



STRESS-STRAIN ANALYSIS OF WORKS REMEDIATION IMPLEMENTED TO STABILIZE THE MINING SUBSIDENCE UNDER LA INMACULADA SCHOOL, ZARUMA-ECUADOR.

Análisis tenso-deformacional de las obras de remediación implementadas para estabilizar la subsidencia minera bajo la Escuela La Inmaculada, Zaruma-Ecuador.

Burbano Morillo Danny Santiago
 Máster en Ingeniería Geológica (Madrid-España, UCM)
 Docente Universidad Central del Ecuador, dsurbano@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2716-4756>

Rivadeneira Gallardo Andrés Mauricio
 Ingeniero de Minas (Quito-Ecuador, UCE)
 Investigador Privado, amrivadeneira@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0797-6092>

Cerón Uquillas Aldrin Alfredo
 Ingeniero de Minas (Quito-Ecuador, UCE)
 Investigador Privado, alfre_mh@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6814-6303>

García Fonseca Tania Elizabeth
 Máster en Paleontología Avanzada (Madrid-España, UCM)
 Docente Universidad Central del Ecuador, tegarcia@uce.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8162-6870>

Recibido: abril de 2021
 Aprobado: noviembre de 2021
 ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: 10.29166/revfig.v12i2.3054

RESUMEN

En este trabajo se establecen 4 escenarios tenso-deformacionales que evidencian el proceso de inestabilidad y trabajos de remediación, en relación al evento de subsidencia y colapso del terreno donde se establecía la escuela La Inmaculada (Zaruma-Ecuador). Se empleo perfiles longitudinales en dirección al aprovechamiento de la veta “Tres Reyes” donde se plasma el modelo geológico-estructural que sirve de base para el cálculo de las deformaciones en las galerías mineras entorno a su comportamiento plástico. Para el modelamiento fue necesario el determinar; la carga muerta de la infraestructura, cargas pseudo-estáticas, posicionamiento del nivel freático, parámetros físico-mecánicos-elásticos de la matriz rocosa y discontinuidades que en conjunto definen el comportamiento de la tensión y deformación mediante la técnica numérica de Método de los Elementos Finitos (MEF). Diseñar un mortero optimizado en dosificación 1 cemento (C): 2 relave (R) y 0.49 relación agua (A)/ cemento (C) obteniendo una resistencia de 18 MPa a los 14 días de curado. Finalmente, se comprueba que la aplicación del relleno con mortero de relave dentro de las galerías aledañas a la zona de colapso, disminuyen sustancialmente la deformación del sustrato rocoso de 1.9 m (Escenario 2: Cono vacío) a 0.05 m (Escenario 4: Relleno con mortero de relave).

ABSTRACT

Four stress-strain are established that demonstrate the instability process and remediation work, in relation to the subsidence and collapse event of the land where the school the was established “La Inmaculada” (Zaruma-Ecuador). Longitudinal profiles were used in direction of the use “Tres Reyes” vein, where the geological-structural model that serves as basis for strains calculation in the mining galleries around their plastic behavior. The modeling was necessary to determine; the infrastructure dead load, pseudo-static loads, groundwater position, physical -mechanical-elastic parameters of the rock matrix and discontinuities that together define the stress and deformation behavior by the finite elements method numerical (FEM). It designed an optimized mortar with cement (C): two tailings (T) at 1:2 and 0.49 water ratio (W)/cement (C), obtaining a resistance of 18 MPa after fourteen curing days. Finally, it is verified that the fill application in paste inside the galleries surrounding the collapse zone, the strain rock substrate decreases from 1.9 m (scenario two: empty cone) to 0.05 m (scenario four: pulp fill).

Palabras clave: tensión, deformación, subsidencia, relleno, remediación, colapso, mortero, Zaruma.

Keywords: stress, strain, subsidence, fill, remediation, collapse, mortar, Zaruma.

INTRODUCCIÓN

El cantón Zaruma es parte de uno de los distritos mineros vetiformes más productivos de oro del sur del Ecuador, su explotación data de la colonia, hace 424 años. La minería industrial en el distrito Zaruma – Portovelo, inicia con la empresa extranjera South American Development Company (SADCO), con un periodo de explotación de 54 años (1896 hasta 1950), extrayendo 3.6 millones de onzas de oro, equivalente a USD 4.500 millones (a precio del 2014); esta empresa implementa estándares nacionales e internacionales requeridos; dejando pilares de seguridad técnicamente establecidos (Colchón de seguridad de 300 m por debajo de la superficie del cantón Zaruma). Tras su salida, el gobierno ecuatoriano tomó a su cargo todos los activos de dicha concesión y forma la Compañía Industrial Minera Asociada (CIMA), que opera entre 1950 y 1976 (26 años). La vida empresarial de CIMA arroja cifras bajas de rentabilidad, para sus accionistas, cerrando dicha empresa definitivamente. (Reyes et al., 2014)

El espacio laboral de actividad minera dejado por CIMA, fue aprovechado por habitantes de poblados aledaños, ocasionando en el transcurso de los años la conformación de grupos mineros ilegales (apropiaciones) y posteriormente grupos mineros legales (empresas mineras y otorgamientos mineros), quienes para recuperar los minerales rentables aún existentes (oro, plata y cobre) invaden el colchón de seguridad dejado por la SADCO. Sin embargo, y a pesar de que varios de estos grupos han obtenido la legalización (concesiones mineras y otorgamientos) desde los años 80's, todavía persiste las labores mineras antitécnicas y sumado al deficiente control por parte del estado; ha permitido que la extracción del recurso mineral ascienda de manera indiscriminada hasta la superficie; provocando la inestabilidad del sustrato rocoso de la ciudad de Zaruma (Fig. 1); y asociado a factores condicionantes (litología, estructuras geológicas favorables, meteorización) y desencadenantes (cargas estáticas y dinámicas por voladuras y sismos, alteración del estado tensional, infiltración de agua de escorrentía), acelera el fenómeno de subsidencia, hasta producirse la chimenea de colapso por debajo de la escuela “La Inmaculada”. (INIGEMM, 2017)

El hundimiento del terreno, suscitado el 25 de octubre del 2016, en la escuela “La Inmaculada” en la ciudad de Zaruma, se relaciona al asentamiento de macizo rocoso y a la formación de un cono inicial de 10m de diámetro hasta incrementarse

paulatinamente a los 23 m, comprometiendo la seguridad de los habitantes y la estabilidad estructural de las viviendas aledañas (Fig. 2).

La remediación del hundimiento ejecutado por el INIGEMM en el 2017 contempla dos fases:

Fase 1 (estudios), involucra el levantamiento de insumos a través del diagnóstico de información, procesamiento de datos “IN SITU”, investigaciones directas e indirectas y de laboratorio cuyo alcance permite el diseño de obras de mitigación. Los trabajos técnicos incluyeron:

- *Topografía*, con el levantamiento topográfico en superficie y subterráneo.
- *Geología*, determinación de litología, niveles de meteorización y estructuras geológicas.
- *Geofísica*, detección de cavidades en base a la resistividad eléctrica y las identificaciones de contrastes litológicos.
- *Hidrogeología*, posicionamiento del nivel freático y química del agua subterránea.
- *Movimientos en masa*, tipología, susceptibilidad, velocidad y vectores de desplazamiento.
- *Geotecnia*, caracterización del macizo mediante el levantamiento de estaciones geomecánicas.
- *Perforaciones con recuperación de testigos*, permitiendo la calibración del modelo geológico-geotécnico, ensayos “IN SITU”, muestreo para ensayos de laboratorio físico-mecánicos.

