q) vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1.4:1), a 28 días de curación.

Como se puede observar en esta dosificación los valores de carga y de esfuerzo presentan valores muy cercanos entre sí, independientemente de la cantidad de agua de cada dosificación. Comparativamente podemos determinar que la dosificación que posee 40% de agua en relación (A/C) presenta una disminución de (F'c) del 20,35% respecto a las briquetas de 14 días, y del 8,26% respecto a las briquetas de 7 días. Los valores de carga también presentan una reducción del 25,61% respecto a las briquetas de 14 días y del 10,83% respecto a las briquetas de 7 días.

La dosificación con 50% de agua en relación (A/C) presenta un comportamiento similar, en valores de (F'c) presenta una reducción del 5,10% respecto a las briquetas de 14 días y un aumento del 2,13% respecto a las briquetas de 7 días. Los valores de carga presentan una reducción del 3,68% respecto a briquetas de

14 días y un incremento del 0,81% respecto a las briquetas de 7 días. Vale recalcar que la muestra W5 no fue tomada en consideración para este análisis por presentar un fisura y por sus valores anómalos de resistencia y carga.

Se determina que en ambos casos nuestro mortero alcanza un punto máximo de resistencia a los 14 días, la reducción de la misma a los 28 días podría interpretarse como una reacción entre el relave, como se determinó en el ensayo de Difracción de Rayos X, nuestro relave contiene un 6% en masa de sulfuros, por lo cual al reaccionar con el agua generan lixiviación pudiendo esto no permitir al cemento alcanzar su grado máximo de resistencia, además de que en esta dosificación la cantidad de relave es mayor a la de cemento.

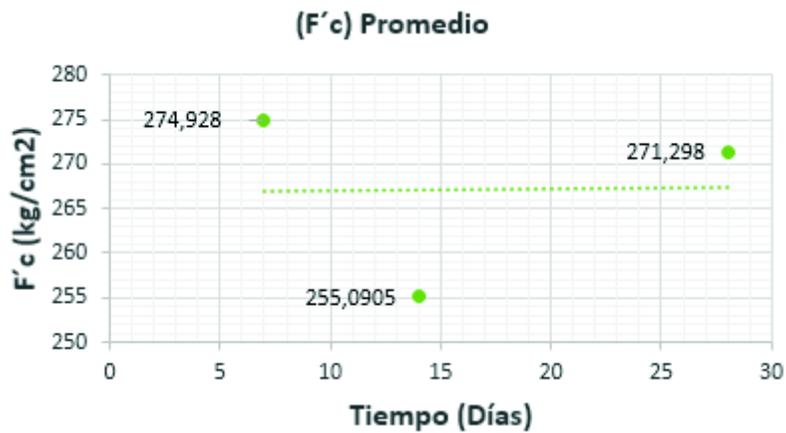
### **Análisis comparativo de Resultados a 7, 14, 28 días**

Con el objetivo de realizar una comparación del comportamiento del mortero de relave en los intervalos de tiempo antes indicados, se realizó un análisis con la carga (Q) promedio y el esfuerzo (F'c) promedio de cada grupo de briquetas de diferente dosificación.

### **Dosificación (1:1) con relación (A/C) al 40%.**

**TABLA 3.3.7** Esfuerzo (F'c) promedio de Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 40%.

<b>(F'c) Promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1:1)</b>	274,928	255,0905	271,298
<b>Relación (A/C) = 40 %</b>			



**FIGURA 34.** Valores de (F'c) promedio - Dosificación (1:1). – Relación (A/C): 40%

Una vez transcurridos los tres intervalos de tiempo para la presente dosificación podemos observar que a diferencia de la teoría tradicional, esta dosificación presenta valores semejantes de (F'c) tanto a los 7 y 28 días de curación con una disminución de 3,63 (kg/cm2) lo cual representa un valor despreciable del 1,32% de reducción de (F'c).

Sin embargo la variación a los 14 días no cumple con la teoría donde se espera que a medida que pasa el tiempo de curación el mortero obtiene mayor resistencia, respecto a los 7 días presenta una reducción del 7,22% y respecto a los 28 días una reducción del 5,98%, la línea de color verde de nuestro gráfico marca la tendencia del comportamiento en esfuerzo (F'c) para nuestra dosificación, obteniendo los valores más altos a 7 y 28 días, la anomalía a los 14 días se podría interpretar como una reacción del relave con el cemento y el contenido de agua.

**TABLA 3.3.8** Carga (Q) promedio de Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 40%.

(Q) Promedio (ton)			
Dosificación	Tiempo (Días)		
	7	14	28
(1:1)	7,358	6,869	7,362
Relación (A/C) = 40 %			



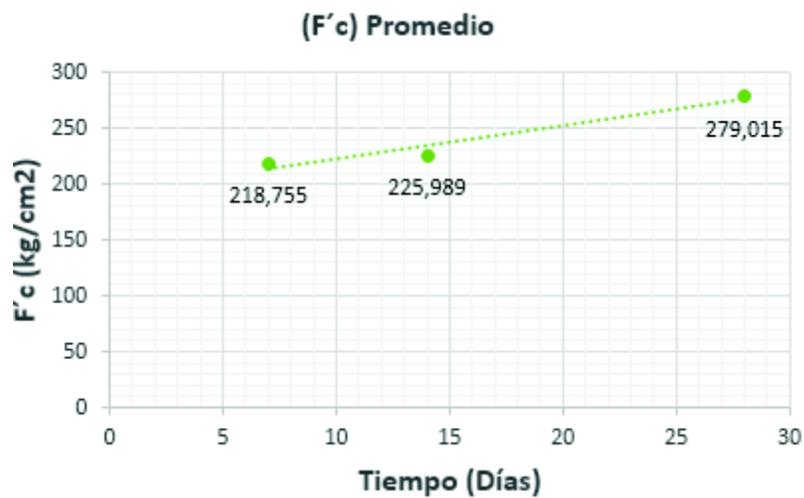
**FIGURA 35.** Valores de (Carga (Q) promedio vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 40%

Al igual que los resultados obtenidos con los valores ( $F'c$ ), la línea verde representa la tendencia de comportamiento de la cantidad de carga soportada por el mortero con un aumento del valor de carga a los 28 días respecto a los obtenidos a los 7 días, el cual es mínimo 0,054%, por lo tanto ambos parámetros ( $F'c$  y Q) se relacionan de manera directa, es decir, a mayor carga mayor esfuerzo por centímetro cuadrado. De la misma manera los valores a los 14 días presentan una disminución de 6,67%. Por lo tanto la línea verde muestra el incremento de los valores de carga excepto para los valores obtenidos a los 14 días de curación. Esta anomalía puede ser interpretada como errores de fabricación o por la reacción del relave – agua – cemento. Tomar en consideración que la briqueta D1 no fue tomada en cuenta por su valor anómalo.

**Dosificación (1:1) con relación (A/C) al 50%.**

**TABLA 3.3.9** Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio. Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 50%.

<b>(<math>F'c</math>) Promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1:1)</b>	218,755	225,989	279,015
<b>Relación (A/C) = 50 %</b>			

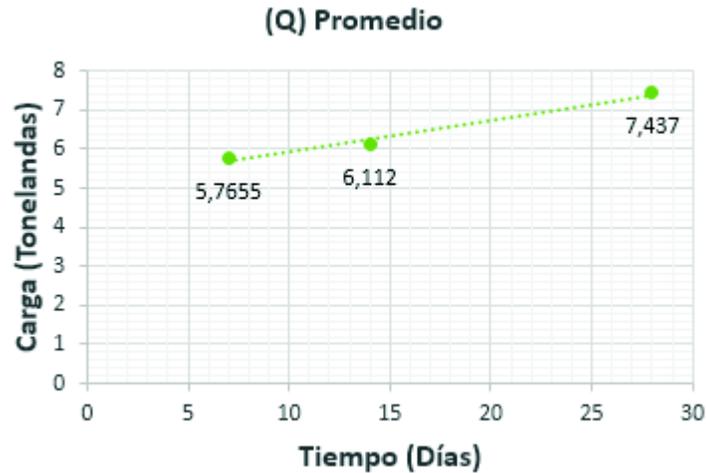


**FIGURA 36.** Valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio vs Tiempo (Días)) -Dosificación (1:1), Relación (A/C): 50%

La presente dosificación cumple con la norma utilizada con materiales habitualmente usados en la construcción como se puede observar, la cantidad de esfuerzo aumenta linealmente a medida que aumente el tiempo de curación, respecto al valor inicial de 7 días, los valores de ( $F'c$ ) incrementaron en 3,20% a los 14 días y respecto a los 28 días incremento en un 21,60%. Por lo tanto la presente dosificación tiene un comportamiento de tendencial lineal creciente.

**TABLA 3.3.10** Carga (Q) promedio. Dosificación (1:1) – Relación (A/C): 50%.

<b>(Q) Promedio (ton)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1:1)</b>	5,7655	6,112	7,437
<b>Relación (A/C) = 50 %</b>			



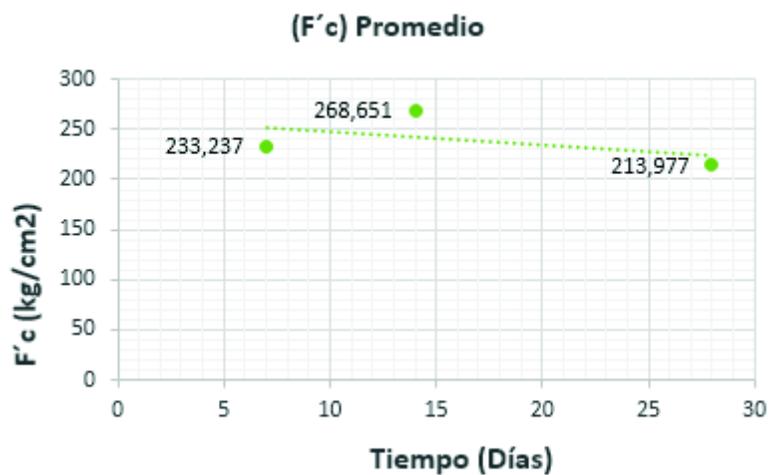
**FIGURA 37.** Valores de (Carga (Q) promedio vs Tiempo (Días)) - Dosificación (1:1), Relación (A/C): 50%.

De la misma manera los valores de carga incrementan de manera lineal con el tiempo de curación. Respecto a los 7 días presentan un incremento de 5,67% a los 14 días de curación, y un incremento de 22,47% a los 28 días de curación. Por lo tanto podría interpretarse que esta dosificación sería la ideal donde el relave se comporta como materiales comunes, probablemente la cantidad de agua es la ideal sin producir anomalías como la dosificación anterior. La briqueta N3 no fue considerada por presentar una fisura de fábrica.

**Dosificación (1.4:1) con relación (A/C) al 40%.**

**TABLA 3.3.11** Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio. Dosificación (1.4:1) – Relación (A/C): 40%.

<b>(<math>F'c</math>) Promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1.4:1)</b>	233,237	268,651	213,977
<b>Relación (A/C) = 40 %</b>			

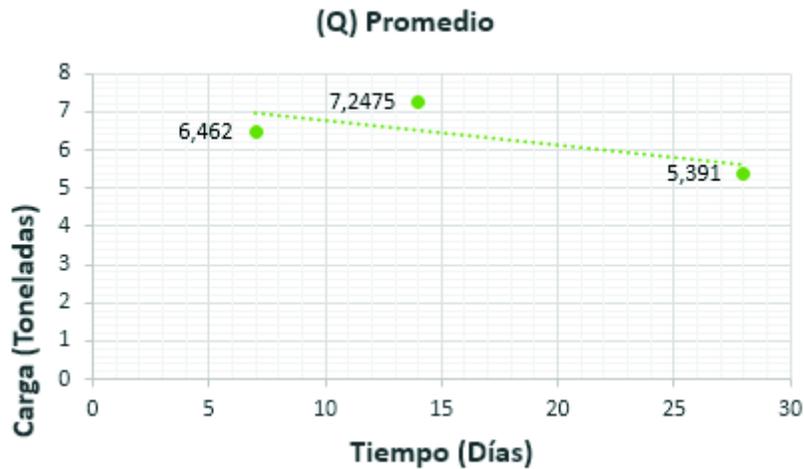


**FIGURA 38.** Valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio vs Tiempo (Días)) Dosificación (1.4:1), Relación (A/C): 40%.

La presente dosificación presenta valores anómalos, como se observa el punto máximo de resistencia se alcanza a los 14 días de curación. Respecto a los 7 días hay un incremento del valor de ( $F'c$ ) de 13.18% a los 14 días de curación. Sin embargo existe una disminución a los 28 días de 8.26%, por lo cual la línea verde, marca una tendencia decreciente a los 28 días de curación. Al tener mayor cantidad de relave que de cemento es primordial realizar un estudio de cómo interactúan los componentes del relave, particularmente los sulfuros, y su reacción con la cantidad de agua y cemento.

**TABLA 3.3.12** Carga (Q) promedio. Dosificación (1.4:1) – Relación (A/C): 40%.

<b>(Q) Promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1.4:1)</b>	6,462	7,2475	5,391
<b>Relación (A/C) = 40 %</b>			



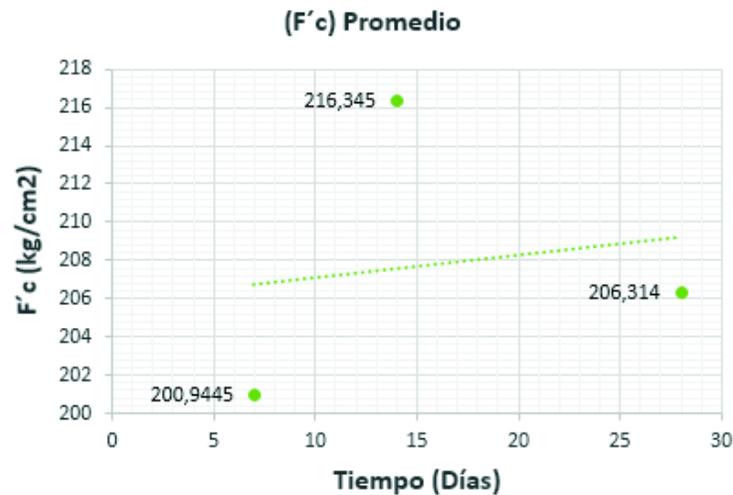
**FIGURA 39.** Valores de Carga (Q) promedio. Dosificación (1.4:1) – Relación (A/C): 40%

Para los valores de carga (Q), al igual que los valores de (F´c), la línea verde de tendencia muestra que los valores obtenidos para esta dosificación tienden a decrecer a partir de los 14 días, respecto a los 7 días de curado el valor de carga incremento en un 10,84% a los 14 días, sin embargo disminuye a los 28 días en 16,57% correlacionándose con la tendencia de los valores de (F´c).

**Dosificación (1.4:1) con relación (A/C) al 50%.**

**TABLA 3.3.13** Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio. Dosificación (1.4:1) – Relación (A/C): 50%.

<b>(<math>F'c</math>) Promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1.4:1)</b>	200,9445	216,345	206,314
<b>Relación (A/C) = 50 %</b>			

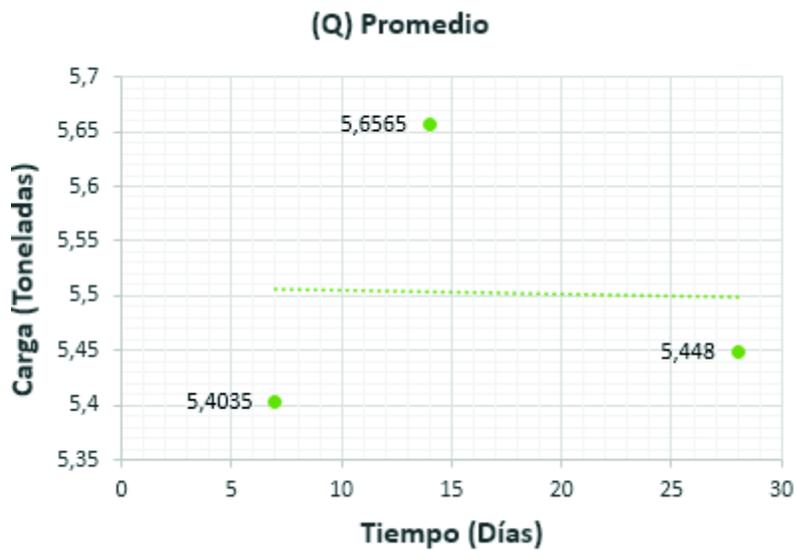


**FIGURA 40.** Valores de (Esfuerzo ( $F'c$ ) promedio vs Tiempo (Días)) Dosificación (1.4:1), Relación (A/C): 50%.

La presente dosificación presenta una línea de tendencia creciente similar a la dosificación (1.4:1) con relación de (A/C) al 50%, sin embargo presenta una anomalía ya que alcanza su punto de máxima resistencia a la compresión simple a los 14 días de curación. A diferencia de la dosificación anterior respecto a los 7 días de curación a los 14 y 28 días presentan incrementos para ( $F'c$ ) de 7,11% y de 2,60% respectivamente.

**TABLA 3.3.14** Carga (Q) promedio. Dosificación (1.4:1) – Relación (A/C): 50%.

<b>(Q) Promedio (ton)</b>			
<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>(1.4:1)</b>	5,403	5,6565	5,448
<b>Relación (A/C) = 50 %</b>			



**FIGURA 41.** Valores de (Carga (Q) promedio vs Tiempo (Días)) -Dosificación (1.4:1), Relación (A/C): 50%.

Los valores de carga se correlacionan con la línea de tendencia anterior de (F´c) alcanzando su punto máximo a los 14 de días de curación. Respecto a los 7 días de curación tanto a los 14 y 28 días existen incrementos en los valores de carga de 4,48% y 0,82% respectivamente.

Por lo cual la línea verde de tendencia para esta dosificación refleja un comportamiento del mortero que tiende a crecer su valores de esfuerzo respecto a los 7 días, entre los 14 y 28 días la reducción de estos valores podría explicarse como el tiempo al que los sulfuros reaccionan con el agua y el cemento, generando una reducción mínima en la cantidad de carga soportada de 0,21

toneladas, es decir, 3,68%. La anomalía de 14 días presente en ambas dosificaciones de (1.4:1) se relaciona con las propiedades del relave y la interacción de sus componentes con el contenido de agua y el cemento. Para este análisis la briqueta W5 no fue considerada por presentar una fisura de fábrica.

### Ensayos Uniaxiales en Cilindros.

Para la determinación del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, se elaboraron cilindros de la misma dosificación (1:1) y (1.4:1) con relación de (A/C) de (40 y 50) % respectivamente. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**TABLA 3.3.15** Ensayos de Compresión Uniaxial, Dosificación (1:1) y (1.4:1) al (40 y 50) % de relación (A/C). **Tomado de:** (LEMSUR, 2018)

MUESTRA	DOSIFICACIÓN	EDAD	DIAMETRO (mm)	AREA TRANSV. (mm <sup>2</sup> )	PESO ESP. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA		RESISTENCIA	
						(kN)	(ton)	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )
Y1	(1:1) - 50%	33 Días	101,00	8012	2060	124,2	12,7	15,5	158
Y2	(1:1) - 40%		101,50	8091	2060	257,1	26,2	31,8	324
Y3	(1.4:1) - 50%		103,00	8332	2020	188,6	19,2	22,6	231
Y4	(1.4:1) - 40%		103,00	8332	2030	150	15,3	18	184

Los ensayos de compresión uniaxial en cilindros se los realizo con el objetivo principal de obtener los coeficientes de Poissón y módulos de Young para cada dosificación, adicionalmente se determinó la carga (Q) y la resistencia a la compresión uniaxial (F'c), donde los mejores valores se los obtuvo del cilindro Y2 y Y3. El cilindro Y1 y Y4 presento pequeñas fisuras de fábrica lo cual explicaría su baja resistencia.

