

Interacción entre un chancador, una pared MSE y un acopio de una mina en Perú

Erick LINO^{a,1} Osvaldo LEDESMA^b and Alejo SFRISO^b

^aSVS Ingenieros S.A., Grimaldo del Solar 875, Miraflores, Lima, Perú

^bSRK Consulting (Argentina) S.A., Rivadavia 926 Suite 901, Buenos Aires, Argentina

Resumen. Este documento describe dos modelos numéricos que se hicieron para estudiar la interacción dinámica entre un chancador, una pared de tierra estabilizada mecánicamente y un acopio para el chancador primario en un importante proyecto minero en Perú. Los modelos fueron implementados en el programa de elementos finitos Plaxis 2D AE y apuntaban a evaluar la interacción entre el chancador y el relleno de tierra, el efecto de la posición del acopio sobre el comportamiento de la estructura y el factor de seguridad para diferentes posiciones del acopio con respecto a la estación de chancado. Este artículo presenta los detalles y resultados de estos modelos.

Palabras claves. Interacción suelo-estructura, métodos numéricos, geomecánica computacional, pared estabilizada mecánicamente, análisis dinámico.

1. Introducción

SRK Consulting, como parte de sus actividades, tuvo que tratar con un proyecto difícil ubicado en la parte central de Perú. La estación de chancado primario del proyecto minero en evaluación, que es una parte importante de los procesos de operación de la mina, interactúa con un acopio de mineral ubicado en la superficie detrás de la pared de chancador. El comportamiento estático y dinámico de la estación de chancado primario es de mucho interés para la mina debido a la compleja interacción entre el chancador y el acopio ubicado detrás de la estructura.

Para evaluar la interacción entre los componentes descritos, los autores desarrollaron modelos numéricos en el programa de elementos finitos Plaxis 2D AE. El objetivo fue evaluar: i) la presión de contacto entre la Pared MSE y el chancador primario para diferentes posiciones del acopio; ii) los desplazamientos de la estructura como resultado de la carga estática del acopio y después de carga sísmica, incluidos los efectos del movimiento del terremoto en el acopio mismo; iii) el factor de seguridad para cada escenario por el método de reducción de resistencia disponible en Plaxis; y iv) proporcionar elementos de diseño para la optimización operacional de la ubicación del acopio con respecto a la estación de chancado.

¹ Autor Correspondiente.

2. Geometría del Modelo

El problema de la interacción entre el chancador y la pared de tierra reforzada que lo rodea es de naturaleza tridimensional, como se muestra en la Figura 1 y por ende, no se puede reducir a un solo problema 2D sin un compromiso serio de capacidad predictiva. Sin embargo, para la exactitud requerida para este estudio, los autores consideraron que la evaluación de la interacción se podría lograr por medio del análisis de dos secciones representativas, aquellas que se muestran en la Figura 2.