Fase 2 (remediación), se fundamenta en la construcción “IN SITU” de 12 pilotes tipo caisson (hormigón estructural de 280 kg/cm² con acero de refuerzo f'y:4200 kg/cm²) con diámetro interior de 1.2 m dispuestos cada 3 m empotrados en roca hasta la profundidad promedio de 19 m, los cuales se encuentran arriostrados mediante una viga de amarre y una pantalla de estructura armada, que en conjunto forma una estructura perimetral, cuyo objetivo fue estabilizar las viviendas aledañas a la zona de hundimiento (Fig. 3). Posteriormente, se procede a limpiar el interior del cono hasta llegar a la roca competente, en la que se construyó una losa tapón de ±4m x ±5m con estructura armada (replanteo 0.40 m + malla electrosoldada+ viga perimetral+16 micropilotes anclados+ doble emparrillado de hierro con Φ: 18 mm @ 0.14 m + perfiles HB+ 0.40 cm de hormigón de 350 Kg/cm²) y drenaje. Finalmente, el relleno de la cavidad es con 6 000 m³ de material de caja compactado (sub-base clase 3) hasta el perfil del terreno natural (Fig. 4) (INIGEMM, 2017).



Figura 1: a) Labor minera (18 alto x 20 largo x 10 ancho). b) Galería que provocó la subsidencia del terreno en superficie. c) Explotación antitécnica e insegura.



Figura 2: a) Inicio de colapso con un cono de 10 m. b) Desestabilización de estructuras. c) Escombros (columnas, mangueras, cables, bloques) dentro de la galería que provocó la subsidencia del terreno en superficie.



Figura 3: a) Distribución espacial de los pilotes tipo caisson. b) Perfil con la ubicación de los pilotes en roca de resistencia blanda (16.76 MPa). c y d) proceso de armado de hierros ascendente. e) Proceso de fraguado de hormigón de 280 kg/cm²



Figura 4: a) Replantillo + drenes + viga perimetral + armado de hierro. b) Fundición de losa. c) Relleno con material compactado Sub-Base clase 3

Una consideración importante por mencionar en este plan de remediación, indica en la propuesta del INIGEMM (2017) no contempla la fase de relleno de excavaciones mineras, que consiste en inyectar desde superficie (perforaciones) un mortero con la mezcla de cemento + agregado; específicamente a la galería ubicada entre la base del cono y tapones previamente construidos en cotas inferiores. La razón de no proceder con el relleno hidráulico está ligado a la inseguridad para construir los tapones interior mina, por trabajos de mineros ilegales dentro de la zona de exclusión minera, evidenciando remoción de escaleras y elementos de apoyo, explosiones y personas fallecidas en el interior de las galerías.

En consecuencia, el desarrollo de esta investigación se basa en la realización de 4 modelos geológicos-geotécnicos; el primer modelo, considera el estado inicial antes de ocurrir la subsidencia por la presencia de excavaciones de galerías mineras. El segundo modelo, contempla la morfología del estado del cono vacío. El tercer modelo, contextualiza la inclusión de las obras de remediación (pilotes + losa + relleno) construidas por el INIGEMM (2017) y el cuarto modelo, configura el relleno con mortero en base a la mezcla de cemento y relave. Para ello, se cuenta con información del modelamiento geotécnico como: topografía de superficie y subterránea, 558 m. de testigos de 8 sondeos, parámetros físico-mecánicos y deformacionales de 63 muestras de roca y 12 cilindros de mortero (1 cemento y 2 relave).

Estos insumos permiten el análisis tenso-deformacional mediante modelos de elementos finitos, cuyo alcance es evidenciar las deformaciones del macizo rocoso antes y durante la conformación del cono y chimenea de colapso; y, posterior al relleno. Finalmente, posibilita fundamentar la propuesta para la estabilización de las zonas comprometidas en el área de estudio, mediante el relleno con mortero de relave; usando como agregado fino; arenas de relave. Además, esta

propuesta de relleno contribuye a la mitigación y reducción de los elementos contaminantes (lixiviado de relaveras) que son emitidos hacia los afluentes hídricos de la cuenca alta del río Puyango.

METODOLOGÍA

Para desarrollar los modelos tenso-deformacionales que evidencian el comportamiento antes del colapso y posterior a la remediación, se inició con el acostumbrado análisis del estado del arte en referencia al sitio de hundimiento.

El trabajo de campo se basó en datos y muestras tomados de la testificación geológica-geotécnica ejecutados durante la remediación del 2017, que fueron reinterpretados, siendo en total 558 m de testigos de 8 sondeos ubicados en la zona de colapso; complementando a este proceso se recolectó 63 muestras, cuyo objetivo es garantizar la caracterización del macizo rocoso a través de la determinación de laboratorio de índices, propiedades físico-mecánicas y deformacionales.

El establecimiento del modelo geológico-geotécnico, basado en información de superficie y perforaciones de los datos levantados en las expediciones de campo; así como, el detalle de la interpretación de registros litológicos de sondeos exploratorios; favorece el análisis de la distribución espacial de la lito-estratigrafía mediante perfiles geológicos, permitiendo además la modelación en 3D. La sectorización de la calidad de macizo rocoso se realizó en función de la clasificación geomecánica empírica RMR básico (Bieniawski, 1989).

Las muestras del macizo rocoso ensayadas en el laboratorio con el fin determinar los parámetros índices, físico-mecánicos que interviene en el algoritmo de cálculo del software, provienen de los ensayos; peso específico suelo (20 muestras), peso específico roca (20 muestras), corte directo (roca y suelo, 10 muestras), clasificación SUCS (20 muestras), velocidad sónica (20 muestras),

compresión simple con módulos/coeficientes elásticos (20 muestras), carga puntual (20 muestras).

La toma de muestras de relave se realizó en la Relavera Comunitaria “El Tablón” donde se depositan las arenas de relave producto de la recuperación aurífera de 85 plantas de beneficio operativas del distrito minero Zaruma-Portovelo. En total se muestreo 350 kg (14 saquillos) de relave de los procesos de cianuración, flotación y gravimetría.

Los criterios considerados en la elaboración de cilindros de mortero (cemento + relave), fue en base al diseño de un mortero que cumpla con las condiciones de resistencia y fluidez con la dosificación de; 1 cemento (C) y 2 de relave (R). Para su preparación se realizó el análisis en base a las Normas ASTM referente a los áridos en hormigón y mortero (Tabla 1, Fig. 5), con el fin de determinar si las arenas de relave son adecuadas o no.

Tabla 1. Requerimientos físicos-químicos que debe cumplir el árido fino (relaves).

Ensayo	Norma
Análisis químico	ASTME C 114
Finura, porcentajes de gravas, arenas y finos	ASTM C 637
Densidad, absorción	ASTM D 854
Resistencia a la compresión, en cubo de 50 mm de arista	ASTM C 109
Impurezas orgánicas	ASTM C 40
Material más fino que 75 um (Tamiz N°200)	ASTM C 117
Contenido de aire del mortero	ASTM C 185-02
Determinación de flujo en morteros (SLUMP TEST)	ASTM C 1437