Podemos observar que al igual que los ensayos realizados en las briquetas, para la dosificación (1:1) al 40% de (A/C) se obtienen los valores más altos de (Q y F'c) corroborando los datos ensayados en briquetas. En la dosificación (1.4:1) los resultados han sido variables en cuanto a los resultados de carga y esfuerzo

obtenidos de los ensayos de las briquetas, sin ser muy considerable la diferencia de sus valores, además los valores más altos para esta dosificación fueron obtenidos a los 14 días por lo cual sería importante realizar el ensayo en cilindros a este tiempo.

### 3.4 Módulos de Young y coeficientes de Poisson

Para la determinación de ambos parámetros se ensayó 4 cilindros de cada dosificación con su respectiva relación de (A/C), los cilindros utilizados fueron curados por 28 días como indica la norma. Para determinar los módulos de Young y coeficientes de Poisson se utilizaron 8 sensores “**STRAIN GAGE**” 2 por cada cilindro, estos fueron colocados en sentido transversal y longitudinal para medir la deformación que sufría nuestro mortero de relave, se realizó ensayos de compresión simple en tres series. La primera serie se la realizó con intervalos de carga de 500 (kg) hasta los 5000(kg), la segunda de 1000 (kg) hasta llegar a los 10000(kg), y la tercera serie de 2000(kg) hasta llegar a la rotura. Cabe destacar que para nuestras 4 muestras el tipo de falla en rotura fue de tipo 2 para cada una. Los diferentes valores de deformación fueron registrados en el “**PUENTE DE WINSTON**”.

Los valores obtenidos fueron los siguientes:

**TABLA 3.4.1** Módulos de Young y Coeficientes de Poisson del Mortero de Relave.  
Tomado de: (LEMSUR, 2018).

Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Peso (N)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Max (kg)	Resistencia Uniaxial (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Young (Kg/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson (Kg/cm <sup>2</sup> )
Y1	9,95	19,98	1553,83	3380,1	77,76	12661,00	162,83	124258	0.28
Y2	10,15	20,02	1619,62	3329,6	80,91	26215,00	323,99	200957	0,24
Y3	10,1	20,03	1605,04	3369,1	80,12	19229,00	240,01	184911	0,28
Y4	10,08	19,98	1593,12	3389,1	79,72	15300,00	191,92	145012	0,32

Generalmente en ingeniería los materiales utilizados presentan valores de coeficiente de Poisson entre (0 y 0,5), para un material isótropo, perfectamente incompresible y elástico su valor es de 0,5; cómo podemos observar los valores de nuestro mortero presenta coeficientes similares al granito (0,26) o de aleaciones de aluminio (0,33) o de broce (0,31), es decir, a mayor valor de Coeficiente de Poisson nuestro material es más incompresible. En el caso de nuestro relave al ser un material heterogéneo por su composición mineralógica variable, podría interpretarse que sus valores de coeficiente están sobre los valores de algunos tipos de roca como microgranitos o basaltos (0,25), pudiendo atribuir esto al alto contenido de caolinita (arcilla – (0,30-0,45)), al alto contenido de cuarzo (0,26) principalmente. (A. Canoba y R. Fraga, 2004).

Los módulos de Young obtenidos oscilan entre valores de 124000 – 200000 (kg/cm<sup>2</sup>), mismos que corresponden a módulos de granitos, cuarcitas, calizas, entre otro tipo de roca.

De los ensayos Uniaxiales realizados en cada cilindro se obtuvieron un conjunto de resultados los cuales fueron tratados y corregidos para determinar el valor promedio de los módulos de Young y coeficientes de Poisson, los mismos que se muestran a detalle con su respectivo grafico en la sección de ANEXOS.

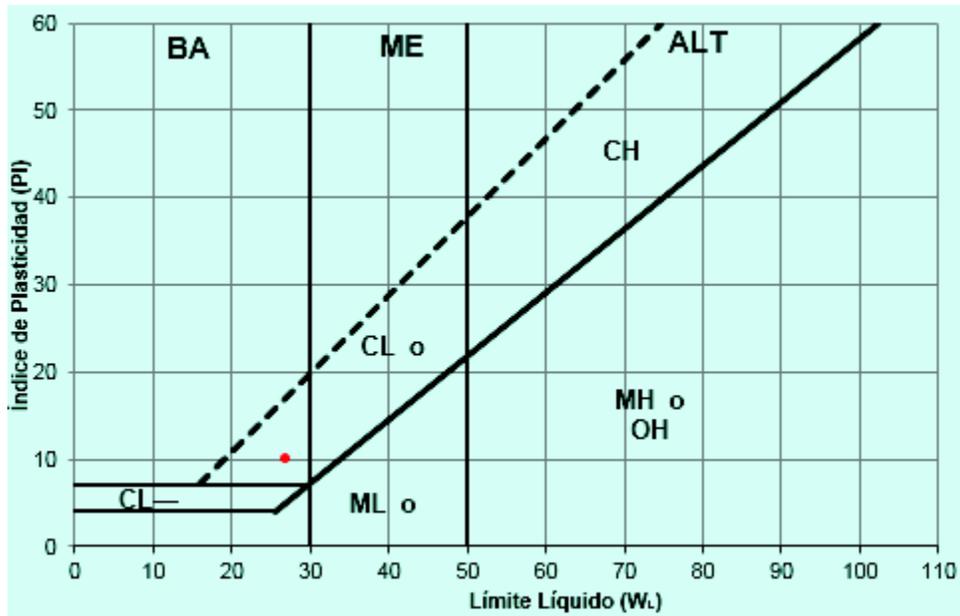
### **3.5 Limites de Atterberg**

El objetivo de este análisis fue determinar el comportamiento plástico del relave como material de grano fino, para el mismo se realizaron ensayos de límite líquido, límite plástico, contenido de humedad y análisis granulométrico ya descrito en la sección 3.2 Granulometría. Obteniendo los siguientes resultados:

**TABLA 3.5.1** Límites de Atterberg y Clasificación SUCS.

Tomado de: (LEMSUR, 2018).

<b>LIMITE LIQUIDO</b>					
<b>NORMA: ASTM 4318 - 10</b>					
<b>Capsula</b>	<b>N° Golpes</b>	<b>Peso Húmedo (gr)</b>	<b>Peso Seco (gr)</b>	<b>Peso Cápsula (gr)</b>	<b>% Humedad</b>
<b>S47</b>	15	18,54	16,56	9,66	28,77
<b>S48</b>	22	18,72	16,90	10,06	26,76
<b>S76</b>	34	16,66	15,19	9,54	25,87
<b>LIMITE PLÁSTICO</b>					
<b>NORMA: ASTM 4318 - 10</b>					
<b>Capsula</b>	<b>Prueba N°</b>	<b>Peso Húmedo (gr)</b>	<b>Peso Seco (gr)</b>	<b>Peso Cápsula (gr)</b>	<b>% Humedad</b>
<b>S136</b>	1	7,19	6,94	5,41	16,41
<b>S9</b>	2	7,02	6,73	5,11	17,33
<b>CONTENIDO DE HÚMEDAD</b>					
<b>NORMA: INEN 690 ASTM D 2216 - 10</b>					
<b>Capsula</b>	<b>Prueba N°</b>	<b>Peso Húmedo (gr)</b>	<b>Peso Seco (gr)</b>	<b>Peso Cápsula (gr)</b>	<b>Humedad Natural (%)</b>
<b>N23</b>	1	59,8	59,22	9,78	1,16
<b>R13</b>	2	59,99	59,46	9,98	1,08
<b>RESUMEN DE RESULTADOS</b>					
<b>Agua (%)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>CLASIFICACIÓN SUCS</b>	
1	27	17	10	<b>CL</b>	



**FIGURA 42.** Clasificación SUCS del Relave.

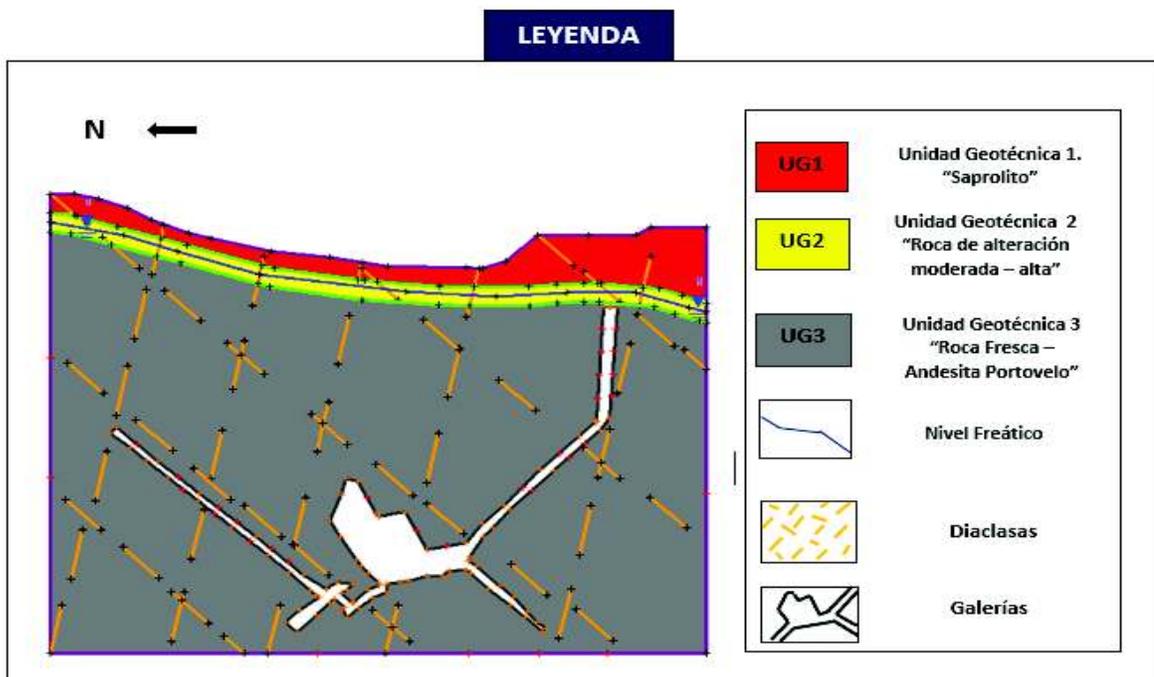
Una vez obtenido los límites de Atterberg se determinó el índice de plasticidad y el límite líquido y el contenido de agua (1%) del relave, los datos obtenidos clasifican a nuestra materia prima como “CL”, es decir, clasifica al relave como una arcilla de baja plasticidad.

Debido al contenido muy bajo de humedad se podría explicar porque en las dosificaciones con mayor cantidad de relave (1.4:1) al (40 y 50) % de relación (A/C) necesita menos tiempo para drenar el agua en los espacios vacíos del mortero, por lo tanto alcanza su resistencia máxima a los 14 días de curación, al contrario de lo que sucede en la dosificación (1:1) al 40% de (A/C) donde el mortero reduce su resistencia a este tiempo (14 días), de esta manera, la reducción de su resistencia a los 28 días se representa como una deformación plástica, es decir, un fracturamiento en el área de contacto de sus partículas sólidas, y la reacción entre los sulfuros del relave y el agua. Cabe destacar que el contenido de agua (A/C) influye en la resistencia y su comportamiento en el tiempo.

### 3.6 Modelamiento en el software “Phase 2”

El modelamiento ayuda a realizar una simulación de las condiciones geológicas en subsuelo, además de la ubicación y características de las galerías mineras potencialmente susceptibles a colapsos, en dónde se necesita un modelo topográfico representativo en 2D (dos dimensiones) de la zona de estudio que muestre la extensión horizontal y la profundidad, el mismo que se presenta en el CAPITULO 2. El modelo topográfico fue elaborado en Autodesk AutoCAD Civil 2013, mismo que contiene las capas con su respectivo espesor, las galerías mineras, y 2 familias de diaclasas o discontinuidades presentes en la zona de trabajo.

Inicialmente se elaboró el modelo definiendo dentro del programa 3 capas (EXTERNAL, MATERIAL, JOINTS y EXAVATION), esto con el objetivo de poder importar dentro del software PHASE 2 en formato DXF.



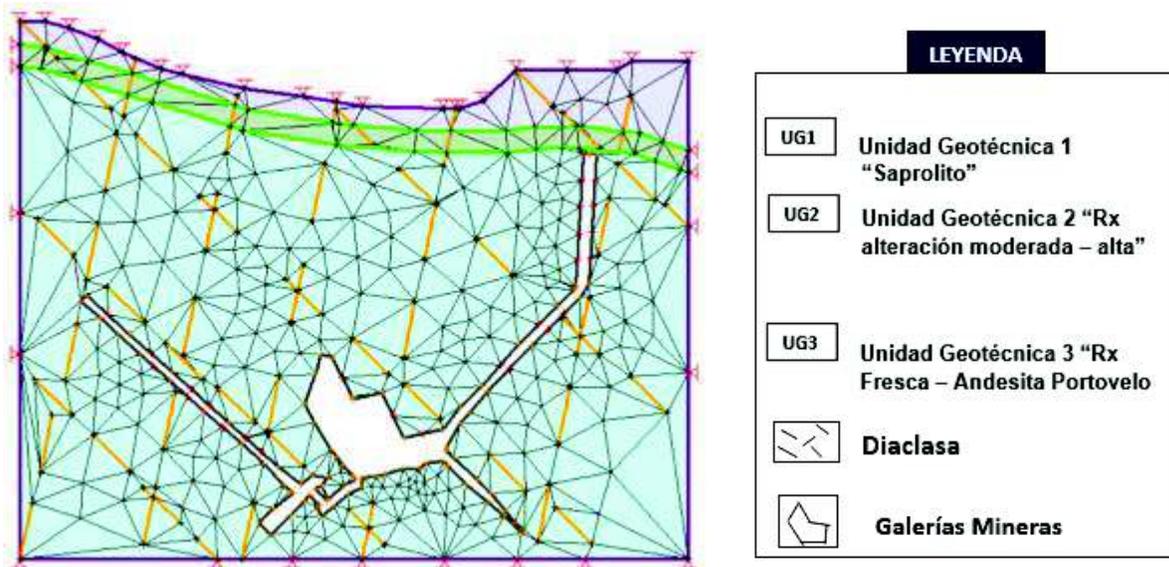
**FIGURA 43.** Modelo 2D de la zona de estudio con presencia de diaclasas.

El modelo final en AutoCAD civil 2013 queda representado con la presencia de dos juegos de diaclasas **D1** (N9°W/51°NE) Y **D2** (N44°E/82SE), adicionalmente se adjuntan datos correspondientes a parámetros de resistencia al corte como ángulo de fricción interno y cohesión, además de valores de peso específico y factor RU (que corresponde a la profundidad referencial del nivel freático) para las diferentes unidades geotécnicas especificadas en el mapa. (INIGEMM, 2017)

**TABLA 3.6.1** Datos Unidades geológicas de la Zona de Estudio. **Tomado de:** (INIGEMM, 2017).

Unidad Geotécnica	Ángulo de fricción ( $\phi$ )	Cohesión (Kpa)	Peso Específico $\gamma$ (KN /m3)	RU
<b>UG1</b>	5	20	26,5	0,2
<b>UG2</b>	29	180	26,5	0,3
<b>UG3</b>	40	200	26,5	0,3
<b>D1, D2</b>	22	160	-	-

Con estos datos posteriormente se importa al software los diferentes parámetros tanto de las capas como del mortero de relave, como se explicó anteriormente el objetivo de nuestro proyecto es evaluar las características geotécnicas del mortero para su potencial uso como relleno de las galerías elaboradas artesanalmente y expuestas en nuestro modelo.



**FIGURA 44.** Modelo de la zona de estudio en condiciones actuales de capas y galerías.

Una vez terminado el modelamiento en AutoCAD se procede a importar en formato DXF en el software Phase 2. Para dicho procedimiento es importante que el modelo sea importado por partes, es decir, especificando cada capa como material, diaclasa, límites, nivel freático, excavación principalmente.

Los parámetros utilizados para realizar el modelamiento son:

- Angulo de Fricción (°)
- Cohesión (Kpa)
- Peso Específico (KN/m<sup>3</sup>)
- Módulo de Young (Kg/cm<sup>2</sup>)
- Coeficiente de Poissón (Kg/cm<sup>2</sup>)
- Coeficiente Sísmico (Horizontal y Vertical)
- Criterio de Morh – Coulomb (Para macizos rocosos Isótopos)
- Tracción (MPa)

Para la determinación del coeficiente sísmico se utilizó la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) capítulo Peligro Sísmico – Diseño Sismo Resistente (Código NEC-SE-DS), donde se establece las fórmulas para determinar el coeficiente horizontal sísmico y el coeficiente vertical.

**Coeficiente Horizontal:**  $Sa: n*Z*Fa$  Donde:

**Ecuación 2**

**Z:** factor sísmico – Es un factor adimensional, se determinó en base a la zona de estudio y su localización con el mapa de zonas sísmicas, Ecuador. Para nuestro caso **Z=0,30**.

**n:** Razón entre la aceleración espectral  $Sa$  (T:0,1). Para nuestro caso de estudio se utilizó la relación **n: Sa/Z**; donde se tabulan valores dependiendo la región del país donde se trabaja, en nuestro caso de estudio **n: 1,80** al ubicarse en la Sierra Ecuatoriana.

**Fa:** Coeficiente de amplificación del Suelo en la zona de periodo corto, para este parámetro primero se clasifico las capas de nuestra zona de estudio como A, B, F4, donde cada una tiene tabulado este parámetro dependiendo del tipo de roca.

**Coeficiente Vertical:**  $Ev: (2/3 Sa)$

$Sa: n*Z*Fa$	
$Sa = (1,80)*(0,30)*(1)$	$Ev: 2/3*(Sa)$
<b><math>Sa= 0,54</math></b>	<b><math>Ev: 0,36</math></b>

**Ecuación 3**

Una vez obtenido el coeficiente horizontal y vertical de aceleración sísmica es necesario determinar los parámetros geomecánicos que caracterizan a las capas de nuestro modelo (UG1, UG2, UG3). Para dichos parámetros se utilizó el Software RocData. Inicialmente se utiliza la clasificación de Hoek y Brown donde se clasifica a cada capa dependiendo del tipo de roca, las condiciones de la roca, la carga, y en el caso de UG3 el diseño de la excavación. Con estos efectos se determina el ángulo de fricción interno y la cohesión de las capas de roca. Posteriormente se empleó el criterio de rotura de Morh – Coulomb, al considerarse como un macizo rocoso isótropo.