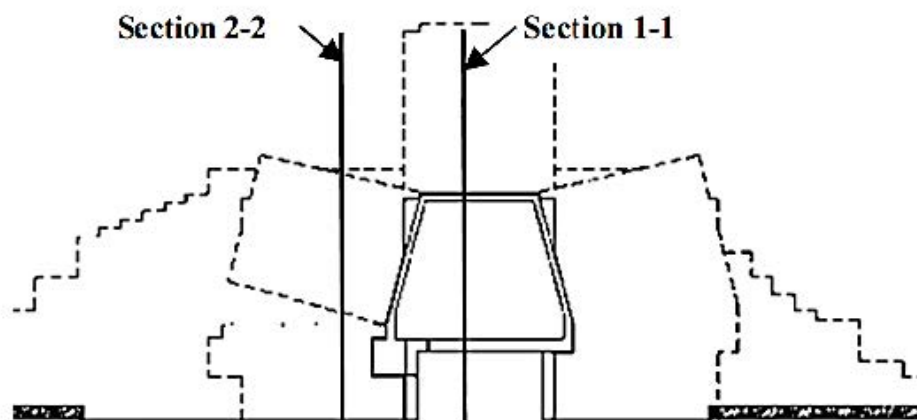


Figura 1. Vista en planta del chancador y la pared de tierra reforzada

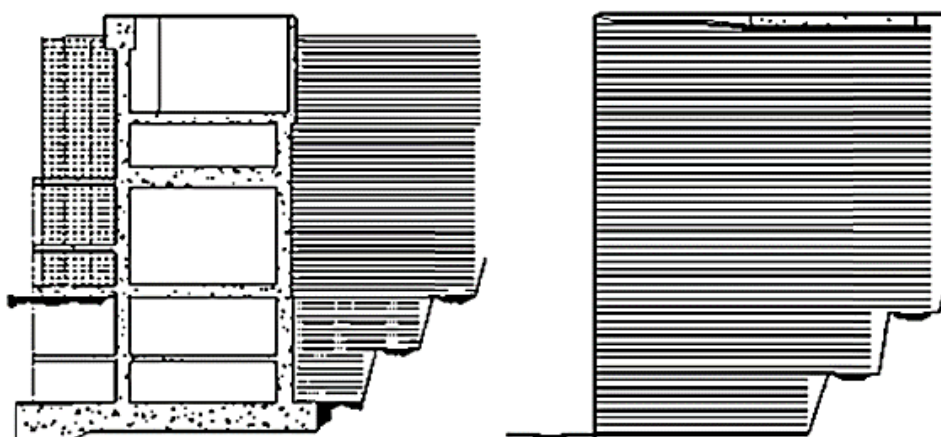


Figura 2. (Izq.) Sección 1-1 (incluye chancador). (Der.) Sección 2-2 (pared MSE)

Las dimensiones del modelo son 350 m x 80 m para la Sección 1 y 350 m x 100 m para la Sección 2. El chancador tiene una altura máxima de 39,5 m, desde su fundación hasta la parte superior de la estructura de concreto. Se modelaron varias etapas de construcción. Primero, el chancador alcanza el nivel 4.706 m.s.n.m, seguido de la Pared MSE. Después de que toda la estructura del chancador esté construida hasta el nivel 4.721 m.s.n.m y finalmente se construye el relleno de la pared MSE en capas de 30 cm hasta el nivel 4.719 m.s.n.m. El

chancador primario, la pared MSE y el acopio descansan en roca de cuarzo-monzonita, que fue modelada como un material elástico lineal. El edificio de concreto fue modelado como un grupo elástico lineal con rigidez axial y de flexión equivalente a la estructura real. La Figura 3 muestra la geometría del modelo para la Sección 1 y la Figura 4 muestra la geometría de la Sección 2.

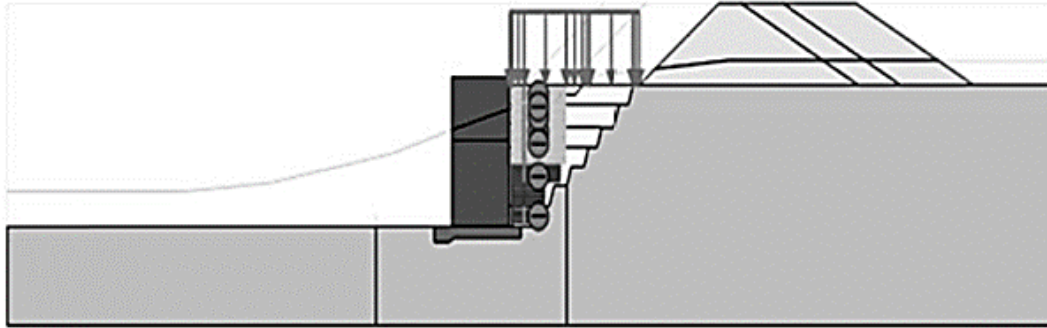


Figura 3. Diagrama de la geometría del modelo de la Sección 1.

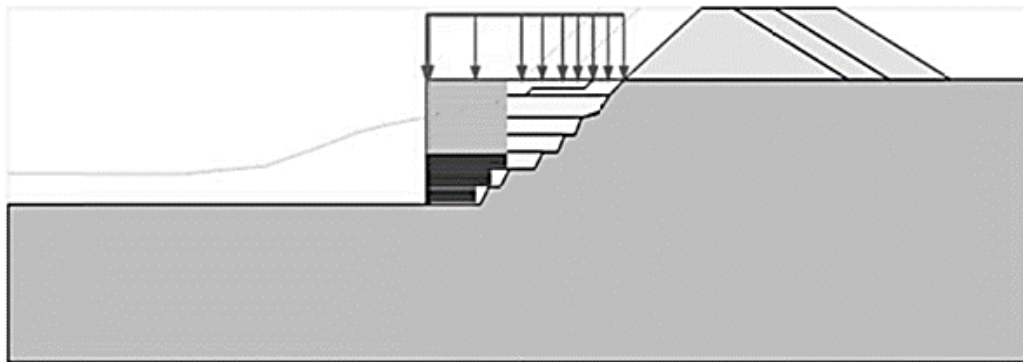


Figura 4. Diagrama de la geometría del modelo de la Sección 2.