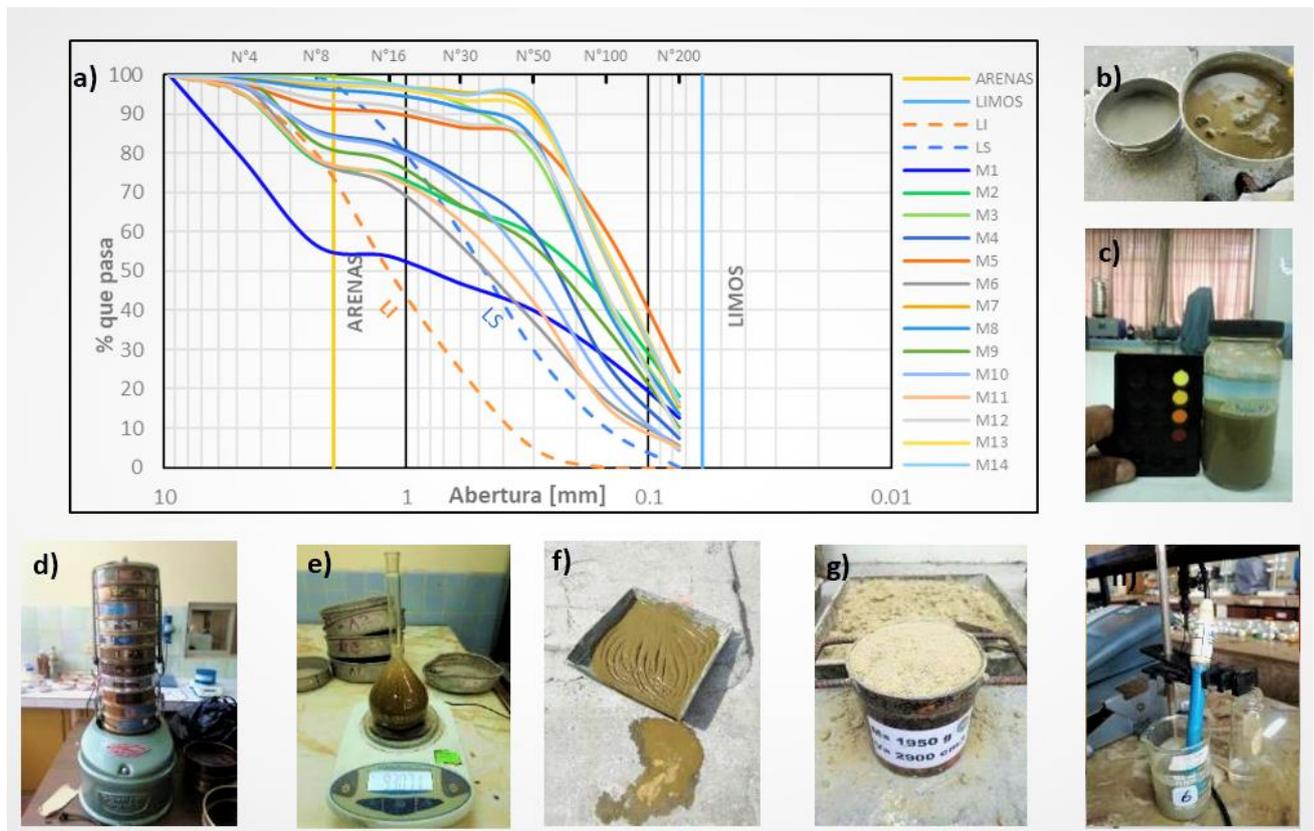


Figura 5 Análisis en base a las normas ASTM. **a)** Curvas granulométrica del relave respecto a 14 muestras obtenidas de la Relavera “El Tablón”. **b)** Saturación de la superficie del relave para el cálculo de material más fino que 75 um. **c)** Impurezas orgánicas en el relave minero, de acuerdo al comparado normalizado de colores tiene un valor de 1, adecuado para su uso en hormigones o morteros. **d)** Ejecución de ensayo de granulometría. **e)** Cálculo de densidades relativas; húmeda, seca y aparente, % de absorción del relave. **f)** Saturación de 1kg de relave mezclado de los tres procesos (cianuración, flotación y gravimetría). **g)** Cálculo el peso volumétrico del relave promedio con un valor de 1 596.12 kg/m³. **h)** Medición de potencial Hidrógeno (pH). en muestra de relave.

El análisis tenso-deformacional pseudo-estático en base al modelo geológico-geotécnico, parámetros índices, resistentes, elásticos del macizo rocoso y de las probetas de mortero (1C:2R), favorecerá la determinación de la ocurrencia de fenómenos de subsidencia bajo 4 escenarios; antes del colapso, durante, posterior a las obras de mitigación y propuesta de relleno en mortero con relave.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Modelo Geológico-Geotécnico

En el contexto geológico regional, la escuela La Inmaculada se localiza en una zona de transición geológica al sur del Ecuador, donde los ambientes geodinámicos involucran rocas metamórficas (Paleozoico-Mesozoico) del Bloque Amotape Tahuín (BAT) y las secuencias volcanoclásticas de origen arco volcánico continental denominada como Unidad Portovelo (Oligoceno), cuyo límite tectónico en el extremo sur se configura por la falla

Piñas-Portovelo y en el extremo norte por la Falla Palestina. Dentro del contexto minero, el área de estudio se ubica en el distrito aurífero Zaruma-Portovelo, donde se emplazan un sistema de filones de cuarzo (sistema Riedel) con altos contenidos de minerales económicamente rentables (Au, Ag, Cu), alcanzando longitudes entre 2.5-3.5 km con potencias variables entre 0.3 a 3 m, estas vetas mantienen un rumbo preferencial N-S y buzamientos variables al E. (Bonilla, 2009).

En la chimenea de colapso y galerías del sector afloran secuencias volcano-sedimentarias conformadas por tobas andesíticas, tobas de cristales y andesitas. El macizo rocoso se presenta moderadamente fracturado con incipiente mineralización y el desarrollo de diferentes grados de meteorización, aflorando en superficie coberturas de suelo residual (arcilla). La delimitación de los niveles de meteorización permitió zonificar 5 unidades geotécnicas, diferenciadas por su comportamiento en relación a su resistencia (Tabla 2).

Tabla 2. Zonificación de la Unidades Geotécnicas en relación al comportamiento de su resistencia a la compresión simple (datos de laboratorio).

U. Geotéc.	Meteor. Roca	Descripción	Resistencia	
			Clase Lab	(MPa)
UG-I H: 4-15m	Suelo Residual	Suelo arcilloso de coloración naranja oscuro, de alta plasticidad de consistencia blanda y alta humedad natural.	S2-S3	0.08
UG-II H: 6-15m	Completa	De coloración gris blanquecina, constituida principalmente por arcilla-limosa de alta plasticidad de consistencia blanda y alta humedad natural, ocasionalmente fragmentos de roca de hasta 2 cm.	S4-S5	0.14
UG-III H: 8-18m	Alta	De coloración gris clara con tonalidades oscuras, constituida por limo-arenosa de moderada plasticidad y consistencia, es común encontrar encapsulamiento de tobas y andesitas resistentes algo descompuestas y humedad natural moderada.	S5-S6	0.38
UG-IV H: 8-15m	Moderada	Rocas de color gris oscuro con tonalidades verdosas, dominante textura afanítica. Su grado de resistencia gradualmente incrementa con la profundidad.	R1-R2	16.76
UG-V H: >25m	Fresca-Ligera	De coloración gris oscura, ligeramente verdosa en superficies frescas, juntas cerradas y abiertas, rellenos con minerales duros, reblandecidos y de baja fricción. Las tobas son afaníticas y las andesitas presentan una paragénesis mineral de: plagioclasa + vidrio volcánico + anfíbol + clorita ± epidota.	R3-R4	30.70

Nota: S2 (suelo débil), S3 (suelo firme), S4 (suelo rígido), S5 (suelo muy rígido), S6 (suelo duro), R1 (roca muy blanda), R2 (roca blanda), R3 (roca moderadamente dura), R4 (roca dura).