**TABLA 3.6.2** Parámetros de capas de roca – RocData.

Unidad	Clasificación de Hoek y- Brown				Morh - Coulomb		
	sigci (MPa)	GSI	mi	D	c (Mpa)	phi (°)	Em (MPa)
UG1 (Saprolito)	0,6	14	13	0,9	0,005	7,05	53,63
UG2 (And. Met.)	85	60	21	0,5	5,185	35,84	12296,19
UG3 (And. Portovelo)	175	68	25	0,1	14,395	43,3	26774,64

Para el modelamiento es necesario determinar el parámetro de tracción (MPa), el mismo se calculó mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$\sigma_{NA} = \gamma * h$ <p>[MPa]</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px;">Ecuación 4</div>	$\tau = c + (\sigma_{NA} * \text{tg}\phi)$ <p>[MPa]</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px;">Ecuación 5</div>
--	--

**TABLA 3.6.3** Valores de Tracción de morteros de relave.

Muestra	$\sigma_{NA}$ (Mpa)	$\bar{U}$ (Mpa)
Y1	0,0545	0,0398
Y2	0,0515	0,0387
Y3	0,0525	0,0391
Y4	0,0532	0,0393

Es preciso acotar que al haberse realizado solo ensayos de compresión simple y Uniaxiales los valores de ángulo de fricción y cohesión fueron tomados de bibliografía para suelos finos y arcillas de baja plasticidad (CL) promediando de 4 parámetros y trabajando con el valor promedio de estos tipos de suelos para nuestro mortero. **TABLA 3.6.4** Datos de Cohesión y Ángulo de fricción. **Tomado de:** (INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS EN SUELOS - IGNACIO MORILLA ABAD)

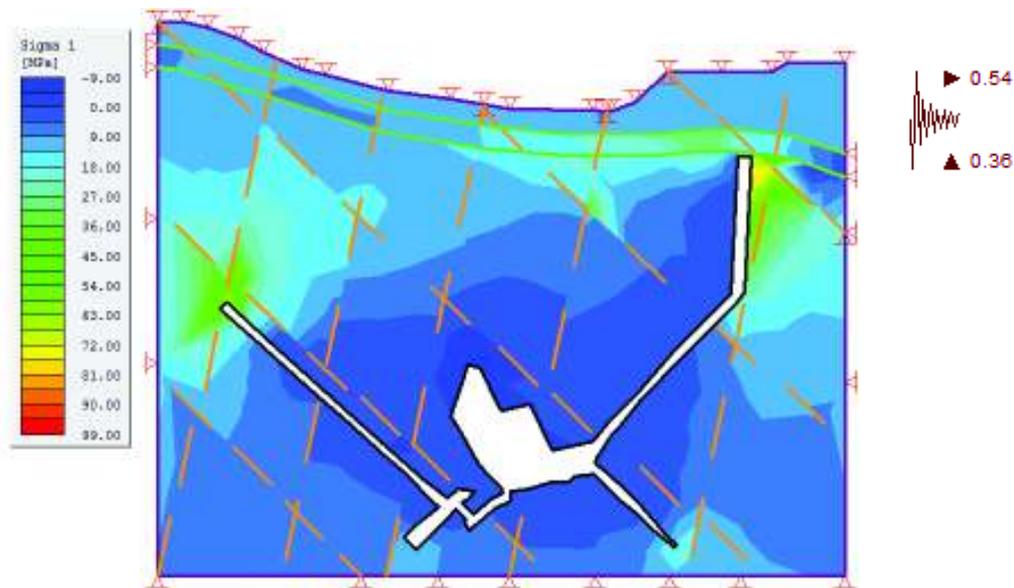
Muestra	Ángulo de Fricción ( $\phi$ )	Cohesión (MPa)	Bibliografía	Material
1	36	0,08	INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS EN SUELOS - IGNACIO MORILLA ABAD	Mat. fino
2	20	0,02		CL
3	25	0,05		
4	29	0,07		
Promedio	27,5	0,055		

**TABLA 3.6.5** Datos para modelamiento en software “PHASE 2”.

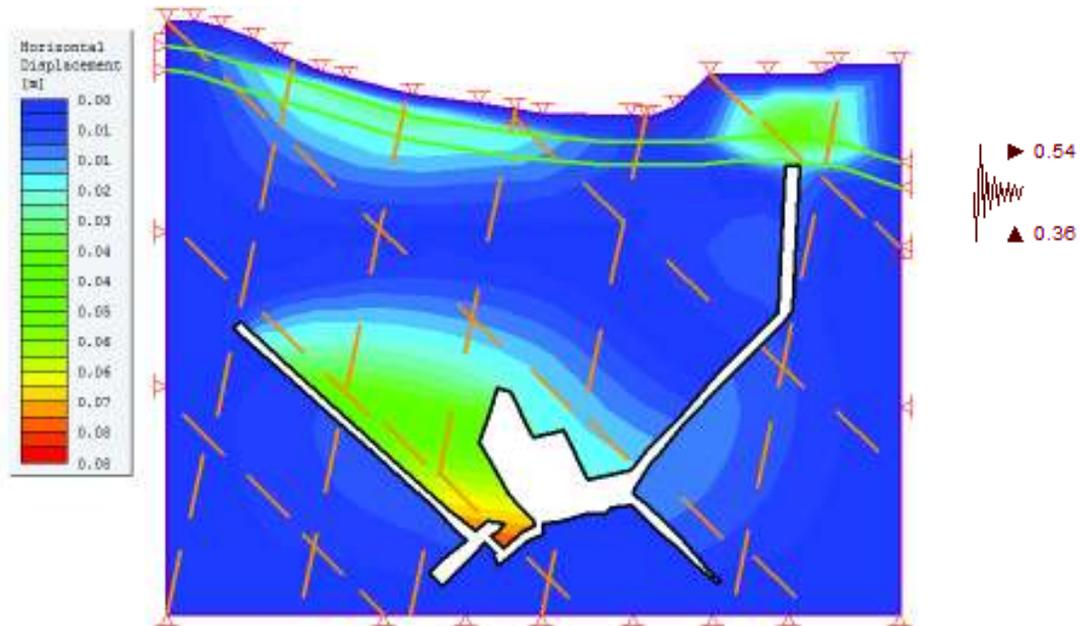
Parámetros de Resistencia							
Muestra	Dosificación	%(A/C)	Ángulo de Fricción ( $\phi$ )	Cohesión (MPa)	Peso Especifico $\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson (kg/cm <sup>2</sup> )
Y1	(1:1)	50	20	0,02	0,0218	121855.472	0.28
Y2	(1:1)	40	20	0,02	0,0206	197071.496	0,24
Y3	(1.4:1)	50	20	0,02	0,021	181335.746	0,28
Y4	(1.4:1)	40	20	0,02	0,0213	142208.193	0,32

Una vez obtenidos los datos antes mencionados se realizaron cinco modelamientos, que involucran acciones sísmicas (porcentaje de aceleración de la gravedad en sus componentes horizontal y vertical), dentro de los cuales el primero se lo desarrollo en condiciones actuales de galerías vacías y los otros cuatro modelos con el relleno de mortero de diferentes dosificaciones. Una vez determinados todos los parámetros necesarios se elabora los modelamientos respectivos.

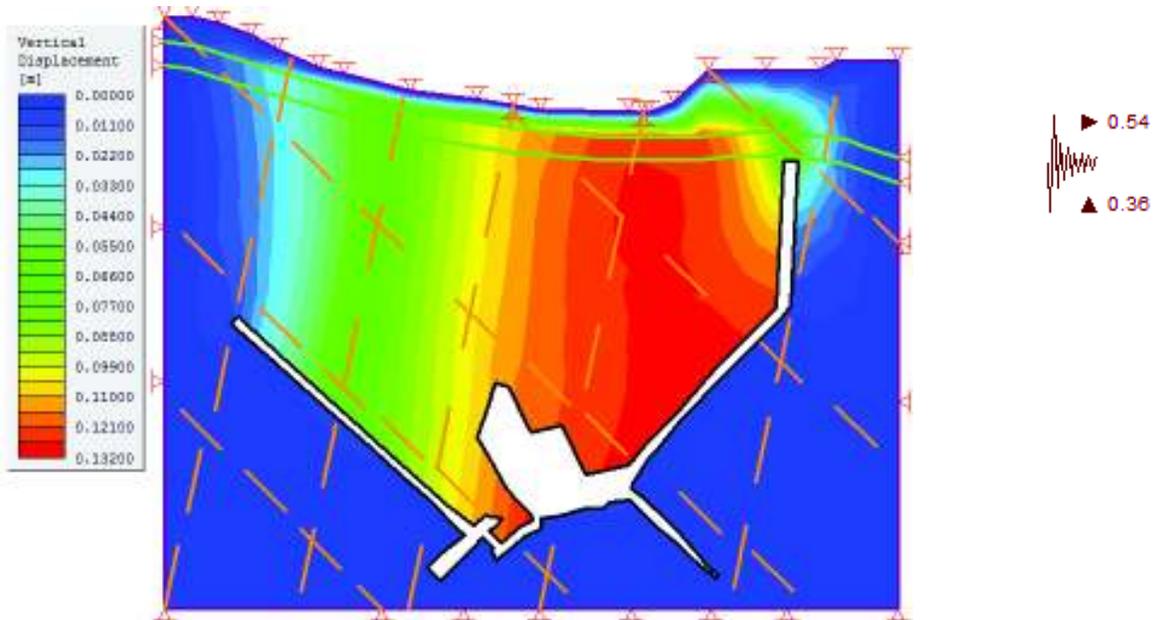
### Modelo con Galerías vacías (Estado actual)



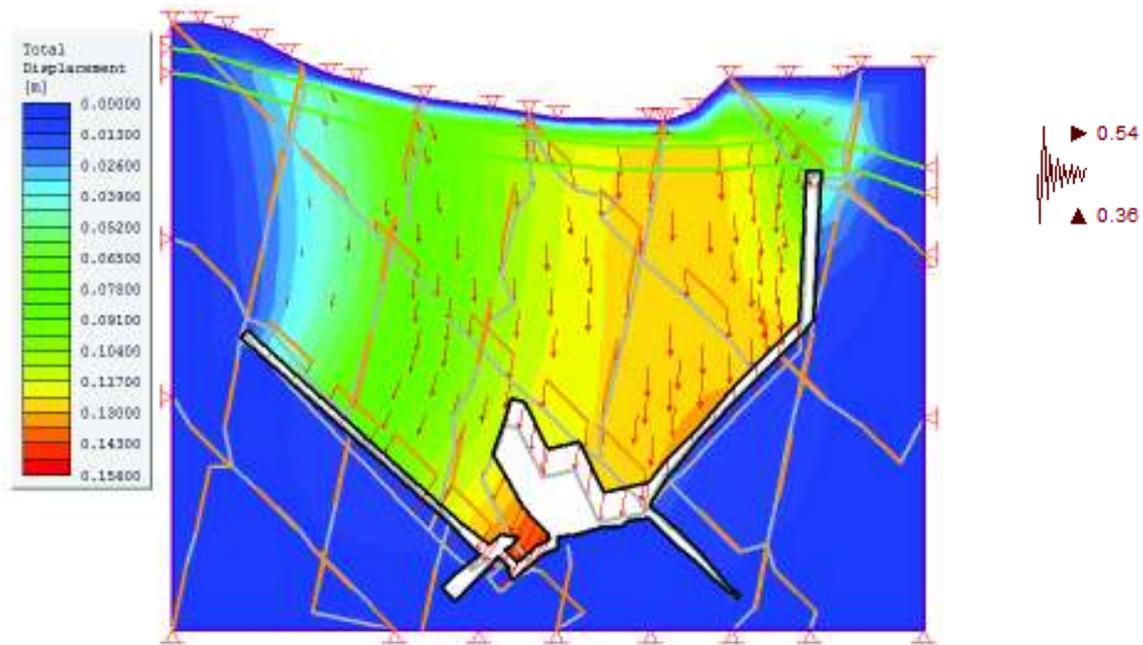
**FIGURA 45.** Modelamiento analizando el Esfuerzo Principal con Galerías Vacías (Estado Actual).



**FIGURA 46.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con Galerías Vacías (Estado Actual).



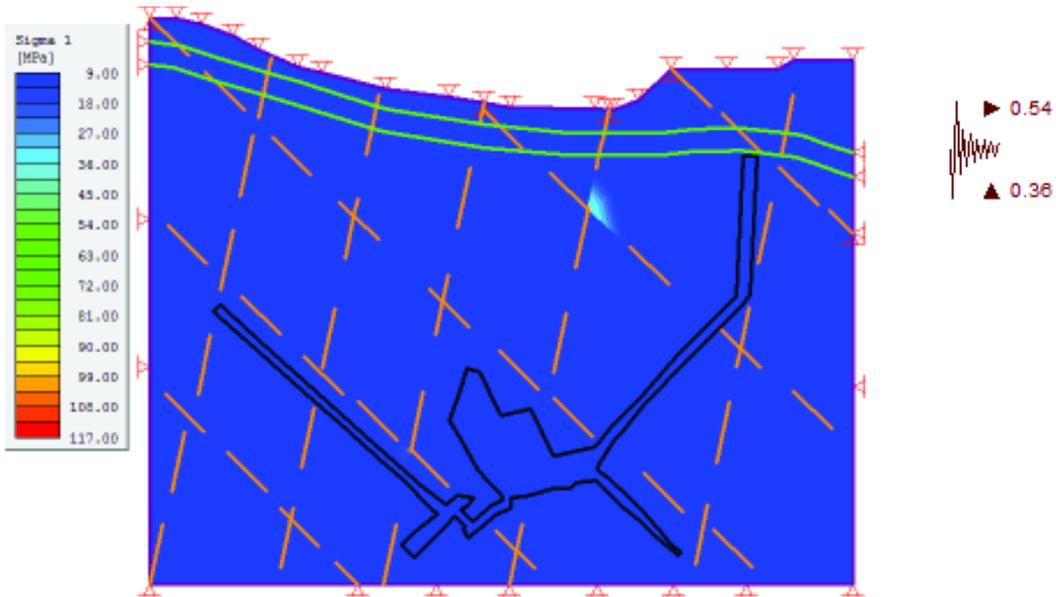
**FIGURA 47.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con Galerías Vacías (Estado Actual).



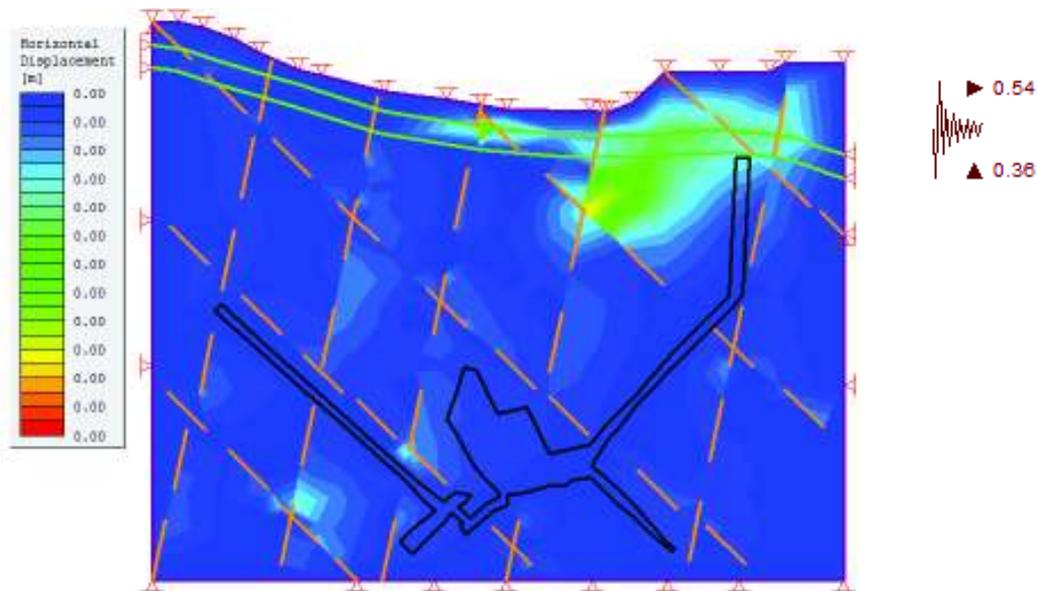
**FIGURA 48.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con Galerías Vacías (Estado Actual).

Como se puede observar, este modelo simula las condiciones actuales de las galerías mineras de la zona de estudio. Se ha determinado mediante el análisis del esfuerzo principal (MPa), así como el desplazamiento vertical y horizontal las principales zonas de afectación y potencial colapso en base a la presión litostática de las capas de roca superiores así como también de la sobrecarga de las edificaciones presentes en superficie. Como se puede evidenciar en el modelo de desplazamiento total en todas las galerías analizadas se concentra la mayor deformación, la línea gris dentro de las galerías representa como tiende a cerrarse o deformarse la roca, es decir, como potencialmente las galerías colapsarían por la carga que soportan causando daños en superficie.

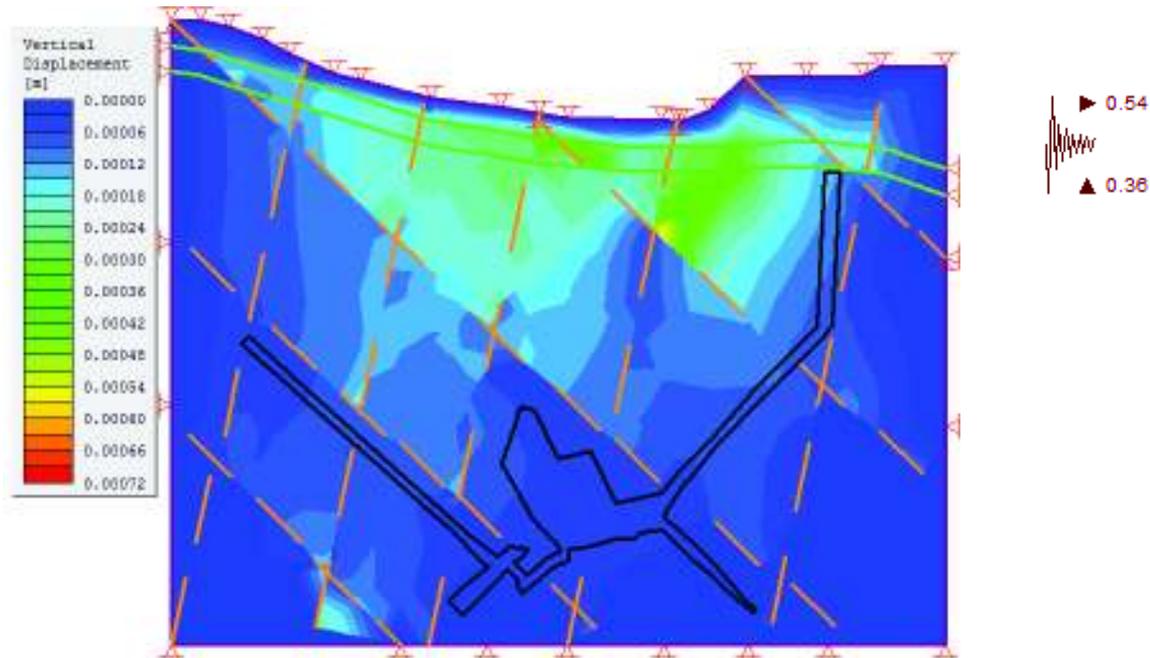
## Modelo con Mortero de Relave (Y1)



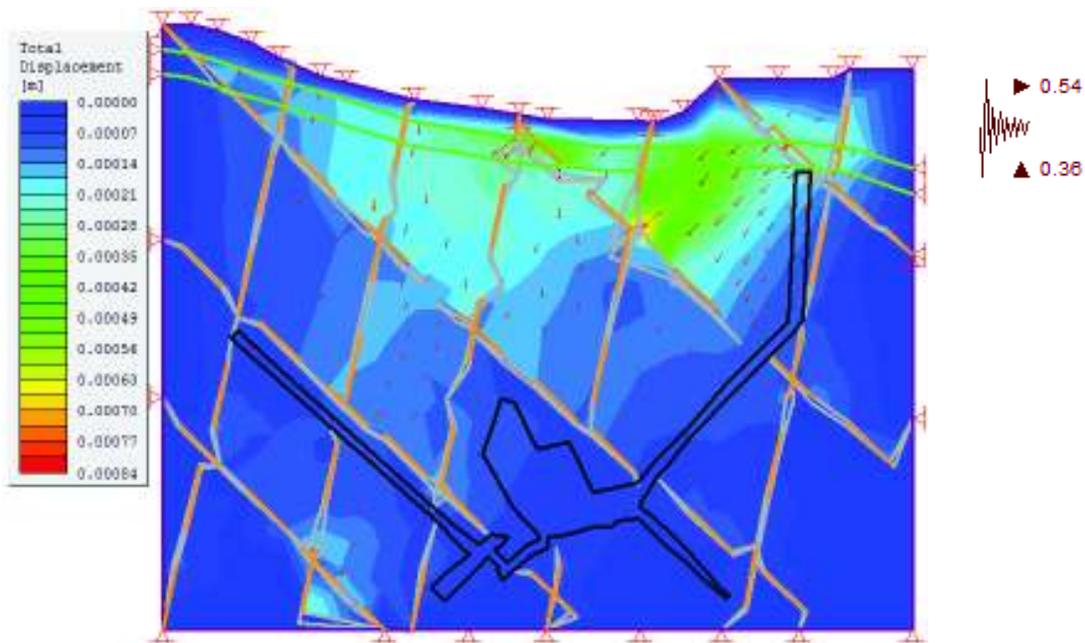
**FIGURA 49.** Modelamiento analizando el Esfuerzo principal con relleno de mortero (Y1) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.



**FIGURA 50.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de Mortero (Y1) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.



**FIGURA 51.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y1) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.

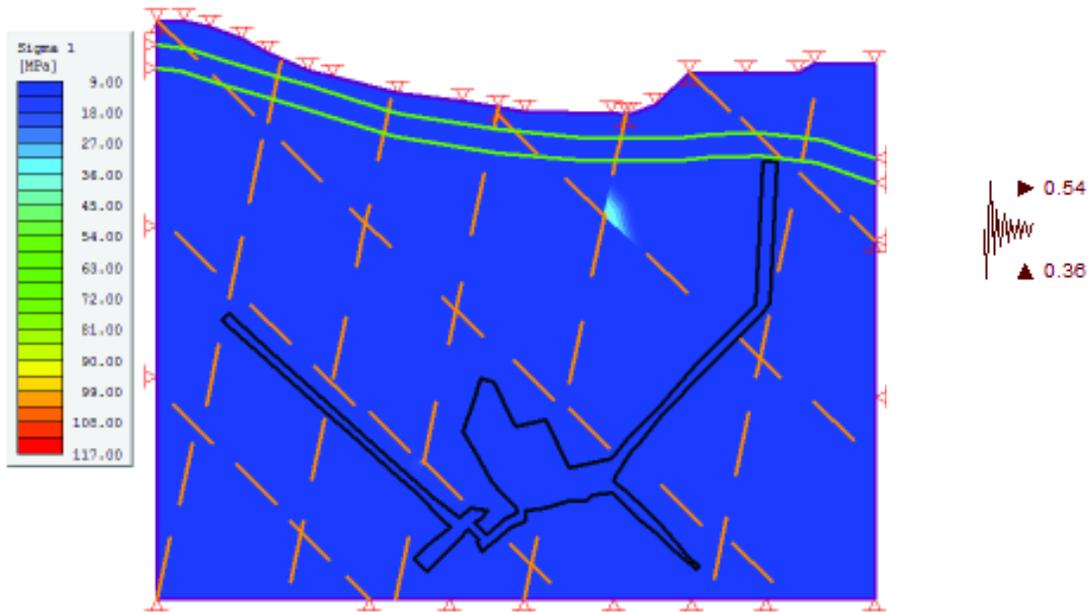


**FIGURA 52.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero Y1 – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 50%.

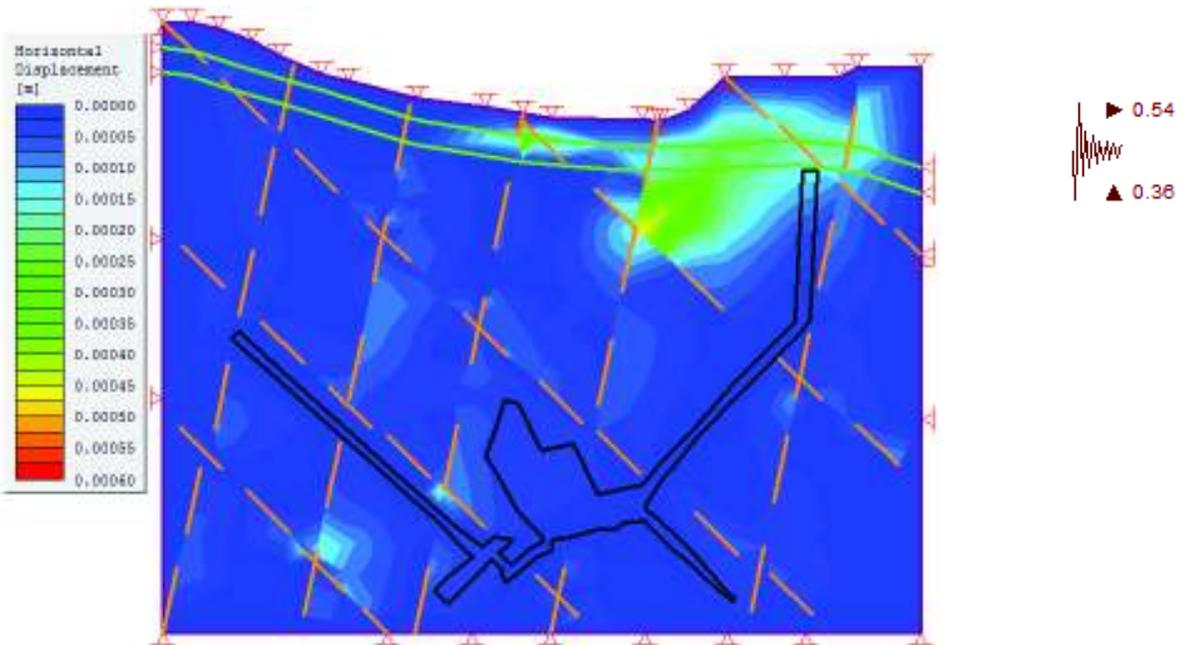
En este modelamiento se simula las condiciones de las galerías rellenas con el material de dosificación Y1, es decir, (1:1) con (A/C) al 50%. Evidentemente tanto los valores de deformación  $\sigma_1$  como el desplazamiento horizontal y vertical se reducen considerablemente. Los valores del esfuerzo principal en los peores casos se reduce de 63 MPa a -9MPa, el desplazamiento vertical de 0.13 m a 0,00036 metros y el desplazamiento horizontal de 0,7m a 0,00010 m.

Se puede determinar en el gráfico de desplazamiento total como los vectores de deformación se reducen considerablemente en la zona de las galerías pudiendo llegar a un máximo de desplazamiento 0,00021 m en las zonas que sobre yacen las galerías y cavidades. En la parte superior de nuestro modelo entre la UG1 Y UG2 se observa un mayor desplazamiento, teniendo un valor máximo de 0,00049 a 0,00056 m, esto se podría dar por la sobrecarga en superficie y las condiciones de las capas al ser arcillas, Saprolito y andesitas con una alteración moderada a alta. Además de la influencia de la discontinuidad D1 (N9°W / 51°NE).

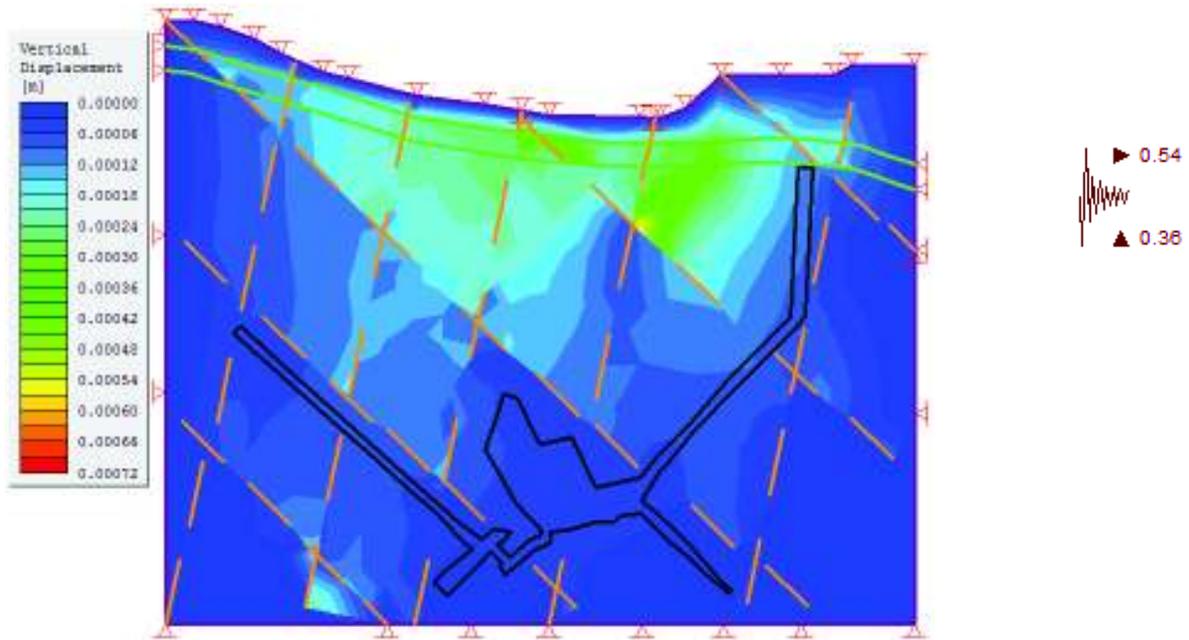
## Modelo con Mortero de Relave (Y2)



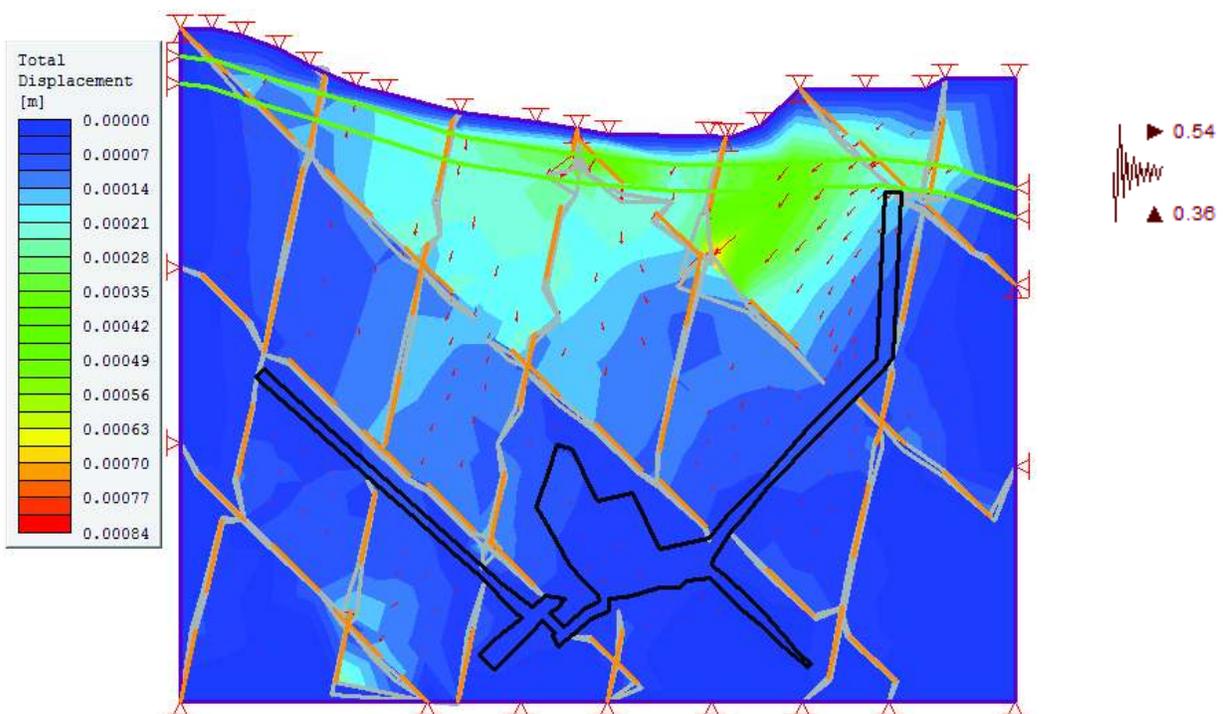
**FIGURA 53.** Modelamiento analizando el Esfuerzo principal con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.



**FIGURA 54.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.



**FIGURA 55.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.

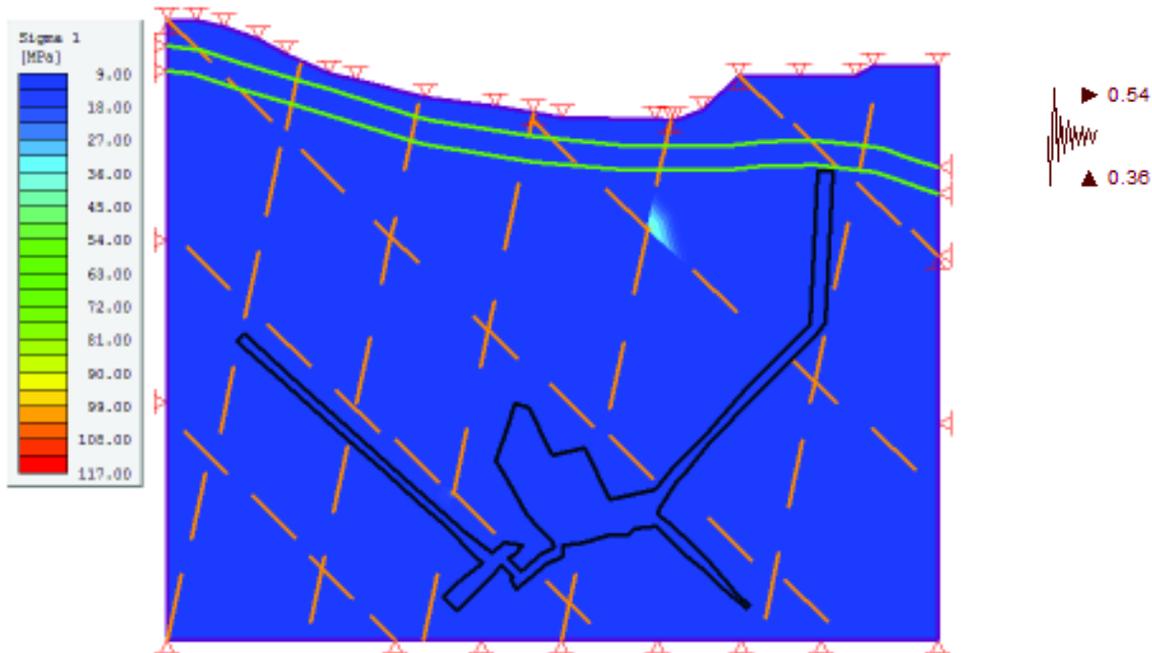


**FIGURA 56.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero (Y2) – Dosificación (1:1) con relación (A/C): 40%.

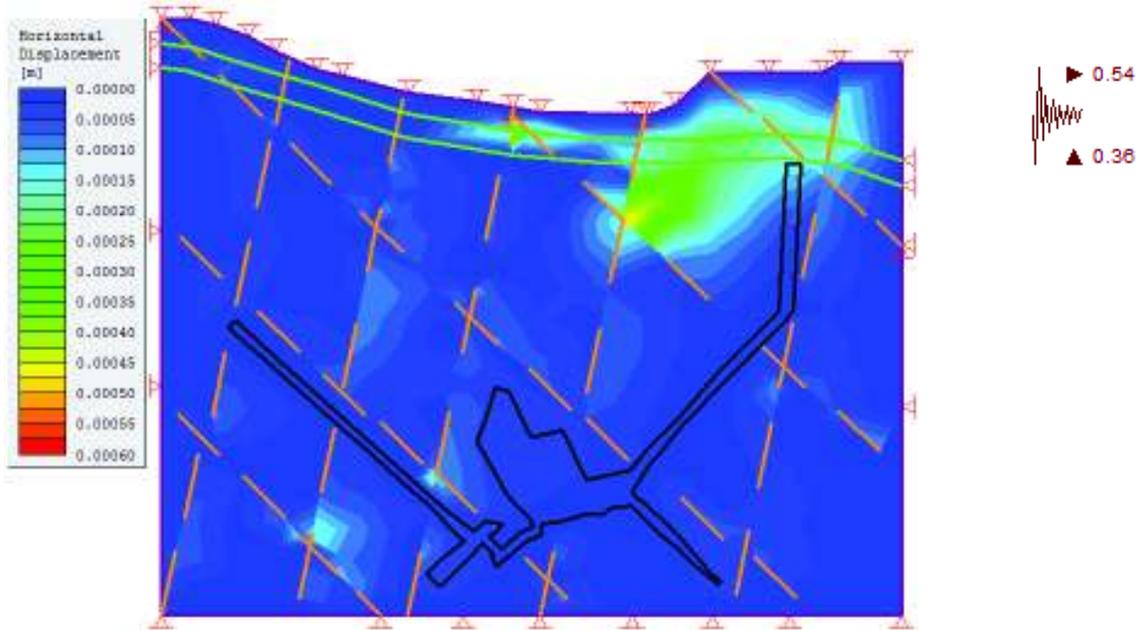
En Este modelo la dosificación utilizada es de (1:1) con relación (A/C) al 40%. De la misma manera se puede observar una disminución en los valores del esfuerzo principal y de los desplazamientos horizontal y vertical. Los valores más altos que debería tolerar las galerías son respectivamente son de 36 MPa, 0,00015 a 0,00035 m y 0,00018 a 0,00042 m.

La presencia de diaclasas en UG1 Y UG2 sumado a la calidad de estas capas de roca hacen que el desplazamiento total sea mayor en esta zona que está más cerca de la superficie y que potencialmente sería una zona más susceptible a FRM, sin embargo como se puede observar los valores son mínimos (< a 1mm), es decir, reduciéndose de 0.12 m a 0,00014m en promedio. Vale recalcar que de las dosificaciones realizadas de este tipo en briquetas y cilindros esta presento las mayores resistencias a la compresión uniaxial y la mayor resistencia en términos de esfuerzo ( $F'c= 323,99$  [Kg/cm<sup>2</sup>]), siendo por valores de carga y esfuerzo la dosificación más resistente de las ensayadas.