La figura 6, representa el modelo geológico integrando la distribución espacial de las galerías que aprovecharon la veta “Tres Reyes” (sólido azul)

desde el denominado nivel Chorillos L1/3 (cota: ±1050 m.s.n.m.), ascendiendo por múltiples excavaciones mineras (secciones tipo baúl-

irregulares entre ± 5 y ± 45 m²) inclinadas a 45° (rebajes). La galería ubicada en la cota ± 1158 m.s.n.m (sólido magenta) fue la causante de la inestabilidad del macizo rocoso bajo la escuela La Inmaculada, donde los factores condicionantes (baja carga litostática, intensa meteorización, estructuras geológicas desfavorables, propiedades geomecánicas mínimas) y desencadenantes (altas precipitaciones, carga estática de las aulas, carga

dinámicas por voladuras, cambio del estado tensional por excavaciones mineras) incidieron en la pérdida de resistencia del macizo rocoso, produciéndose inicialmente un acelerado fenómeno de subsidencia del terreno para consecutivamente producirse el hundimiento con la conformación de un cono de hasta 23 m de diámetro (cota ± 1206 m.s.n.m.) y chimenea de colapso de ± 40 m de longitud (sólido rojo), (INIGEMM,2017).

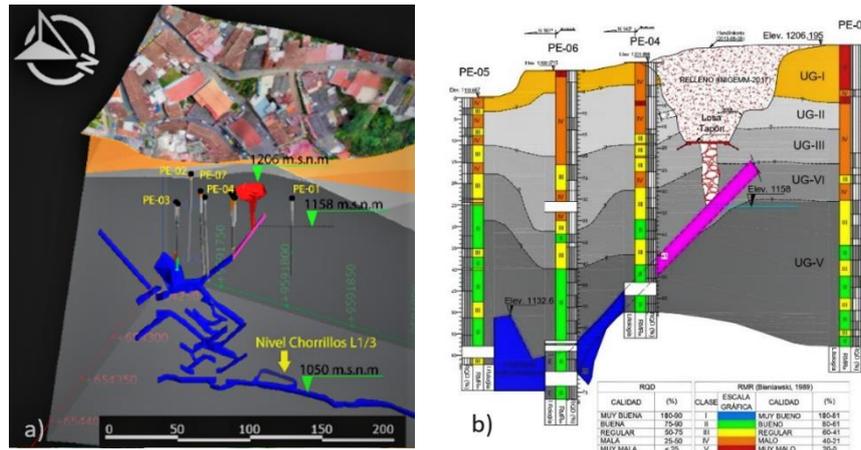


Figura 6: a) Modelo geológico-geotécnico en 3D. b) Sección entre los sondeos exploratorios PE-01, PE-04, PE-06, PE-05, donde se representa; 5 niveles de meteorización, RQD y la calidad del macizo rocoso según Bieniawski,1989.

Fuente: Modificado INIGEMM (2017) y Rivadeneira, A. (2021).

Parámetros Físico-Mecánicos del Macizo Rocos, Material de Relleno y Relleno con mortero de relave.

En la tabla 3, se resume los parámetros físico-mecánicos y elásticos, descritas a:

- *Macizo rocoso*, se refiere al muestreo de 63 núcleos de perforación (diferentes cotas) tomando como referencia los niveles de meteorización (UG-I, II, III, IV, V), que fueron sometidas a ensayos de corte directo y resistencia a la compresión simple con módulos elásticos. En los sistemas de discontinuidades predominantes (D1 y D2) se calculó la cohesión y ángulo de fricción mediante el criterio empírico de rotura de Barton-Bandis (1990).
- *Material de escollera*, se refiere a bloques de rocas angulares de composición andesítica con diámetros variables entre 0.70 a 1.20 m, que se disponen trabadas (remordidas) dentro de la cavidad de la chimenea de colapso. La cohesión, es asumida de cero por el lavado de la matriz en épocas de invierno. Los parámetros resistentes y elásticos son determinados del diagnóstico bibliográfico de la Guía de escolleras (2009) y Perucho, Á. (2004).

- *Material compactado sub-base clase 3*, se refiere al material de caja (roca estéril) de composición andesítica, que las empresas mineras desechan en escombreras. El diseño de este relleno fue calculado para una compactación de 2 mm de penetración al 95% con una humedad óptima del 10.74% y densidad de 2.0 kg/m³. Los parámetros resistentes se basan según Lambe, T. et al., (2010). El cálculo de Módulo elástico fue mediante correlaciones empíricas expuestas en el trabajo de Rondón, H. (2013), usando el valor de 3% de CBR obtenido de laboratorio.
- *Relleno con mortero de relave*, se refiere al diseño de un mortero en base a la metodología de Rivera, G., 2013, basado en el cálculo de volúmenes absolutos de cemento (C), relave(R) y agua(A), con una relación óptima de 1C: 2R: 0.49 A/C para la fabricación de briquetas (Fig. 7) y cilindros. Los datos obtenidos de análisis del agregado fino (relave minero) cumplen en un 95% las características requeridas para la conformación de morteros de fluidez y resistencia deseado. El 5% relaciona el módulo de finura con un valor menor a 2.3, indicando que en la mezcla se debe adicionar mayor cantidad de cemento y modificar la dosificación final (Rivadeneira, A.,2021).

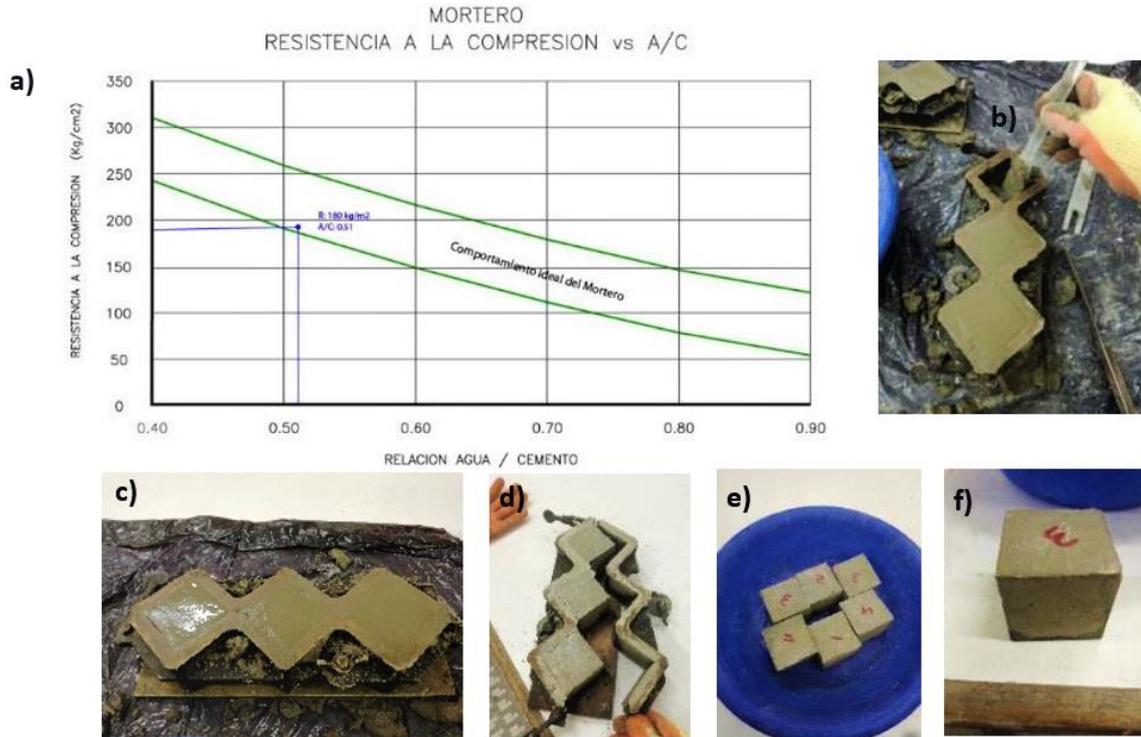


Figura 7 a) Resistencia obtenida a los 28 días en briquetas de 50 mm de arista: La curva de coloración verde delimita la relación agua/cemento en función de la RCS ideal. Fuente: Modificado de Rivera, G. (2013). **b)** apisonado de la mezcla por capas (25 veces) dentro de moldes de bronce. **c)** enrazado final de los cubos de mortero. **d)** retiro de los moldes de bronce después de 24 horas aproximadamente de fraguado. **e)** cubos de mortero numerados y llevados al cuarto de curado. **f)** cubo de mortero a ensayar después de 14 días de curado

El porcentaje de fluidez se relaciona para un mortero de consistencia fluida (morteros autonivelantes), cuya manejabilidad podrá ser manual o mediante inyección. Para cumplir los requerimientos de resistencia se aplicó la ecuación 1:

$$R'_{mm} = 1.35 \times R'_m \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

R'_{mm} (MPa): Resistencia a la compresión del mortero de dosificación a los 28 días (cubos de arista).