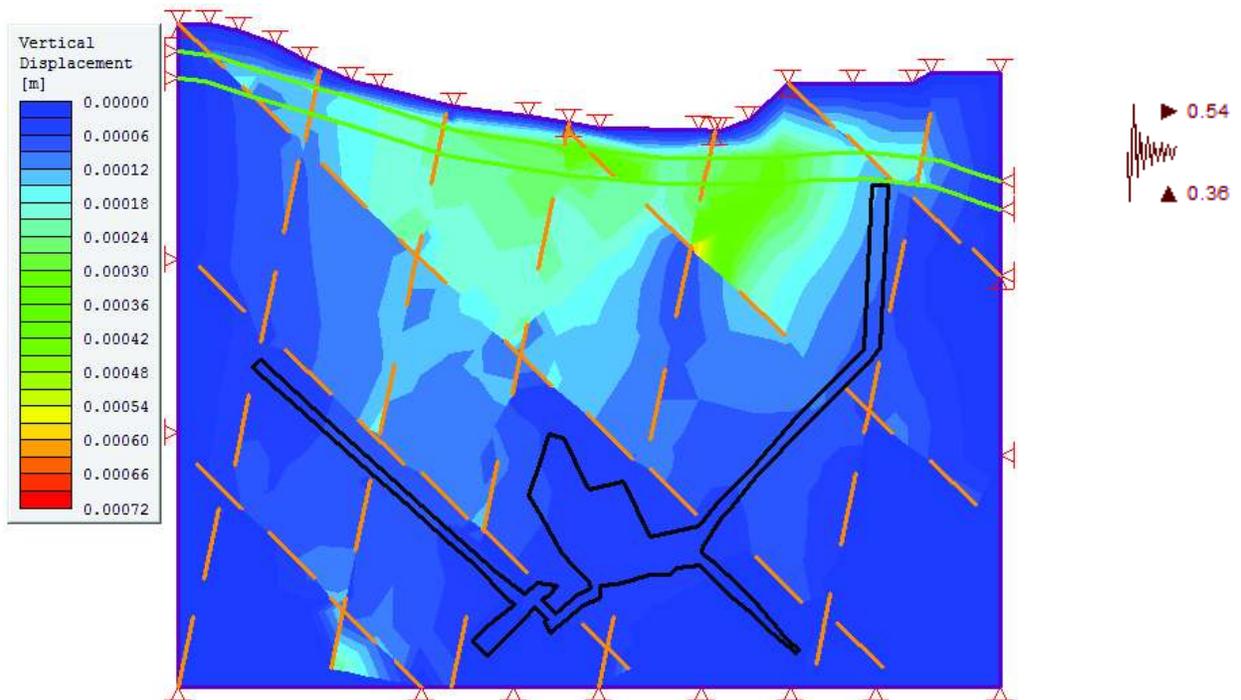
### Modelo con Mortero de Relave (Y3)



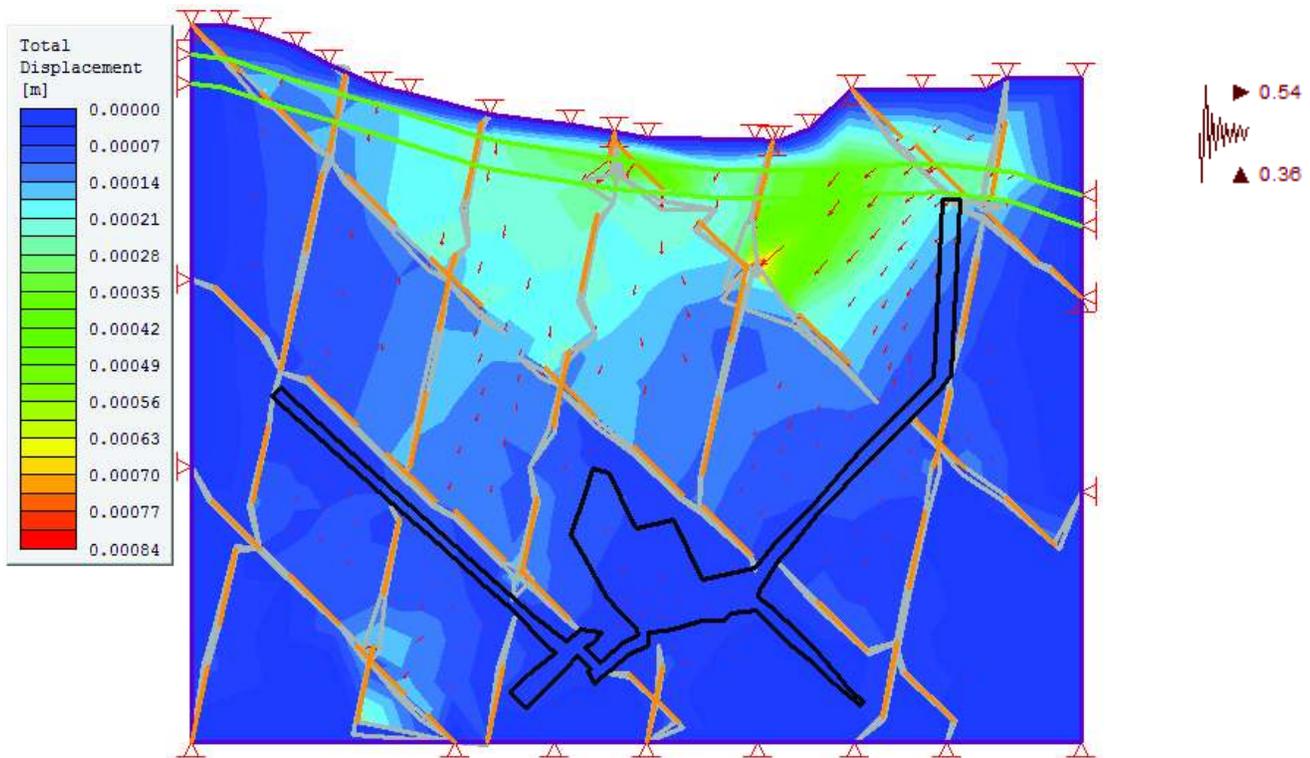
**FIGURA 57.** Modelamiento analizando el Esfuerzo principal con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.



**FIGURA 58.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.



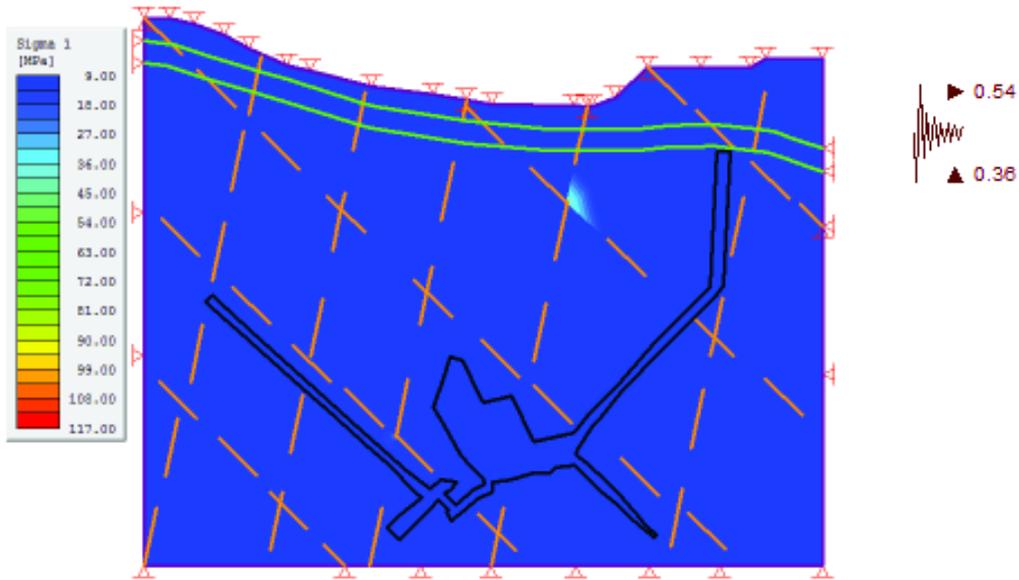
**FIGURA 59.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.



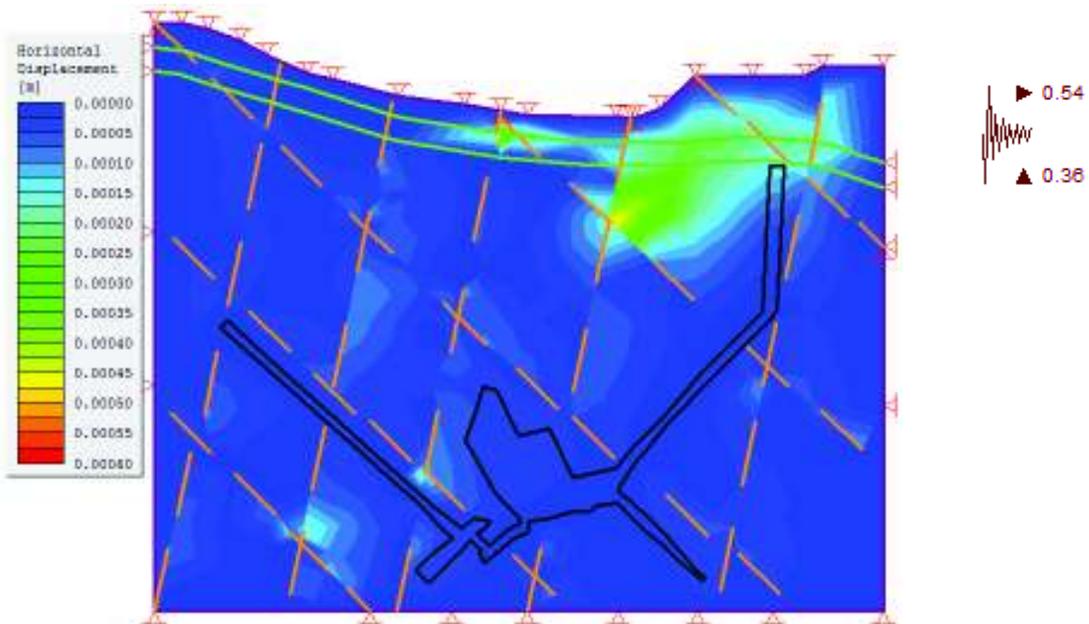
**FIGURA 60.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero (Y3) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 50%.

La presente dosificación contiene (1.4:1) de relave – cemento y un contenido de agua del 50%, en esta dosificación se obtiene resultados similares a las anteriores donde los valores del esfuerzo principal llegan a un máximo de 36 MPa donde convergen dos familias de diaclasas según el modelo realizado, vale destacar que la disposición espacial de las diaclasas de la zona es diferente. En cuanto a los valores de desplazamiento horizontal varia en rangos similares a los modelos anteriores donde el rango de desplazamiento oscila entre los 0,00015 a 0,00030 m y en vertical 0,00012 a 0,00036m lo cual indica que el material ensayado sería una medida de mitigación – remediación funcional ya que las aureolas de deformación con las galerías rellenas de este material se concentran en niveles superiores donde la calidad de roca no es buena.

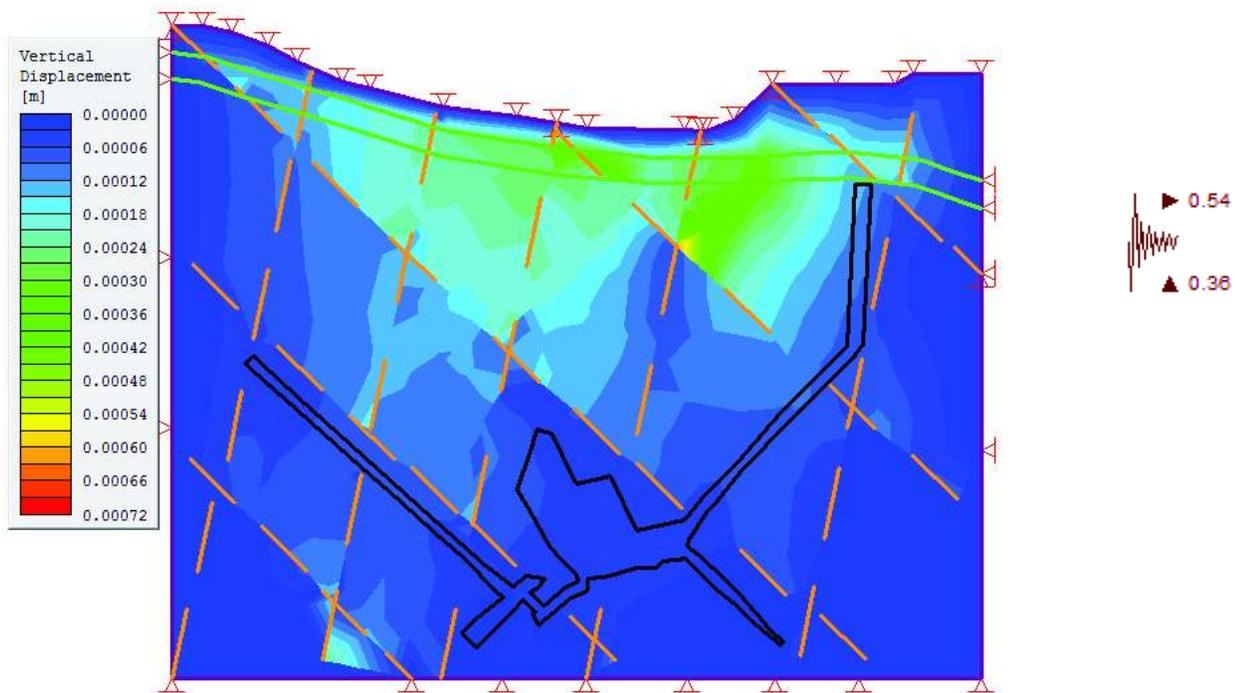
## Modelo con Mortero de Relave (Y4)



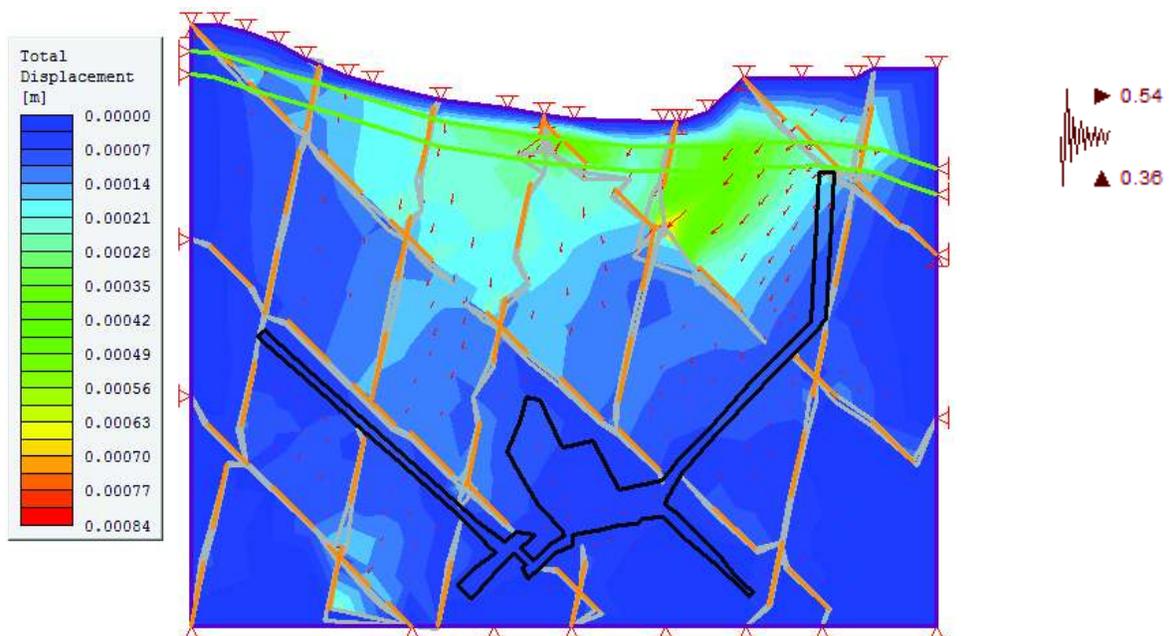
**FIGURA 61.** Modelamiento analizando el Esfuerzo Principal con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.



**FIGURA 62.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Horizontal con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.



**FIGURA 63.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Vertical con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.



**FIGURA 64.** Modelamiento analizando el Desplazamiento Total con relleno de mortero (Y4) – Dosificación (1.4:1) con relación (A/C): 40%.

El presente modelamiento presenta una Dosificación (1.4:1) al 40% de relación (A/C), presenta resultados semejantes a los obtenidos en modelos anteriores comprando valores de esfuerzo principal, desplazamiento horizontal y vertical en este modelamiento las aureolas de deformación son ligeramente más grandes respecto a los modelos anteriores, una de las posibles razones podría ser que en los ensayos de compresión simple a diferente tiempo de curación esta dosificación fue la que presentó un comportamiento anómalo mayor, es decir, de las dosificaciones ensayadas la línea de tendencia de este mortero es decreciente al inverso de lo que la teoría tradicional dicta.

Se puede observar también que en el modelo de desplazamiento total existen más aureolas de color blanco a celeste en un rango de (0,00007 a 0,00028) m localizadas principalmente en las zonas con diaclasas o en la parte superior cerca del límite de UG1 y UG2 que se ha visto en modelos anteriores pero que sin embargo en este modelo es un poco más fuerte.

De los 4 modelos propuestos con relleno de mortero de relave los modelos Y1, Y2, Y3, presentan comportamientos semejantes independientemente de la cantidad de carga y esfuerzo ( $F'c$ ) que soportaron en los ensayos de laboratorio, para nuestro modelamiento las cuatro dosificaciones reducen considerablemente el desplazamiento de centímetros a milimétricas, en otras palabras desde el punto de vista geotécnico el mortero de relave podría ser utilizado como relleno de estas galerías. El material en orden de eficiencia sería Y1, Y2, Y3, Y4, recomendando el uso de las tres primeras ya que su comportamiento se asemeja a los morteros u hormigones convencionales, respecto a la dosificación Y4 por su comportamiento anómalo se recomienda realizar ensayos con más muestras para definir su comportamiento.

## **CAPITULO IV**

### **DISCUSIÓN**

#### 4.1 Comportamiento de Mortero de Relave

El relave o arena residual de minería es un material no usado antes para este tipo de estudio, históricamente este tipo de material una vez que los minerales o metales de interés han sido extraídos en un porcentaje rentable, ha sido desechado en relaveras o botaderos, en este punto no existe bibliografía o estudios previos que nos permitan realizar una comparación con otros estudios.

La teoría tradicional para elaboración de morteros u hormigones explica que la tendencia que presentan los materiales usados comúnmente es lineal y creciente a medida que el tiempo de curación es mayor, alcanzando en este tiempo un 95 a 98% de su resistencia máxima, la diferencia de 2% se alcanza en el transcurso del tiempo sin presentar variaciones significativas al alcanzar los 28 días.

Los valores de Resistencia a la compresión uniaxial ( $F'c$ ), carga ( $Q$ ), de morteros realizado con arena común (Andesíticas, entre otras), alcanzan valores aproximados a los obtenidos a nuestro mortero de relave, sin embargo cabe destacar que las resistencias de nuestro estudio son relativamente mayores, la mineralogía de nuestro relave contiene elementos como la calicita ( $CaCO_3$ ), y los sulfuros (Pirita, Calcopirita, Yeso, Esfalerita) representa un 6% del contenido mineralógico dentro del cual existe la presencia de metales como Fe, Pb, Cu los mismos que ayudan al incremento de la resistencia del material, sin embargo el hecho de que estos minerales son sulfuros podrían representar un problema como contaminante ya que los sulfuros con el agua generan lixiviación, por lo cual se recomienda realizar un estudio posterior de este tema.