R'_m: Resistencia a la compresión del mortero a los 28 días, de acuerdo a un mortero Tipo M (RCS= 17.5 MPa)

Para verificar si el mortero Tipo M, cumple con la resistencia normada (17.5 MPa) se establece la siguiente condicionante:

$$1,20 \times F'_m \leq R'_m \leq 1,50 \times F'_m$$

Dónde:

F'_m (kg/cm²): Resistencia a la compresión de diseño requerida es de 21 MPa.

Finalmente, se obtuvo una resistencia de las briquetas a los 14 días de curado de 18 MPa con una relación de agua-cemento de 0.49. La cantidad de cemento en relación al módulo de finura viene dada por 602.10 kg/m³ de mezcla, una cantidad de agua inicial 295.03 kg/m³ y 1136.14 kg/m³ para una proporción inicial de 1(Cemento): 2(Relave). Una vez diseñado la dosificación del mortero se elaboró cilindros de mortero para determinar; parámetros resistentes y elásticos que fueron obtenidos mediante ensayos triaxiales y compresión simple aplicado a doce muestras. Cabe destacar que la rotura fue a los 14 días de curado, tiempo en el cual, el mortero alcanza teóricamente el 90% de su resistencia máxima.

Análisis Tenso-deformacional

A partir del ambiente geológico-geotécnico, propiedades físico-mecánicas-elásticas, cargas distribuidas y condiciones pseudoestáticas, se procesó 4 escenarios representados a través de perfiles longitudinales que corren paralelo a la veta “Tres Reyes”, mediante el análisis tenso-deformacional por elementos finitos.

Tabla 3. Resumen de parámetros índice, resistentes y deformaciones, obtenidos de ensayos de peso específico, corte directo, clasificación SUCS, velocidad sísmica, compresión simple y carga puntual.

Código	Material/ estructura	Descrip.	Análisis		γ [KN/m ³]	ϕ [°]	C [MPa]	E [MPa]	ν	
			Tipo	No.						
UG-I	Suelo	MH	Laboratorio- Hoek & Brown (2002)	7M	27.08	29.00	0.091	37.72*	0.1**	
UG-II		MH		9M	27.08	39.49	0.058	158.91*	0.1**	
UG-III		MH		5M	27.00	42.59	0.070	346.19*	0.1**	
UG-IV		Roca		Tobas	8M	27.42	45.96*	0.09*	20748	0.1
UG-V				Tobas	34M	26.82	64.68	0.054	24930	0.1
UG-R	Relleno Compact.	Sub-Base clase 3	F. Bibl	5	27.08	40	0.005	35.97	0.35	
UG-E	Escollera	Andesita/Tobas	F. Bibl	5	27.08	45	0.00	60.08	0.25	
UG-RH	Relleno con mortero	1C:2R (14 días)	Labor.	12ME	19.32	47	1.361	7359	0.17	
UG-P	Concreto	Pilote Caisson	F. Bibl Selim,2017	5	24.00	38	2.109	30000	0.15	
D-1,D-2	Discontin.	Familia de Diaclasa	Barton- Bandis (1990)	160 DE	-	22.32	0.016	-	-	

Fuente: INIGEMM (2017)

Nota: γ (peso específico), ϕ (ángulo de fricción), C(cohesión), E (Módulo Deformación), ν (Coeficiente Poisson); #M (número de muestra), F Bibl. (fuente bibliográfica). #DE (número de datos estructurales). Con asterisco (*) se identifica parámetros resistentes y deformaciones calculados mediante el criterio de rotura empírico de Hoek-Brown (2002) y con doble asterisco (**) los valores asumidos de coeficiente de Poisson por igualdad de litología.

La modelización numérica permitió conocer el comportamiento del macizo rocoso, en el que las salidas gráficas contornean isolíneas (escala de colores cálidos y fríos) y vectores de: desplazamientos, tensiones y deformaciones en referencia a las excavaciones mineras; permitiendo deducir zonas con riesgos de inestabilidad (zonas altamente plastificadas) y mecanismos de rotura.

El análisis se enfoca a dos escenarios iniciales, al cual estuvo sometido el cono y chimenea de colapso en la escuela La Inmaculada, es decir; antes de la conformación del cono, durante la conformación del cono y chimenea de colapso, y luego de la remediación por parte del INIGEMM (2017). El cuarto escenario es la propuesta de relleno con

mortero desde la superficie usando un mortero de cemento con arenas de relave.

Escenario 1: Modelo antes de la conformación del cono y chimenea de colapso (25/oct/2016).

Modelo Geológico: En la figura 8a, se observa la distribución espacial de los niveles de meteorización conjuntamente con los sistemas de diaclasamiento principales (D1 y D2). En blanco se representa la ubicación de excavaciones mineras (rebajes) que ascienden desde la galería horizontal "Chorrillos L1/3". Con vectores de coloración roja se representa la carga muerta de la escuela La Inmaculada y con línea azul la posición del nivel freático (NF).