Los resultados obtenidos con los ensayos de compresión simple a briquetas y cilindros de mortero de relave dieron resultados variables. La dosificación (1:1) al 50% de (A/C) fue la única que presento un comportamiento similar a los morteros y hormigones tradicionales, es decir, esta dosificación presento un incremento lineal en los 28 días, lo cual sugiere que esta dosificación seria la ideal. Su incremento en valores de resistencia a la compresión simple y carga se presenta en la siguiente tabla:

**TABLA 4.1.1** Carga y Resistencia – Dosificación (1:1) al 50% de (A/C).

Dosificación (1:1) - 50% de (A/C)			
F'c (kg/cm2)	Tiempo (Días)		
	7	14	28
	218,755	225,989	279,015
%	-	3,20	21,60
Q (Toneladas)	Tiempo (Días)		
	7	14	28
	5,7655	6,112	7,437
%	-	5,67	22,47

Como se puede observar esta dosificación presenta un incremento lineal de sus valores de carga (Q) y resistencia a la compresión simple (F'c), mientras el tiempo de curación aumenta, también lo hacen dichos valores llegando a su punto máximo a los 28 días de curación. Esta dosificación podría ser la ideal para nuestro caso de estudio ya que presenta un comportamiento semejante al de los morteros tradicionales, como se puede observar comparativamente con las demás dosificaciones tanto las proporciones como el contenido de agua generan un comportamiento normal en el tiempo, es decir, alcanza su máxima resistencia a mayor tiempo de curación.

**TABLA 4.1.2** Carga y Resistencia – Dosificación (1:1) al 40% de (A/C).

Dosificación (1:1) - 40% de (A/C)			
F'c (kg/cm2)	Tiempo (Días)		
	7	14	28
	274,928	255,0905	271,298
%	-	-7,21	-1,32
Q (Toneladas)	Tiempo (Días)		
	7	14	28
	7,358	6,869	7,362
%	-	-6,64	0,05

Como observamos en la **TABLA 4.1.2** esta dosificación presenta una línea de tendencia lineal entre los 7 y 28 días de curación, sin embargo, presenta una

anomalía en la resistencia ya que a los 14 días su resistencia es menor que a los 7 días contrario a lo que indica la norma de morteros. Como podemos observar la variación de valores de resistencia a la compresión simple y carga son muy pequeños, por lo cual podría atribuirse que este comportamiento a que al tener menos cantidad de relave el contenido de arcilla es menor, por tanto facilita que el agua en los espacios vacíos del mortero drenen con mayor velocidad, produciendo un fracturamiento interno de las partículas del mortero reduciendo a los 14 días su resistencia, es decir, presenta una deformación plástica. La tendencia de esta dosificación es lineal a ligeramente creciente entre los 7 y 28 días, comportándose de manera similar a la dosificación anterior, la diferencia radica en que en esta dosificación la resistencia máxima puede ser alcanzada en estos dos intervalos de tiempo, es recomendable trabajar a estos dos tiempos para un funcionamiento óptimo del relave, evitando los 14 días donde se observa un comportamiento anómalo.

**TABLA 4.1.3** Carga y Resistencia – Dosificación (1.4:1) al 50% de (A/C).

<b>Dosificación (1.4:1) - 50% de (A/C)</b>			
<b>F'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
	200,9445	216,345	206,314
<b>%</b>	-	7,66	2,67
<b>Q (Toneladas)</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
	5,4035	5,6565	5,448
<b>%</b>	-	4,68	0,82

Esta dosificación presenta una tendencia lineal creciente con anomalías al igual que en la dosificación anterior, la diferencia principal radica en que este tipo de mortero alcanza su máximo valor de resistencia a los 14 días y decrece mínimamente a los 28 días, como podemos observar los valores calculados son respecto al ensayo inicial de 7 días, la anomalía presente podría explicarse en base a la dosificación, al tener mayor contenido de relave, por lo tanto mayor

contenido de arcilla y carbonato, la presencia de arcilla en mayor proporción impide que el agua en los espacios vacíos drene con mayor facilidad, la cantidad carbonato sumada a la del material cementante aumenta su resistencia, de este modo el agua que no puede drenar rápidamente y favorece a acelerar el proceso de reacción del cemento, pasado los 14 días la resistencia decrece de manera mínima, presentando un comportamiento de deformación plástica en el intervalo de 14 a 28 días, posiblemente como contiene mayor relave tiene más cantidad de sulfuros que quizá sus productos de lixiviación reaccionan a este tiempo y afecta la resistencia del material cementante.

**TABLA 4.1.4** Carga y Resistencia – Dosificación (1.4:1) al 40% de (A/C).

<b>Dosificación (1.4:1) - 40% de (A/C)</b>			
<b>F'c (kg/cm2)</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
	233,237	268,651	213,977
<b>%</b>	-	15,18	-8,25
<b>Q (Toneladas)</b>	<b>Tiempo (Días)</b>		
	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
	6,462	7,2475	5,391
<b>%</b>	-	12.15	-16,57

Al igual que la dosificación anterior esta presenta su punto máximo de resistencia a los 14 días de curación, sin embargo, la tendencia de la misma es lineal decreciente, como se acoto en el análisis anterior el factor fundamental para que nuestro mortero tenga este comportamiento es la cantidad de relave que posee, así como la variación del contenido de agua (A/C). Adicionalmente no se puede descartar errores de fabricación en las briquetas como aquellas fisuradas o aquella D1 que presento un valor anómalo demasiado alto, todos estos datos como se explicó previamente no fueron considerados para los análisis, y se trabajó con valores cercanos entre sí de carga y resistencia a la compresión simple.

Se ha determinado que la resistencia de los morteros depende de algunos factores. Un mortero habitualmente está compuesto por cemento, arena (común) y agua. Uno de los factores que determina la resistencia de un mortero común es su contenido de agua o relación (A/C), a mayor cantidad de agua la trabajabilidad del mortero es mayor pero se reduce su resistencia, existen factores externos que también son evaluados para la resistencia de morteros como permeabilidad, densidad, contracción por secado (área), módulo de elasticidad, entre otras. (Ensayo de resistencia a compresión de morteros – Ing. Civil, Universidad del Cauca).

Dentro de la relación de (A/C) cabe destacar la importancia de esta relación, si se adhiere en exceso a la dosificación, el agua se evaporara generando vacíos y dentro del mortero que posteriormente disminuirá su resistencia, otro factor importante es que el agua debe ser potable, ya que esta presenta generalmente un pH neutro o agua de alta montaña por la pureza que tiene. Respecto al agregado se recomienda utilizar materiales áridos silíceos (arena de río o canteras), material volcánico triturado (andesitas, basaltos), o calizas densas y sólidas. (G. Rivera, Ensayo de resistencia a compresión de morteros - Universidad del Cauca, 2007).

Para la elaboración de morteros no se recomienda la utilización de arenas con feldespato, caliza blandas, sulfuros, o rocas porosas. Esta es la norma general utilizada en la elaboración de morteros, como se indicó al inicio de este proyecto el objetivo es utilizar el material de relave con el objetivo de analizar su comportamiento como materia prima de morteros. Como se determinó en los ensayos los resultados de carga y resistencia a la compresión uniaxial fueron mejor de lo esperados, particularmente la dosificación de (1:1) al 50% de (A/C), ya que esta presentó un comportamiento similar a morteros tradicionales.

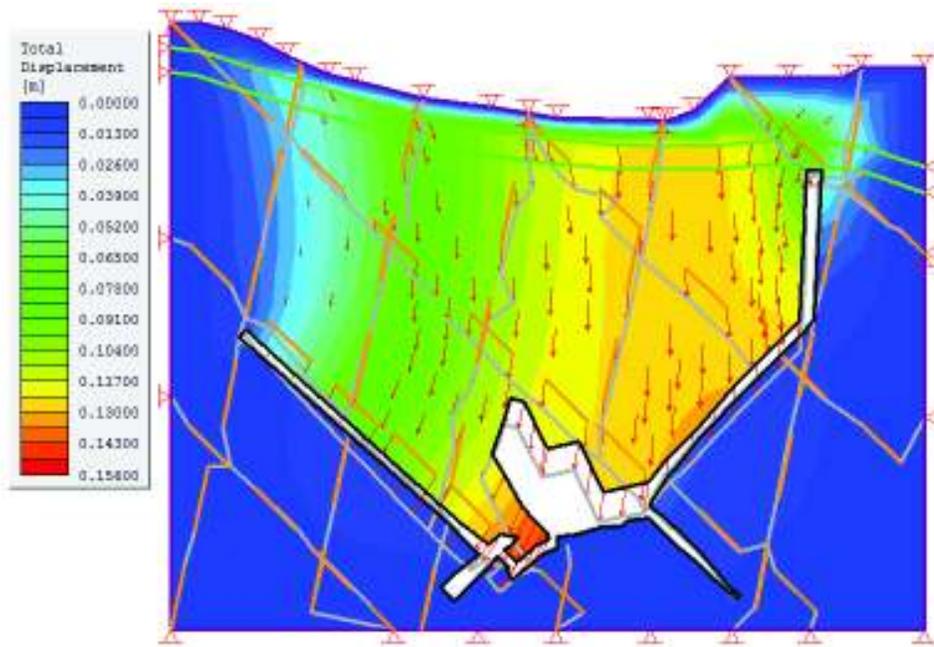
## **4.2 Modelamiento *PHASE 2***

El objetivo del presente proyecto fue experimentar una nueva metodología para la elaboración de morteros como relleno hidráulico en el caso del cantón Zaruma. Los materiales de relave al ser heterogéneos por su mineralogía y residuales de procesos extractivistas no tienen ningún uso después de que se extrajo al máximo los minerales y elementos de interés. Durante muchos años estos residuos han sido una problemática para los sectores del país donde se realizan labores mineras debido a que son un material contaminante el cual dependiendo del contenido de sulfuros que tenga al mezclarse con el agua genera productos de lixiviación los cuales pueden liberar diferentes contaminantes como metales pesados, elementos traza, entre otros.

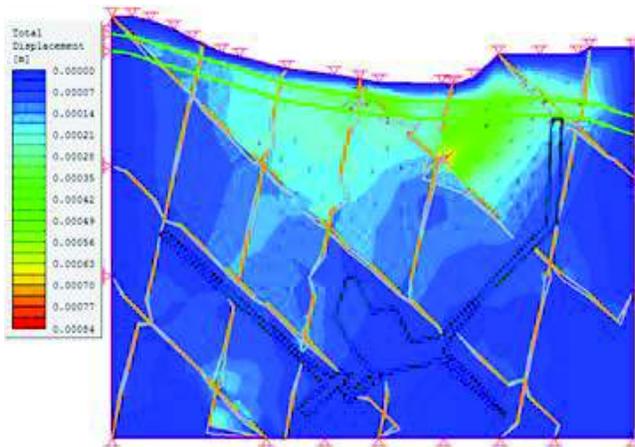
Se ha demostrado en este estudio que el mortero de relave presenta buenas propiedades geotécnicas en lo referente a la carga y el esfuerzo que toleran en base a ensayos de compresión simple, vale recalcar que estos morteros presentan valores más altos que morteros tradicionales. Como se muestra en los subsecuentes modelamientos, la inyección del mortero de relave como relleno de las galerías mineras es una medida innovadora y funcional desde el punto de vista geotécnico, para la problemática de subsidencias del cantón Zaruma.

Además de la funcionalidad que ha presentado este material, cabe destacar que desde el aspecto económico los costos del proyecto son bajos, debido a que se restan valores de compras de arena y agregados que son utilizados tradicionalmente, la arena de relave ha sido acumulada durante años en el botadero “El Tablón” ubicado en la ciudad de Portovelo, no obstante, este lugar es un potencial foco de contaminación debido a la cantidad de material acumulado, a su exposición al aire libre, lluvias las cuales al mezclarse con el relave pueden generar lixiviación y contaminación de aguas superficiales o subterráneas.

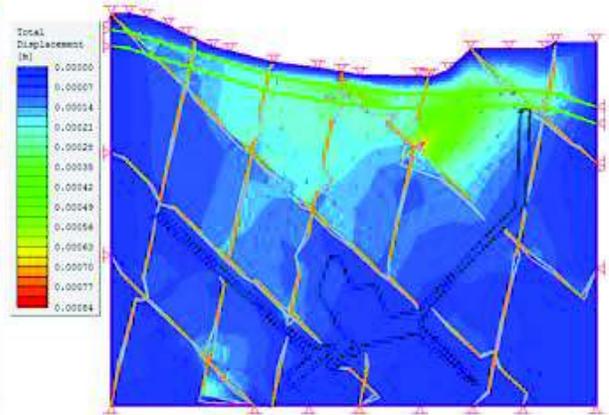
Para realizar un análisis comparativo se tomó en cuenta el modelo final de cada dosificación y el modelamiento con las galerías vacías, es decir, en las condiciones actuales en las que se encuentra el subsuelo del cantón Zaruma.



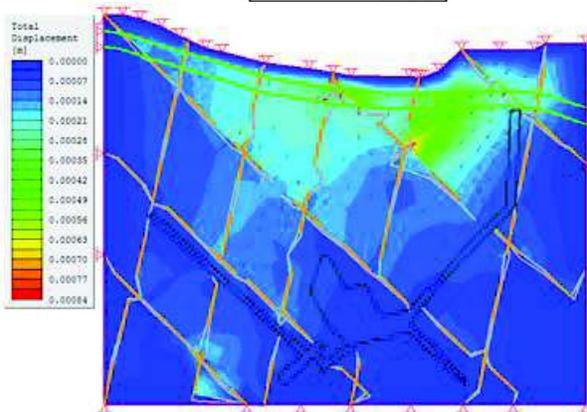
GALERIAS VACIAS



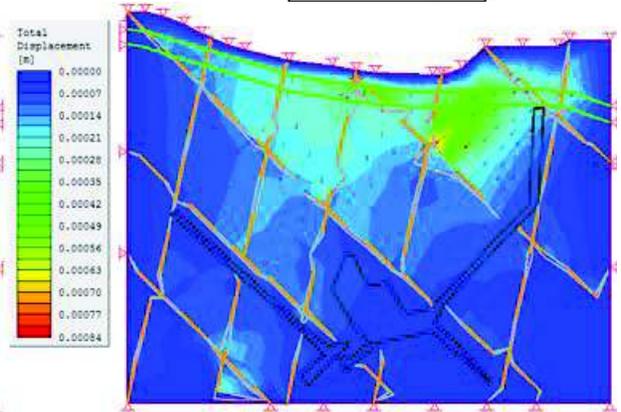
MORTERO (Y1)



MORTERO (Y2)



MORTERO (Y3)



MORTERO (Y4)

**FIGURA 65.** Gráficos de modelamiento de desplazamiento total en vacío y con las cuatro Dosificaciones de morteros (Y1, Y2, Y3, Y4)

Comparativamente es evidente que el mortero de relave reduce considerablemente la deformación vertical que existe en la actualidad en el cantón Zaruma, la sobrecarga en superficie por las diferentes edificaciones y tráfico continuo, así como la elaboración de galerías artesanales sin especificaciones técnicas son quizá los principales factores de la problemática actual de la ciudad, para nuestro análisis se consideró principalmente el esfuerzo principal y el desplazamiento vertical. Como se observa bajo las condiciones actuales desplazamiento que potencialmente podría ocurrir es centimétrico, y dado el caso de suscitarse un fenómeno de este tipo (subsidiencias) no solo causaría daños estructurales de las construcciones en superficie o pérdidas materiales, el área donde se ha realizado el presente estudio esta densamente poblada y constituye parte del casco colonial de la ciudad, pudiendo perderse un patrimonio como lo es el cantón Zaruma y adicionalmente suscitarse pérdidas humanas.

Al observar el resultado de los 5 modelamientos es evidente que las aureolas de deformación se reducen significativamente al realizar el relleno hidráulico con el mortero de relave, como se pudo evidenciar en los ensayos de compresión simple las dosificaciones (1:1) fueron las que presentaron los mejores valores de ( $F'c$  y  $Q$ ), es decir, son las que tolerarían una mayor carga respecto a las demás. Dentro de la **FIGURA 65** se puede evidenciar que los morteros Y1 y Y2 reducen la deformación más que los morteros Y3 y Y4; pero en términos de resistencia se recomendaría utilizar las dosificaciones en el siguiente orden (Y2, Y1, Y3 y Y4) siendo la última la más anómala y la menos recomendable. Es apreciable que la comparativa se realiza entre morteros convencionales y los analizados en este estudio, siendo el mortero de relave más resistente en términos de resistencia a la compresión simple y carga que soporta.

# Capítulo V

## Conclusiones y Recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

- Los datos obtenidos en el análisis de Difracción de Rayos X, muestran que la mineralogía del relave estudiado coincide con el tipo de mineralización presente en el Distrito minero Zaruma – Portovelo. El análisis de Fluorescencia no refleja la presencia de elementos como el Carbono o Nitrógeno, por lo cual no existe presencia de cianuro residual del proceso de tratamiento y extracción de minerales.
- La presencia significativa de Caolinita (15%) potencialmente ayuda a la resistencia del mortero, debido a sus propiedades absorbentes, no contaminantes que son de gran importancia para el control de lixiviados, además del tamaño de grano inferior a 20 micras disminuye considerablemente la porosidad del mortero.
- Los valores de resistencia a la compresión simple, reflejan que el mortero constituido por materiales de relave ensayado en este trabajo, supera los valores de morteros elaborados con materiales tradicionales, mientras mayor contenido de material cementante contiene el mortero y su relación (A/C) es menor, los valores de carga y esfuerzo tolerados por el mortero son mayores, sin embargo su trabajabilidad es algo menor que la de morteros convencionales, por lo cual podría presentar un bajo grado de maniobrabilidad, que no representa un mayor inconveniente para su uso en el cierre de galerías mineras del cantón Zaruma.
- La dosificación (1:1) con relación (A/C) al 50% presentó un comportamiento igual al de los morteros ordinarios, tanto los valores de carga y esfuerzo aumentaron a mayor tiempo de curación, por lo cual, de las dosificaciones ensayadas en este estudio, ésta es la mezcla potencialmente más efectiva para su aplicación en el cierre de galerías mineras.

- Las dosificaciones de morteros ensayas reducen considerablemente la deformación de las galerías debajo de la ciudad de Zaruma, ya que los valores de desplazamiento vertical como de desplazamiento total, se reducen a milésimas de milímetros por lo cual el uso de este mortero para relleno de las galerías resulta efectivo generando una estabilidad dentro de las mismas.

## **5.2 Recomendaciones**

- Las variaciones en los valores de Carga y Esfuerzo presentados por las diferentes dosificaciones durante los 28 días de curación, reflejan una reacción entre la composición mineralógica del relave, el cemento y la cantidad de agua. Por lo cual se recomienda realizar un estudio de cómo afecta los sulfuros a la resistencia del mortero. Debido al contenido de sulfuros presente en el relave (6%), es necesario realizar un análisis de productos de lixiviación, al entrar los sulfuros en contacto con el agua, su reacción genera productos contaminantes que podrían afectar fuentes de agua subterránea, acuíferos etcétera, por lo cual es necesario determinar cuáles son los potenciales contaminantes que podrían liberarse.
- Para un mejor funcionamiento del mortero de relave, es recomendable que se realice ensayos de RCS, con un mayor número de briquetas por dosificación, mejorando la estadística de los valores de carga y esfuerzo, con el objetivo de que errores de fabricación como fisuras no alteren la tendencia del comportamiento del mortero.
- Las Dosificaciones ensayadas fueron realizadas con el objetivo de crear una nueva metodología para la problemática actual del cantón Zaruma. Se recomienda realizar los ensayos con cemento de diferentes resistencias ya

que las briquetas y cilindros elaborados se las realizo con cemento ordinario.

- Datos como Angulo de fricción, cohesión, tracción, y datos referentes al comportamiento de las diaclasas, fueron extraídos de materiales similares al relave como suelos o arcillas de baja plasticidad, se recomienda realizar ensayos de resistencia al cortante para obtener los parámetros mencionados anteriormente.

## **CAPITULO VI**

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

A.CANOBA, R. FRAGA – 2004, Propiedades elásticas de las rocas Universidad Nacional de Rosario. (Rosario – Argentina).

ASPEN, J., BONILLA, W & DUQUE, P. (1995). The El Oro methamorphic complex, Ecuador; geology and economic mineral deposits. Overseas geology and mineral resources no. 67, 63 pp.

BRAJA M. DAS, 2006, Principios de la Ingeniería Geotécnica - Cengage, Quinta edición, California State University, (Sacramento – Estados Unidos).

CORNELIS KLEIN \ CORNELIUS S. HURLBUT, JR., VOL 1, 2006, Manual de mineralogía, Reverte - 1996, Cuarta edición Vol.1, 392 paginas, (España).

DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA (DEMEX), 2018, Ensayos granulométrico, Análisis de Fluorescencia de rayos X, Difracción de rayos X. Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador.

DYNASTY METALS & MINING INC. - 2004, Estructuras geológicas del distrito minero “Zaruma - Portovelo”.

DR. MARIO RUIZ, 2014 - Apuntes catedra de Geofísica – Escuela Politécnica Nacional, (Quito – Ecuador).

FEININGER, T. (1978) Geological map of western part of the El Oro province (1:50000). Escuela Politécnica Nacional, (Quito – Ecuador).

G. RIVERA, 2007, Ensayo de resistencia a compresión de morteros - Universidad del Cauca, (Popayan – Colombia).

GUEDE D., GONZÁLEZ P., CAEIRO J.R., 2013, Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. (Ourense – España).

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN GEOLÓGICO MINERO METALÚRGICO (INIGEMM), 2017, Estudio multidisciplinario para la estabilidad de la Chimenea y Cono de colapso de la Unidad Educativa “La Inmaculada, Fe y Alegría”, Cantón Zaruma, (Quito – Ecuador).

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS (LEMSUR), 2018, Ensayo granulométrico, Clasificación de suelos, Compresión monoaxial de hormigón, Resistencia a la compresión simple de morteros, Escuela Politécnica Nacional, (Quito – Ecuador).

MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA - 2014, Peligro sísmico y diseño sismo resistente (NEC – SE – DS), Dirección de comunicación social MIDUVI, (Quito – Ecuador).

PRODEMINCA, JUNIO 2000, Potencial minero metalúrgico del Ecuador, Vol.4, (Quito – Ecuador).

REYES, A. VALVERDE, E. ORDOÑEZ, J. ROMERO, M. (2014), “Historia del Cantón Zaruma” colección: Historia de la provincia de El Oro, (El Oro – Ecuador).

VAN THOURNOUT ET AL. (1996) Y ASPEN ET AL. (1995), Compilado mapas de campo minero de Zaruma - Portovelo, subdistrito El Oro.

### **RECURSOS ELECTRÓNICOS:**

BRUKER, CHEMPLEX – 2018 Official Website, (Estados Unidos).  
(Consulta: 15/04/2018)

<https://www.bruker.com/products>

OLIDFIELD GLOSSARY SCHLUMBERGER, 1998, (Texas – Estados Unidos)  
(Consulta: 22/03/2018)

<https://www.glossary.oilfield.slb.com/>

TUTORIALES SOFTWARE PHASE2 – 2016. Rocscience Official Website  
(Consulta: 28/06/2018).

[https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=getting\\_started%2FRS2\\_Applications\\_Overview.htm](https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=getting_started%2FRS2_Applications_Overview.htm)

TUTORIALES SOFTWARE ROCSCIENCE – 2015, Rocscience Official Website.  
(Consulta: 09/06/2018)

[https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/Slide\\_Tutorials.htm](https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/Slide_Tutorials.htm)

## **ANEXOS**

## ANEXO 1 – Tablas de cálculo para Briquetas

Ensayos de Compresión Uniaxial a 7 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c Promedio
	A	B	C										
A1	5,160	5,025	5,170	70	3.161	25,944	253,227	132,575	1,910	121,838	11,948	124,190	
	5,080	5,010	5,180										
	5,090	5,010	5,170										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,110</b>	<b>5,015</b>	<b>5,173</b>										
A2	5,030	5,160	4,995	(1:1)	3.270	25,841	253,000	129,896	1,948	126,541	12,409	136,134	
	5,010	5,180	5,000										
	5,040	5,170	5,000										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,027</b>	<b>5,170</b>	<b>4,998</b>										
B1	5,060	5,140	5,110	60	3.908	26,189	264,198	132,820	1,989	149,225	14,634	136,134	
	5,080	5,130	5,105										
	5,075	5,110	5,110										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,072</b>	<b>5,127</b>	<b>5,108</b>										
B2	5,090	5,130	5,110	60	3.215	26,129	261,515	132,736	1,970	123,043	12,066	136,134	
	5,060	5,110	5,120										
	5,090	5,090	5,110										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,080</b>	<b>5,110</b>	<b>5,113</b>										

Ensayos de Compresión Uniaxial a 7 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c Promedio
	A	B	C										
C1	5,110	4,995	5,240	50	5.600	26,253	272,532	134,329	2,029	213,308	20,918	218,755	
	5,130	4,995	5,250										
	5,110	5,050	5,220										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,117</b>	<b>5,013</b>	<b>5,237</b>										
C2	5,110	5,140	5,140	(1:1)	5.931	26,454	275,258	135,576	2,030	224,202	21,987	218,755	
	5,150	5,130	5,140										
	5,115	5,150	5,160										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,125</b>	<b>5,140</b>	<b>5,147</b>										
D1	5,040	5,120	5,150	40	8.009	26,402	286,630	133,067	2,154	303,345	29,748	289,137	
	5,06	5,110	5,150										
	5,040	5,140	5,160										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,040</b>	<b>5,123</b>	<b>5,153</b>										
D2	5,190	5,180	5,160	40	7.358	26,763	292,397	139,259	2,100	274,928	26,961	289,137	
	5,240	5,170	5,210										
	5,180	5,160	5,160										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,203</b>	<b>5,170</b>	<b>5,177</b>										

Ensayos de Compresión Uniaxial a 7 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c Promedio
	A	B	C										
P1	5,240	5,280	5,160	40	6.269	27,860	303,520	144,313	2,103	225,021	22,067	233,237	
	5,240	5,310	5,180										
	5,250	5,350	5,200										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,243</b>	<b>5,313</b>	<b>5,180</b>										
P2	5,250	5,240	5,220		(1.4:1)	6.655	27,562	304,373	144,794	2,102	241,453		23,678
	5,230	5,260	5,260										
	5,230	5,290	5,280										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,237</b>	<b>5,263</b>	<b>5,253</b>										
P3	5,210	5,110	5,130	50		5.302	26,831	273,242	137,016	1,994	197,609	19,379	200,945
	5,220	5,180	5,140										
	5,230	5,130	5,050										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,220</b>	<b>5,140</b>	<b>5,107</b>										
P4	5,250	5,090	5,110		204,280	5.505	26,948	278,196	138,065	2,015	204,280	20,033	
	5,260	5,110	5,110										
	5,280	5,160	5,150										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,263</b>	<b>5,120</b>	<b>5,123</b>										

Ensayos de Compresión Uni axial a 7 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c Promedio		
	A	B	C												
Q1	5,280	5,170	5,160	(2:1)	40	5.175	27,246	300,128	140,133	2,142	189,939	18,627	188,441		
	5,270	5,170	5,140												
	5,270	5,160	5,130												
<b>PROMEDIO 5,273 5,167 5,143</b>															
Q2	5,190	5,130	5,190			4.987	26,677	293,022	138,629	2,114	186,943	18,333		141,971	13,923
	5,200	5,140	5,200												
	5,180	5,150	5,200												
<b>PROMEDIO 5,190 5,140 5,197</b>															
Q3	5,180	5,140	5,160		50	3.780	26,625	279,338	137,297	2,035	141,971	141,971	13,923	146,001	
	5,190	5,140	5,150												
	5,170	5,140	5,160												
<b>PROMEDIO 5,180 5,140 5,157</b>															
Q4	5,160	5,140	5,110	4.036		26,901	276,023	137,913	2,001	150,031	14,713	150,031	14,713		
	5,150	5,180	5,100												
	5,190	5,300	5,170												
<b>PROMEDIO 5,167 5,207 5,127</b>															

Ensayos de Compresión Uniaxial a 14 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c Promedio
	A	B	C										
M1	5,200	5,170	5,150	40	6.942	26,762	295,600	138,091	2,141	259,400	25,438	268,650	
	5,190	5,140	5,140										
	5,250	5,090	5,190										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,213</b>	<b>5,133</b>	<b>5,160</b>										
M2	5,190	5,190	5,100	(1.4:1)	7.553	27,179	299,900	138,883	2,159	277,901	27,253	216,350	
	5,220	5,210	5,110										
	5,260	5,210	5,120										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,223</b>	<b>5,203</b>	<b>5,110</b>										
M3	5,090	5,130	5,080	50	5.627	26,196	275,100	133,339	2,063	214,801	21,065	216,350	
	5,090	5,140	5,090										
	5,080	5,180	5,100										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,087</b>	<b>5,150</b>	<b>5,090</b>										
M4	5,140	5,030	5,070	50	5.686	26,095	272,000	132,213	2,057	217,899	21,369	216,350	
	5,150	5,110	5,080										
	5,100	5,120	5,050										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,130</b>	<b>5,087</b>	<b>5,067</b>										

Ensayos de Compresión Uniaxial a 14 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c Promedio	
	A	B	C											
N1	4,920	4,950	4,990	(1:1)	40	7.001	24,535	266,800	122,267	2,182	285,346	27,983	276,166	
	4,930	4,960	4,960											
	4,950	5,010	5,000											
<b>PROMEDIO 4,933 4,973 4,983</b>														
N2	5,000	5,030	4,910			6.737	25,234	265,900	123,981	2,145	266,985	26,182		225,989
	5,020	5,040	4,920											
	5,000	5,050	4,910											
<b>PROMEDIO 5,007 5,040 4,913</b>														
N3 (Cubo Fisurado)	5,120	5,200	5,000		50	4.441	26,605	267,500	133,914	1,998	166,921	16,369	225,989	
	5,090	5,210	4,940											
	5,100	5,230	5,160											
<b>PROMEDIO 5,103 5,213 5,033</b>														
N4	5,130	5,250	5,030	6.112		27,046	262,900	136,039	1,933	225,989	22,162	225,989		
	5,160	5,290	5,020											
	5,12	5,230	5,040											
<b>PROMEDIO 5,145 5,257 5,030</b>														

Ensayos de Compresión Uniaxial a 28 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	%	Q (kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c (Promedio)
	A	B	C										
V1	5,070	5,060	4,910	(1.4:1)	40	5.176	25,739	269,200	126,892	2,121	201,098	19,721	213,977
	5,080	5,070	4,920										
	5,080	5,080	4,960										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,077</b>	<b>5,070</b>	<b>4,930</b>										
V2	4,990	5,070	4,900										
	4,970	5,090	4,940										
	4,980	5,090	4,960										
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,980</b>	<b>5,083</b>	<b>4,933</b>										
V3	4,890	4,950	4,950										
	4,910	4,930	4,910										
	4,950	4,960	4,930										
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,917</b>	<b>4,947</b>	<b>4,930</b>										
V4	5,040	4,980	4,890										
	5,050	4,990	4,930										
	5,040	5,000	5,000										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,043</b>	<b>4,990</b>	<b>4,940</b>										
V5	5,100	4,990	5,110										
	5,070	5,010	5,140										
	5,090	5,000	5,140										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,087</b>	<b>5,000</b>	<b>5,130</b>										

Ensayos de Compresión Uniaxial a 28 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	%	Q (kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c (Promedio)
	A	B	C										
W1	5,070	5,200	5,200	(1.4:1)	50	5.608	26,312	276,400	136,386	2,027	213,131	20,901	205,313
	5,060	5,210	5,190										
	5,060	5,180	5,160										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,063</b>	<b>5,197</b>	<b>5,183</b>										
W2	5,250	5,190	4,960										
	5,260	5,230	4,970										
	5,270	5,220	5,000										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,260</b>	<b>5,213</b>	<b>4,977</b>										
W3	4,980	5,240	5,280										
	4,970	5,250	5,280										
	5,030	5,300	5,290										
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,993</b>	<b>5,263</b>	<b>5,283</b>										
W4	4,970	5,190	5,270										
	4,980	5,260	5,290										
	4,980	5,280	5,300										
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,977</b>	<b>5,243</b>	<b>5,287</b>										
W5 (Cubo Fisurado)	5,030	5,040	4,970										
	5,050	5,040	5,000										
	5,030	5,070	4,990										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,037</b>	<b>5,050</b>	<b>4,987</b>										

Ensayos de Compresión Uniaxial a 28 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	% (A/C)	Q (kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c (Promedio)
	A	B	C										
X1	5,270	5,140	5,090	(1:1)	40	7.000	27,140	292,900	138,684	2,112	257,925	25,294	271,297
	5,290	5,150	5,130										
	5,270	5,140	5,110										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,277</b>	<b>5,143</b>	<b>5,110</b>										
X2	5,310	5,140	5,130										
	5,320	5,170	5,130										
	5,310	5,190	5,140										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,313</b>	<b>5,167</b>	<b>5,133</b>										
X3	5,320	5,170	5,200										
	5,350	5,190	5,190										
	5,370	5,200	5,190										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,347</b>	<b>5,187</b>	<b>5,193</b>										
X4	5,190	5,160	5,180										
	5,170	5,190	5,200										
	5,130	5,200	5,200										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,163</b>	<b>5,183</b>	<b>5,193</b>										
X5	5,110	5,170	5,180										
	5,120	5,200	5,190										
	5,150	5,210	5,200										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,127</b>	<b>5,193</b>	<b>5,190</b>										

Ensayos de Compresión Uniaxial a 28 días de Curación.

Muestra	Medidas de Briqueta			Relación	%	Q (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	F'c (Mpa)	F'c (Promedio)
	A	B	C										
Z1	5,190	5,180	5,100	(1:1)	50	6.670	26,884	281,400	137,826	2,042	248,101	24,330	
	5,170	5,190	5,130										
	5,180	5,200	5,150										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,180</b>	<b>5,190</b>	<b>5,127</b>										
Z2	5,190	5,090	5,100										
	5,160	5,110	5,120										
	5,170	5,150	5,120										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,173</b>	<b>5,117</b>	<b>5,113</b>										
Z3	5,140	5,220	5,120										
	5,150	5,290	5,150										
	5,110	5,270	5,130										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,133</b>	<b>5,260</b>	<b>5,133</b>										
Z4	5,130	5,120	5,230										
	5,130	5,160	5,220										
	5,100	5,180	5,260										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,120</b>	<b>5,153</b>	<b>5,237</b>										
Z5	5,140	5,130	5,190										
	5,130	5,170	5,200										
	5,140	5,210	5,190										
<b>PROMEDIO</b>	<b>5,137</b>	<b>5,170</b>	<b>5,193</b>										

## ANEXO 2

### Ensayos Monoaxiales para Módulos de Young y Coeficiente de Poisson

#### Muestra Y1

CARGA (kg)	DEF. AXIAL (µm)	DEF. TRANSV (µm)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0,00
500	30	-10	6,43
1000	60	-20	12,86
1500	80	-25	19,29
2000	120	-35	25,72
2500	150	-55	32,15
3000	180	-70	38,58
3500	255	-90	45,01
4000	330	-115	51,44
0	0	0	0,00
1000	45	-20	12,86
2000	90	-35	25,72
3000	180	-55	38,58
4000	270	-80	51,44
5000	360	-110	64,30
6000	455	-145	77,16
7000	630	-200	90,02
8000	810	-245	102,89

0	0	0	0,00
1000	75	-25	12,86
2000	165	-55	25,72
3000	270	-80	38,58
4000	375	-110	51,44
5000	480	-135	64,30
6000	585	-160	77,16
7000	690	-180	90,02
8000	785	-215	102,89
9000	915	-250	115,75
10000	1035	-290	128,61
11000	1170	-325	141,47
12000	1320	-380	154,33

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (cm):	9,95
ALTURA (L) (cm):	19,98
VOLUMEN (cm <sup>3</sup> ):	1553,85
PESO (N):	3390,10
PESO UNITARIO (KN/m <sup>3</sup> ):	2,18

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (cm <sup>2</sup> ):	77,76
RELACIÓN L/D:	2,01
Carga máxima (Kg):	12961,00
Módulo de Elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> ):	124259
Módulo de Poisson (Kg/cm <sup>2</sup> ):	0,28
Resistencia a la compresión uniaxial (Kg/cm <sup>2</sup> ):	162,83
Resistencia a la compresión uniaxial corregida (Kg/cm <sup>2</sup> ):	162,83