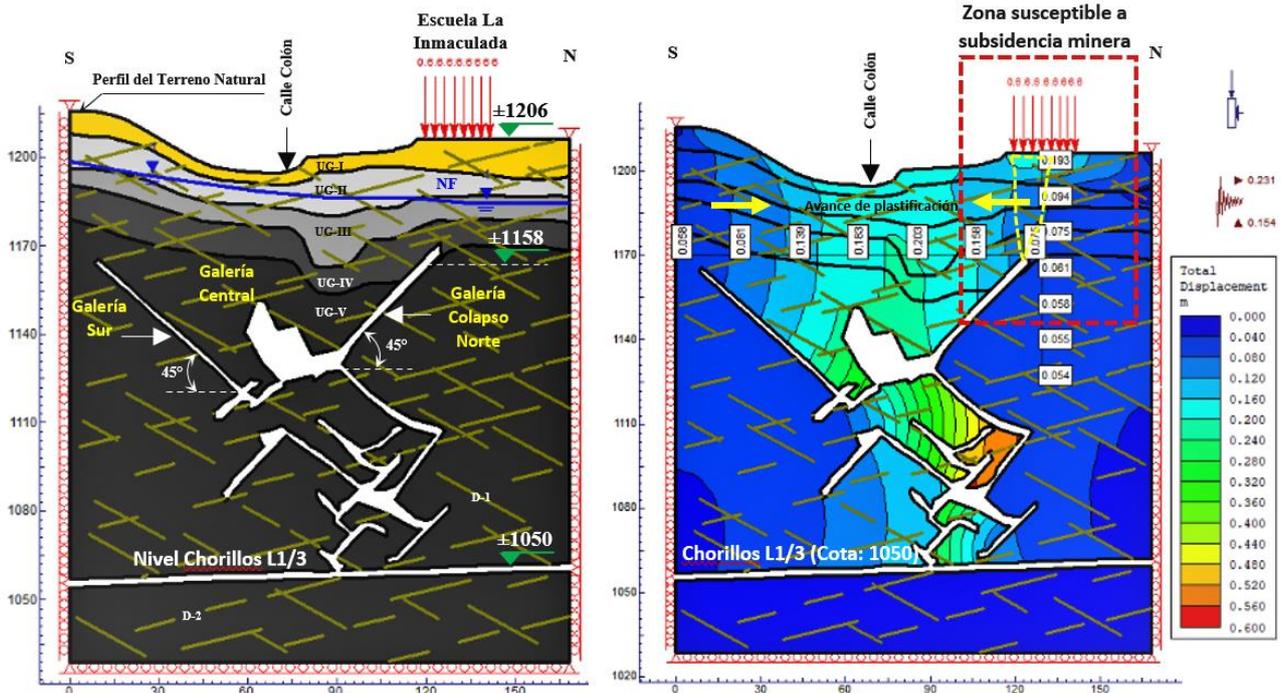


Figura 8: a) Modelo Geológico previo al colapso. b) Modelo tenso-deformacional con desarrollo de zonas plastificadas. En el sector de la escuela La Inmaculada se evidencia zona perturbada, las isolíneas demarcan la configuración de cono y tendencia de la chimenea de colapso (Línea amarilla).

Modelo Tenso-deformacional: En la figura 8b, se observa el comportamiento de la deformación total, alcanzando valores de 20 mm en la zona donde se ubicaba la escuela La Inmaculada. Se observa un avance de la plastificación (L: 90 m) desde la galería sur (cota: 1166 m.s.n.m) hasta la galería norte (cota: 1163 m.s.n.m.) con deformaciones

máximas de hasta 30 mm sobre la galería central (28 m x 18 m). En la parte central inferior se concentra una tendencia a incrementar la deformación, esto; responde a la configuración geométrica de las galerías excavadas de forma antitécnica, llegando incluso al aprovechamiento de los pilares que brindan seguridad.

Escenario 2: Modelo durante la conformación del cono y chimenea de colapso (21/feb/2017).

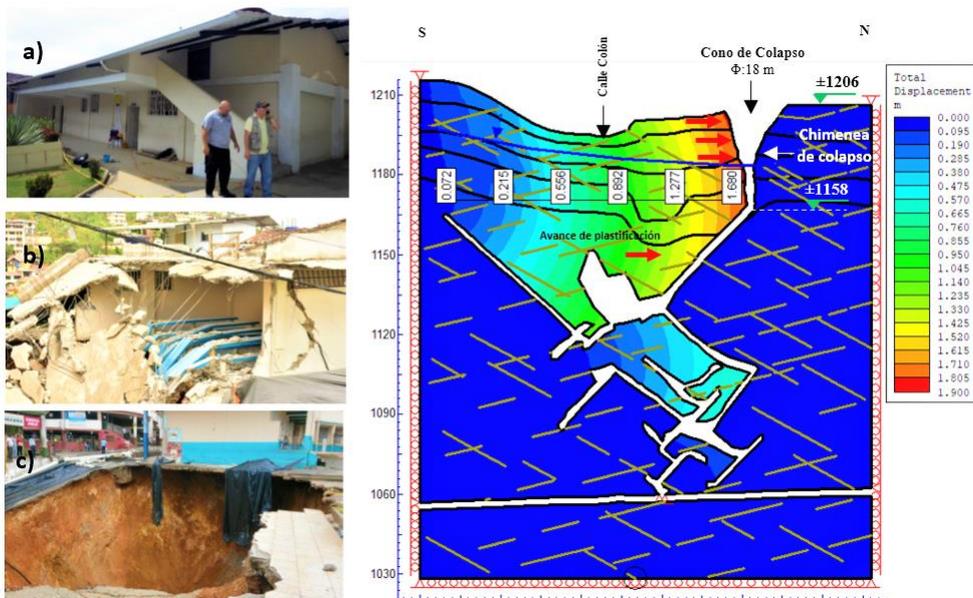


Figura 9: a) Aula de la escuela La Inmaculada (oct-2016). b) Colapso del Aula. c) Cono ($\Phi: 18\text{ m}$) y chimenea (L: 34m). d) Modelo tenso-deformacional donde la deformación se desarrolla paralelo a paredes de la chimenea de colapso alcanzado desplazamientos de hasta 1.90 m.

Modelo Tenso-deformacional: En la figura 9d, se observa el comportamiento de la deformación en el sector de la chimenea de colapso, donde la plastificación evidencia desplazamientos de 1.90 m. Las isolíneas de deformación muestran el relajamiento del macizo rocoso hacia el interior del cono. Este modelo representa el comportamiento de inestabilidad del cono y chimenea de colapso, que desde su formación desarrolló siete eventos de inestabilidad; iniciando el 25 de octubre de 2016 con un cono de 10 m hasta el 20 de febrero de 2017 donde el cono alcanzó 31 m de diámetro. La modificación del estado de tensiones generó un desequilibrio al momento de producirse el hundimiento del terreno, provocando el colapso de paredes de la chimenea (roturas circulares).

Escenario 3: Modelo – Remediación INIGEMM (2017) (Pilotes+Losa+Relleno compactado)

Modelo Geológico: En la figura 10a, se observa el medio geológico descrito anteriormente y las obras de remediación que culminaron en octubre de 2017, donde se incluye; la construcción de 12 pilotes tipo caisson de 1.20 m de diámetro y longitud promedio de 19 m, 32 m de pantalla perimetral de sostenimiento en hormigón armado, construcción de una losa tapón soportada en vigas corridas y estas a su vez, apoyadas en 16 micropilotes. Finalmente, se concluye los trabajos con el relleno compactado para reconstituir a las condiciones topográficas del terreno natural. Además, se esquematiza el material de escollera dentro de la chimenea de colapso, este relleno fue parte de la solución emergente, ejecutada por GADM de Zaruma en febrero de 2017 con asesoría de la Secretaría de Gestión de Riegos.