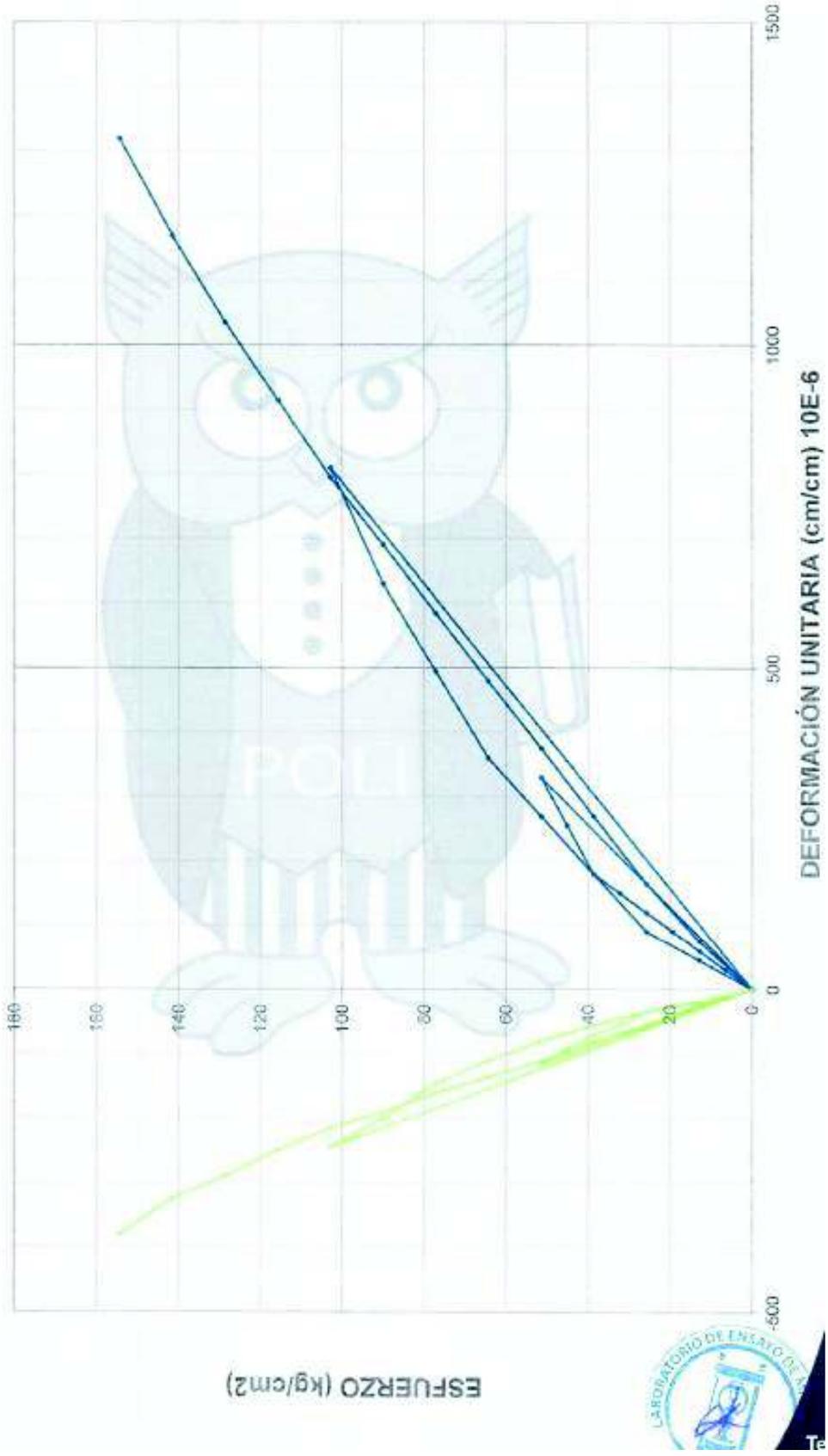


*[Handwritten signature]*

ING. MERCEDES VILLACIS

JEFE DEL LABORATORIO

**Muestra Y1**



## Muestra Y2

CARGA (Kg)	DEF. AXIAL (µm)	DEF. TRANSV (µm)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00
500	15	0	6.18
1000	36	0	12.36
1500	65	-10	18.54
2000	90	-15	24.72
2500	120	-25	30.90
3000	155	-30	37.08
3500	180	-40	43.26
4000	210	-45	49.44
4500	245	-55	55.61
5000	275	-60	61.79
0	0	0	0.00
1000	40	-10	12.36
2000	100	-15	24.72
3000	180	-30	37.08
4000	230	-45	49.44
5000	295	-60	61.79
6000	350	-75	74.15
7000	420	-90	86.51
8000	495	-105	98.87
9000	565	-130	111.23
10000	635	-150	123.59

0	0	0	0.00
2000	100	-30	24.72
4000	225	-60	49.44
6000	365	-80	74.15
8000	495	-105	98.87
10000	615	-145	123.59
12000	755	-175	148.31
14000	925	-210	173.02
16000	1080	-250	197.74
18000	1260	-295	222.46
20000	1450	-355	247.18
22000	1735	-415	271.89
24000	1935	-495	296.61
26000	2245	-615	321.33

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIÁMETRO (D) (cm):	10.15
ALTURA (L) (cm):	20.02
VOLUMEN (cm <sup>3</sup> ):	1619.82
PESO (N):	3528.80
PESO UNITARIO (N/cm <sup>3</sup> ):	2.06

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (cm <sup>2</sup> ):	77.76
RELACION L/D:	2.01
Carga máxima (Kg):	12961.00
Módulo de Elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> ):	124298
Módulo de Poisson (Kg/cm <sup>2</sup> ):	0.28
Resistencia a la compresión uniaxial (Kg/cm <sup>2</sup> ):	162.83
Resistencia a la compresión uniaxial corregida (Kg/cm <sup>2</sup> ):	162.83

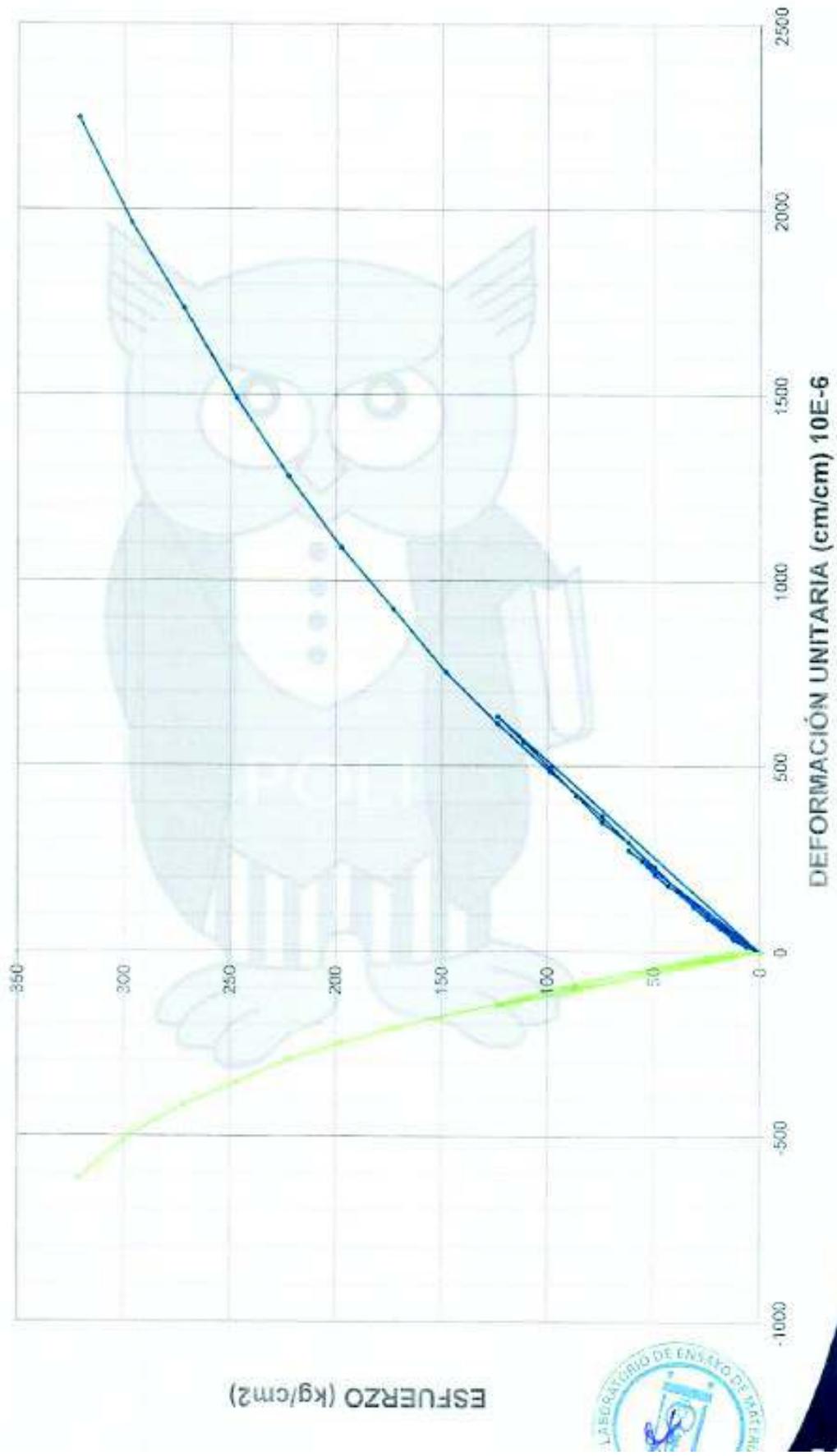


*[Handwritten signature]*

ING. MERCEDES VILLACUS

JULIO DEL CANTO GONZALEZ

**Muestra Y2**



### Muestra Y3

CARGA (Kg)	DEF. AXIAL (µm)	DEF. TRANSV (µm)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00
500	10	-10	6.24
1000	15	-15	12.48
1500	30	-28	18.72
2000	55	-50	24.96
2500	75	-50	31.20
3000	105	-65	37.44
3500	135	-80	43.68
4000	180	-95	49.92
4500	220	-110	56.16
5000	265	-135	62.40
0	0	0	0.00
1000	60	15	12.48
2000	100	30	24.96
3000	175	50	37.44
4000	240	70	49.92
5000	315	95	62.40
6000	390	130	74.88
7000	465	160	87.36
8000	540	190	99.84
9000	630	235	112.32
10000	715	240	124.80
0	0	0	0.00
2000	100	-40	24.96
4000	225	-70	49.92
6000	380	-110	74.88
8000	510	-145	99.84
10000	675	-190	124.80
12000	865	-260	149.76
14000	1080	-365	174.72
16000	1300	-370	199.68
18000	1545	-450	224.64

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBEETA.	
DIAMETRO (D) (cm):	10.10
ALTURA (L) (cm):	20.02
VOLUMEN (cm <sup>3</sup> ):	1605.04
PESO (N):	3389.10
PESO VOLUMETARIO (KN/m <sup>3</sup> ):	2.10

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (cm <sup>2</sup> ):	80.12
RELACION L/D:	1.98
Carga máxima (Kg):	19225.00
Módulo de Elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> ):	104511
Módulo de Plasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> ):	0.28
Resistencia a la compresión anisotrópica (Kg/cm <sup>2</sup> ):	240.01
Resistencia a la compresión uniaxial longitudinal (Kg/cm <sup>2</sup> ):	240.01

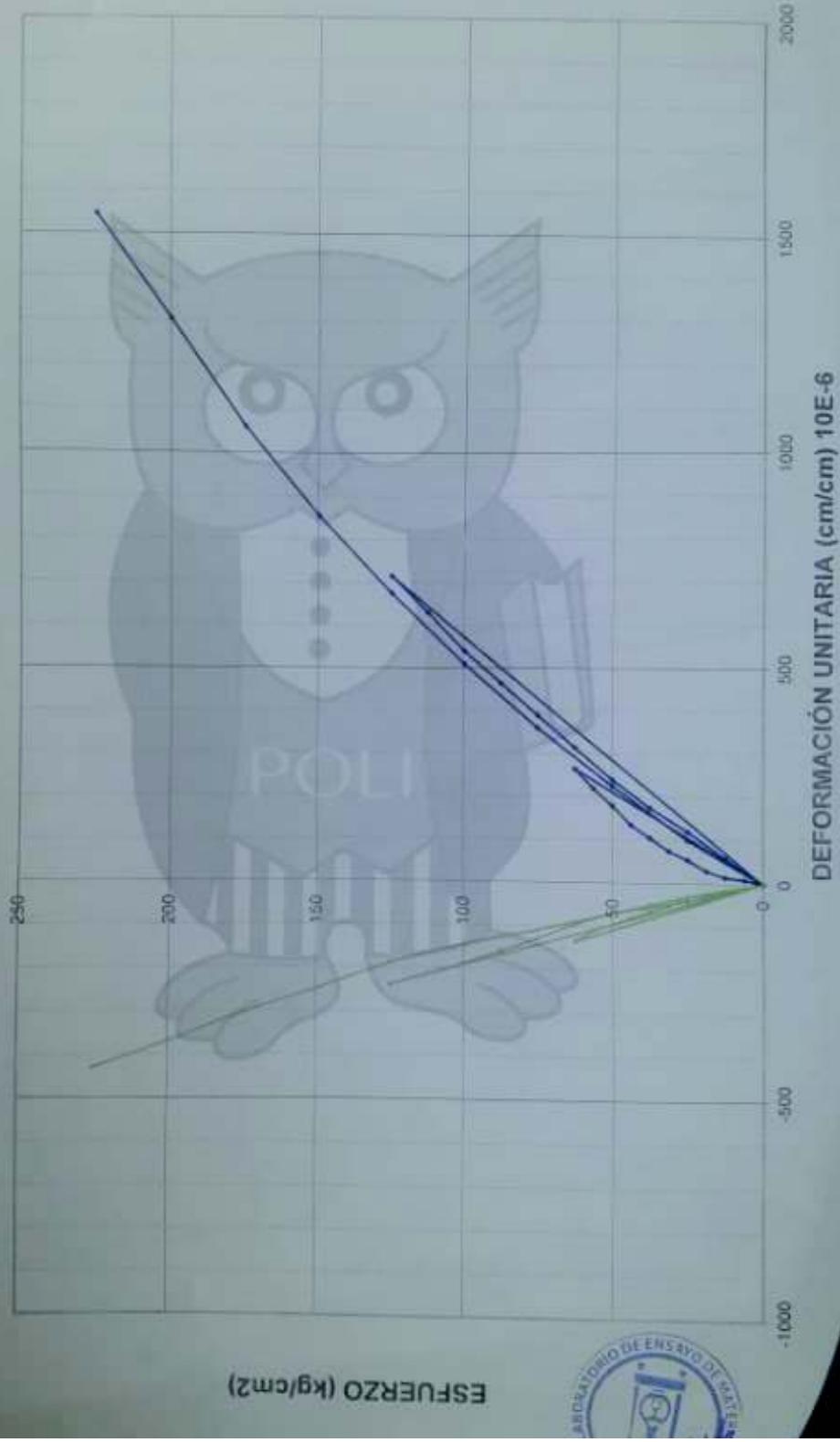


*[Handwritten Signature]*  
**ING. MERCEDES VILLACIS**  
 JEFE DEL LABORATORIO

**Muestra Y3**

INF N° 18-0107-I  
02 de 02

**CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN**  
PROYECTO DE TITULACIÓN: PLAN PILOTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE GALERIAS MINERAS EN BASE A LA INYECCIÓN HIDRAULICA (MORTERO DE RELAVE) BAJO LA UNIDAD EDUCATIVA LA INMACULADA FE Y ALEGRA, CANTON ZARUMA



# Muestra Y4

CARGA (Kg)	DEF. AXIAL (µm)	DEF. TRANSV (µm)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0,00
500	0	-10	6,27
1000	20	-20	12,54
1500	35	-25	18,82
2000	55	-35	25,09
2500	70	-45	31,36
3000	90	-55	37,63
3500	110	-65	43,90
4000	145	-70	50,17
4500	180	-85	56,45
5000	215	-100	62,72
0	0	0	0,00
1000	55	-20	12,54
2000	125	-45	25,09
3000	200	-70	37,63
4000	270	-100	50,17
5000	340	-130	62,72
6000	430	-160	75,26
7000	540	-190	87,80
8000	655	-225	100,35
9000	790	-260	112,89
10000	935	-295	125,44

0	0	0	0,00
1000	35	-10	12,54
2000	80	-20	25,09
3000	160	-35	37,63
4000	235	-65	50,17
5000	315	-80	62,72
6000	395	-115	75,26
7000	575	-155	87,80
8000	610	-160	100,35
9000	730	-235	112,89
10000	865	-275	125,44
11000	1010	-315	137,98
12000	1170	-370	150,52
13000	1350	-425	163,07
14000	1650	-488	175,61
15000	1745	-550	188,15

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIÁMETRO (D) (cm):	10,05
ALTURA (L) (cm):	19,98
VOLUMEN (cm <sup>3</sup> ):	1563,12
PESO (N):	3389,10
PESO UNITARIO (Kg/m <sup>3</sup> ):	2,13

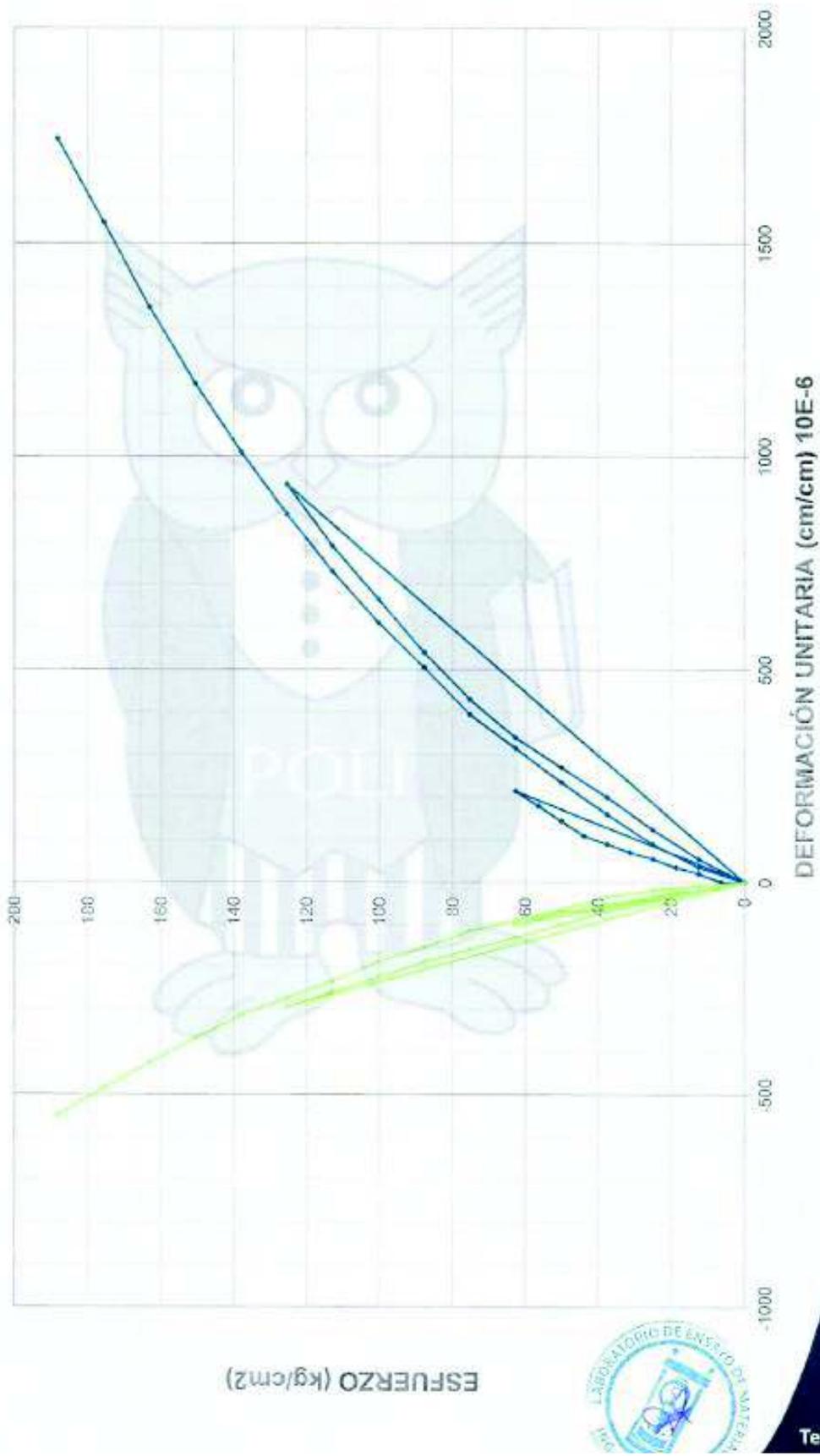
RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (cm <sup>2</sup> ):	79,72
RELACION L/D:	1,98
Carga máxima (Kg):	15600,00
Modulo de Elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> ):	145012
Modulo de Poisson (Kg/cm <sup>2</sup> ):	0,32
Resistencia a la compresión uniaxial (Kg/cm <sup>2</sup> ):	191,92
Resistencia a la compresión uniaxial corregida (Kg/cm <sup>2</sup> ):	191,92



*[Handwritten signature]*

ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DEL LABORATORIO

**Muestra Y4**



Tel