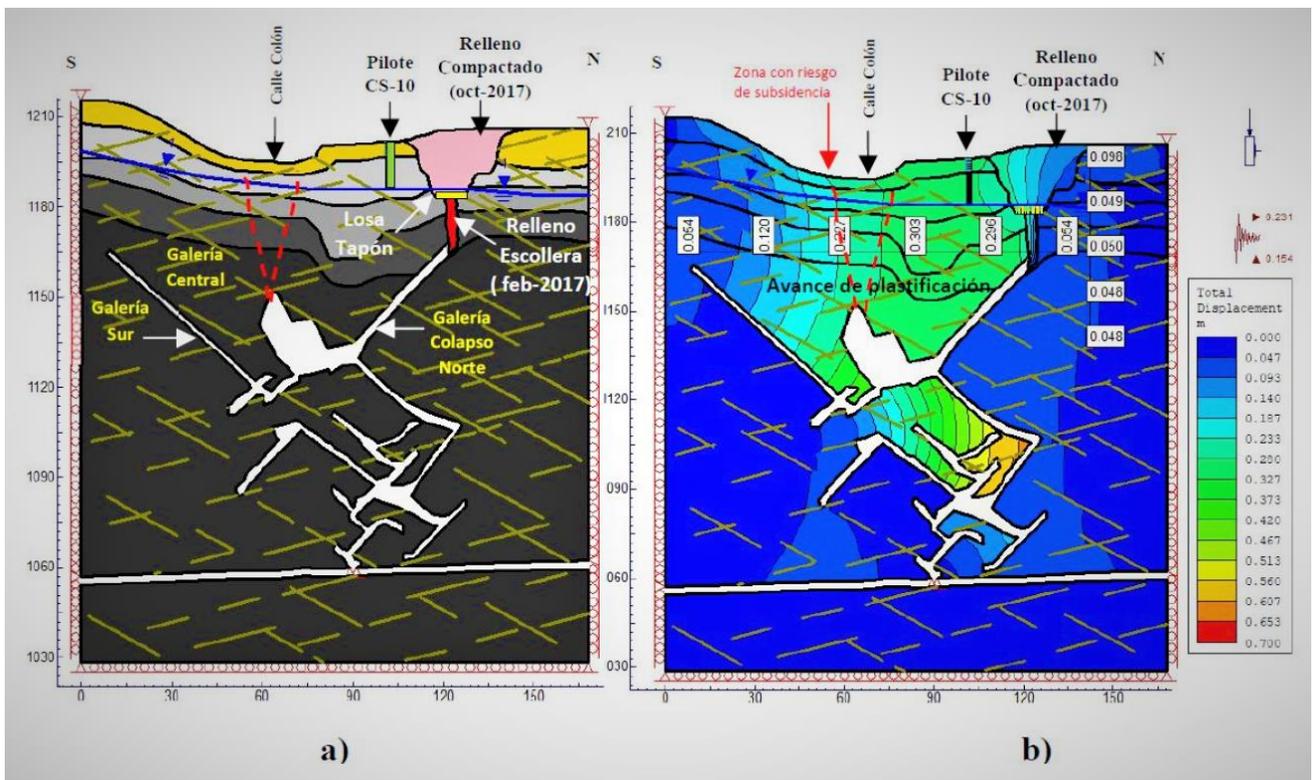


Figura 10: a) Modelo geológico con la ubicación de obras de mitigación; pilote, losa tapón y relleno compactado, b) Comportamiento de la deformación posterior a la implementación de obras de remediación, se destaca zona plastificada donde el macizo rocoso puede acelerar un fenómeno de subsidencia por cavidades de grandes dimensiones (Av. Colón y Ernesto A. Castro)

Modelo Tenso-deformacional: En la figura 10b, se observa el comportamiento de la deformación total, posterior a la implementación de las obras de remediación alcanzando valores de 5 mm en la zona donde se realizó los trabajos de pilotaje + losa tapón + relleno, evidenciando que la propuesta de

estabilización implementada por el INIGEMM (2017) fue efectiva. Cabe destacar que el avance de la plastificación desde la galería sur hasta la galería norte mantiene deformaciones máximas de hasta 30 mm sobre la galería central, es decir, el área donde se ubica la escuela La Inmaculada mantiene una

aparente estabilidad, la cual está ligada a la deformación de las galerías que no tuvieron ningún tratamiento.

Escenario 4: Modelo con propuesta de relleno con mortero (cemento+relave)

Modelo Geológico: En la figura 11a, se muestra el medio geológico, las obras de mitigación y la

propuesta de relleno con un diseño de mortero (1 cemento: 2 relave). La inyección de excavaciones mineras se plantea desde la superficie mediante 5 sondeos (ejecutados en el 2017: SE-3, SE-4, SE-5, SE-6, SE-7). Previamente al relleno se debe construir topones de hormigón armado que obturen las galerías mineras con el propósito de cerrar el sistema de inyección.

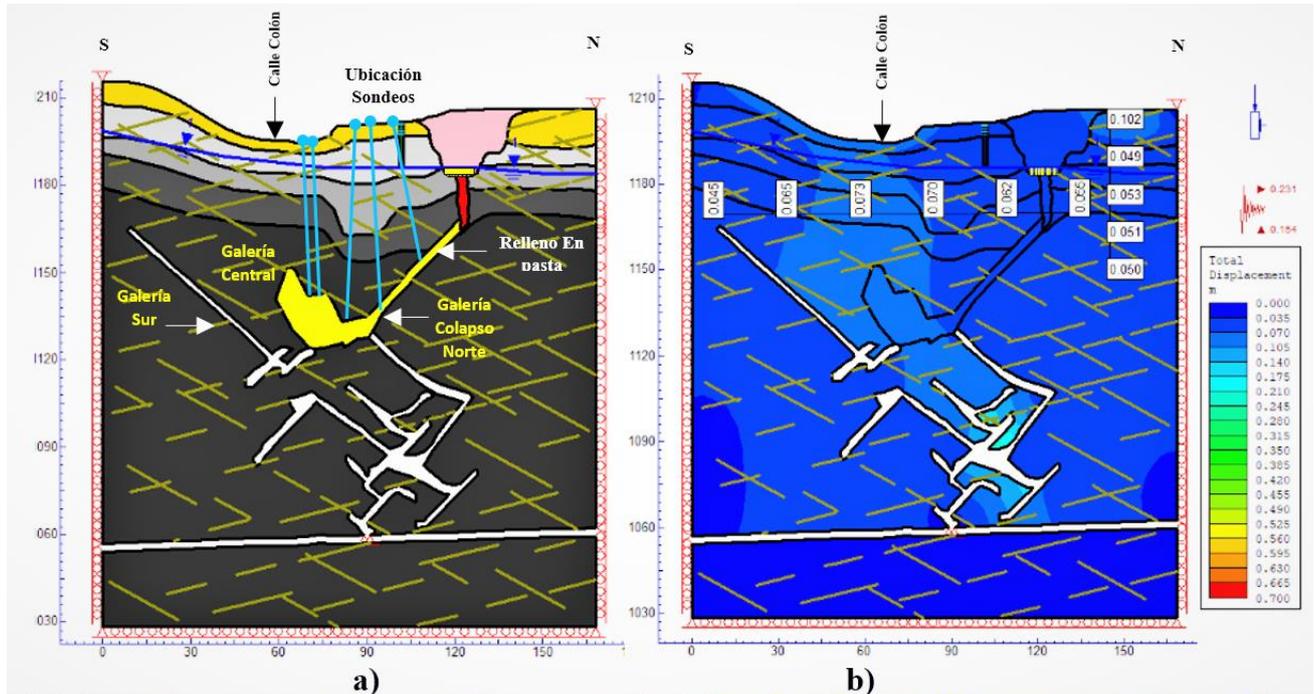


Figura 11: a) Modelo geológico, obras de mitigación y relleno de mortero. b) Comportamiento de la deformación posterior al relleno en mortero.

Modelo Tenso-deformacional: En la figura 11b, se observa la efectividad del relleno con mortero usando arenas de relave como agregado fino, el mortero diseñado a los 14 días alcanzó una resistencia a la compresión simple de 10 MPa. El modelo tenso-deformacional específicamente en la zona de relleno evidencia valores menores a los 6 mm. El comportamiento general de la deformación en relación a otras galerías disminuye sustancialmente, es decir, el avance de las zonas plastificadas se atenúa una vez estabilizada las excavaciones superiores.

CONCLUSIONES

Los cuatro modelos tenso-deformaciones evidencian el estado de plastificación del macizo rocoso, por la presencia de las galerías mineras bajo las inmediaciones de la escuela La Inmaculada. En figura

12a se recoge los resultados de la investigación, relacionando la deformación para cada evento con la ubicación de las galerías en la sección longitudinal con dirección norte-sur:

- *Escenario 1, Antes del Colapso (octubre 2016):* La curva de deformación es máxima en la zona comprendida entre la galería central y la galería norte; alcanzando valores de desplazamiento entre 10 mm a 20 mm, es decir, el desarrollo y avance de estas galerías perturbó el estado tensorial, derivando en la plastificación del macizo rocoso entre las abscisas 0+50 y 0+132.
- *Escenario 2, Cono vacío (febrero 2017):* Desde el primer evento de inestabilidad, el cono y chimenea de colapso incrementó su diámetro por la distensión de la roca y la modificación de estado de esfuerzos, factores condicionantes (litología, estructuras geológicas favorables, meteorización) y desencadenantes (cargas estáticas y dinámicas por voladuras y sismos,

alteración del estado tensional, infiltración de agua de escorrentía), permitieron una disminución de la resistencia del macizo rocoso, provocando la subsidencia del terreno para consecutivamente producirse el hundimiento del mismo.

- **Escenario 3, Remediación (octubre 2017):** Las obras de mitigación diseñadas por el INIGEMM (2017) en la zona bajo la escuela La Inmaculada, minimizó la deformación hasta los 5 mm, logrando la estabilidad de este sector, en cambio la deformación entre la galería central y galería norte (abscisas 0+50 y 0+132) presentan valores de hasta los 30 mm, demarcando una zona susceptible a la subsidencia minera. Es imperante que las autoridades competentes consideren las siguientes sugerencias:
 - La implementación de un monitoreo geodésico periódico de la zona comprendida entre los predios de escuela La Inmaculada y la intersección de las calles Ernesto A. Castro y Av. Colón (UTM: 654366.6088E, 9591776.6322N.), por considerarse como una zona susceptible al desarrollo de subsidencia (riesgo de colapso).
 - Descartar el tránsito vehicular e impedir la construcción de nuevas edificaciones sobre la zona de relleno y en las inmediaciones de la calle Ernesto A. Castro hasta posibilitar la implementación de una obra de remediación que ofrezca estabilidad.

- Construir un sistema de drenaje superficial para encausar el agua de escorrentía, con el objetivo de evitar el lavado de finos y así reducir fenómenos de asentamientos diferenciales en la zona de relleno.

- **Escenario 4, Relleno con mortero de relave (propuesta):** La curva de deformación muestra valores menores a 7 mm, revelando la posibilidad de relleno en base a mortero de cemento con relave (Fig. 12 b, c, d, e), con un favorable comportamiento mecánico del macizo rocoso por devolver el estado tensional perdido, desapareciendo los efectos de subsidencia. Lo cual afianza la replicabilidad de relleno con mortero en otras galerías existentes bajo la ciudad de Zaruma, tomado como referencia la cota ideal para ubicar los taponos, sobre los 1110 m.s.n.m. Por otro lado, es una propuesta efectiva frente a la solución de la problemática de contaminación ambiental de la cuenca alta del río Puyango causado por los lixiviados de las relaveras.

Cabe destacar que esta investigación preliminar demuestra la factibilidad que la propuesta de inyección de la mezcla cemento y relave, minimiza la plastificación de la roca en torno a las excavaciones mineras. Faltando la realización de estudios necesarios para diseñar la dosificación ideal de cemento con relave (relleno con mortero), que está sujeta al conocimiento de variables como; parámetros físico-mecánicos, inertización de los metales pesados, costos y procesos operacionales.

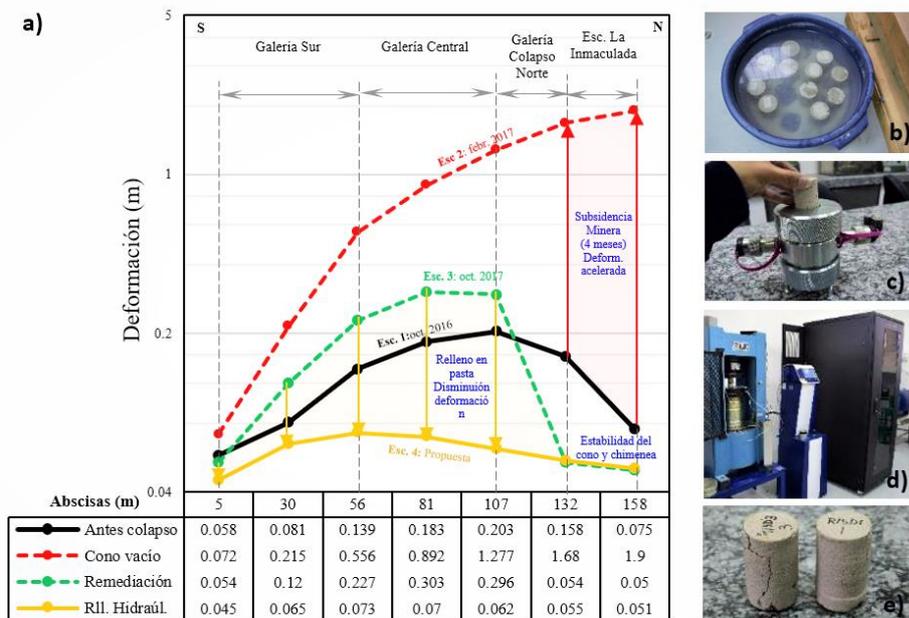


Figura 12: a) Relación entre la distancia en eje x (Escenarios 1-4) y la deformación máxima para los eventos: antes del colapso (octubre 2016), ampliación paulatina del cono y chimenea de colapso (febrero 2017), implementación de obras de remediación (octubre 2017). b) Cilindros de mortero (1C:2R) c) Célula Hoek para ensayo triaxial d) Ejecución de ensayo de compresión simple con módulos e) Cilindros de relave y cemento luego de rotura.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido patrocinado por la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central del Ecuador, con el fin de difundir resultados científicos de estudios geológicos y geotécnicos. Agradecemos al INIGEMM (actual IIGE) por su autorización para usar los datos del “*Estudio multidisciplinario para la estabilidad del cono y chimenea de colapso de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe Y Alegría” – Cantón Zaruma*”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N.R. and Bandis, S., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In *Rock joints, proc. int. symp. on rock joints*, Loen, Norway, (eds N. Barton and O. Stephansson), pp. 603-610. Rotterdam: Balkema.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications. John Wiley, New York, 251.
- Bonilla W., 2009. *Metalogénica del Distrito Minero Zaruma-Portovelo República del Ecuador*, Tesis Doctoral, pp. 219.
- Guía de escolleras, 2009. *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera*, 3ª edición: 36 pp.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002. *Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition*. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, pp. 267-271.
- Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico – INIGEMM, 2017. *Estudio multidisciplinario para la estabilidad del cono y chimenea de colapso de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe Y Alegría” – Cantón Zaruma*: pp. 546.
- Lambe, T. W., y Whitman, R. V., 2010. *Mecánica de suelos*. 1a ed. México, D.F.: Limusa: pp. 163.
- Perucho, Á., 2004. *Estudio de deformabilidad de escolleras*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM): pp. 69-72.
- Reyes, A., Valverde, E., Ordóñez, J., Romero, M., 2014. *Historia del Cantón Zaruma*. Colección: Historia de la Provincia de El Oro. Machala – Ecuador: pp. 267.
- Rivadeneira, A., 2021. *Relleno pasta aplicando un modelo de estabilidad en excavaciones subterráneas, mediante caracterización química y geotécnica del relave, bajo el hundimiento de la unidad educativa “fe y alegría”, en la ciudad de Zaruma, provincia de El Oro*. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Rivera G., 2013. *Concreto Simple*. Civilgeeks.com - Universidad del Cauca-Cap 9: pp. 203.
- Rondón, H., Fernández W. y Hernández J., 2013. *Influence of Subgrade and Unbound Granular Layers Stiffness on Fatigue Life of Hot Mix Asphalts – HMA*. Tecnológicas: pp. 57-59.
- Selim P., Amir G., Ertekin O., Metin H., y Serhat D., 2017. *Experimental Determination of Cohesion and Internal Friction Angle on Conventional Concretes*. ACI Materials Journal: pp. 407.