3. Malla y condiciones de límite

La malla tiene un diseño que es estándar para problemas de interacción de suelo con las siguientes características particulares: i) las geocádrículas de refuerzo horizontal tienen una separación de 0,60 metros pero fueron modeladas con una separación de 1,20 metros como un compromiso entre la capacidad predictiva del modelo y la calidad numérica de la malla; ii) se modeló una capa de poliestireno instalada entre la estructura de concreto del chancador y el relleno como un elemento de interfaz de espesor y propiedades mecánicas equivalentes; iii) las geocádrículas no están conectadas a la estructura de concreto y en consecuencia, no están conectadas al bloque de concreto en el modelo numérico, lo que significa que detrás del bloque de concreto hay una gran concentración de elementos muy pequeños de suelo e interfaz que dificultan la solución numérica y requiere ajuste manual de los parámetros numéricos para convergencia óptima y rápida; iv) se modeló el acopio como un material – una estrategia necesaria para análisis dinámicos – y también una carga – una estrategia conservadora para calcular el factor de seguridad global. En la Figura 5, se muestran detalles de la malla en la

Sección 1 para dos de los análisis.

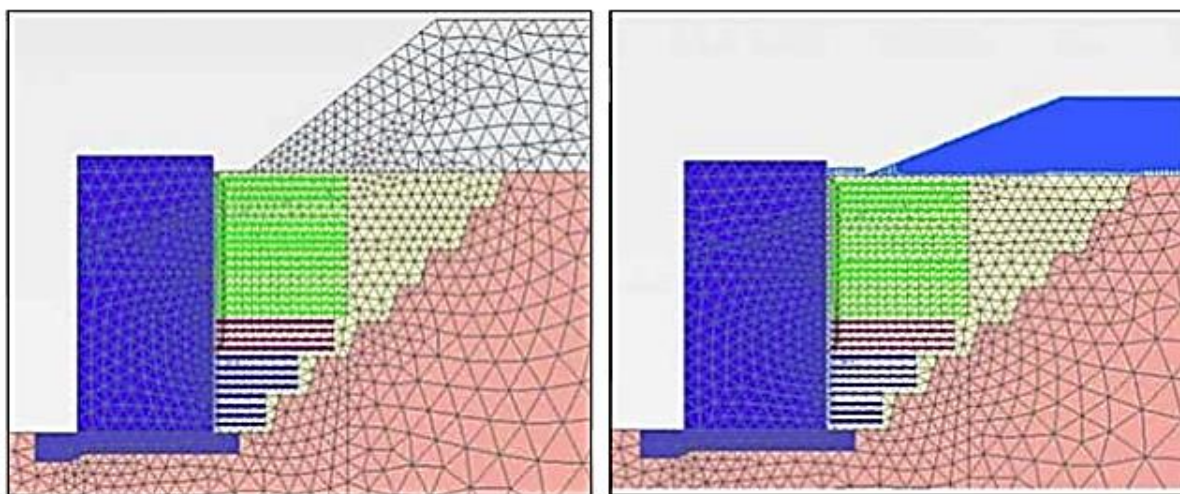


Figura 5. Detalle de la Sección 1 con acopio como material (Izq.) y como una carga (Der.).

Para los análisis estáticos, se emplearon condiciones de límite convencionales con restricción horizontal completa en la base y restricciones verticales en ambos lados de la malla. Para los análisis dinámicos, se emplearon bordes laterales absorbentes. Se usó una “base de cumplimiento” en la base, la opción por defecto para los análisis sísmicos en Plaxis AE [2].

4. Materiales

Se llevó a cabo un programa de exploración geotécnica para caracterizar e identificar los materiales involucrados en el modelo, incluyendo excavaciones en el material de relleno compactado y en el acopio, caracterización geomecánica, ensayos de densidad en terreno y muestreo representativo. Los resultados fueron complementados con la información proporcionada por el cliente, incluidos registros de compactación de la pared MSE, los registros de perforación de roca, las líneas geofísicas y los planos estructurales del chancador primario.

Con la información descrita arriba, se identificaron las siguientes unidades geotécnicas: U1) suelo reforzado y relleno estructural, clasificado como (GC-GM) con 66% de gravas, 20% de arenas y 14% de finos; U2) acopio, clasificado como (GP-GM) con 77% de gravas, 17% de arenas y 6% de finos; U3) macizo rocoso compuesto por cuarzo-monzonita dura.

Las propiedades de resistencia de las Unidades 1 y 2 fueron determinadas a partir de ensayos triaxiales de muestras remodeladas. Para la Unidad 3, se hicieron pruebas de carga puntual y de compresión simple en las muestras de roca intacta y se llegó a la conclusión que esta unidad tendría un comportamiento elástico lineal para todas las condiciones analizadas. Las propiedades del relleno compactado, suelo reforzado y acopio se basaron en ensayos de terreno, ensayos triaxiales de laboratorio y registros de compactación durante la fase de construcción.

Para representar el comportamiento de los suelos (Unidades 1 y 2) se usó el modelo HS-Small disponible en Plaxis [3]. Este es un modelo constitutivo elastoplástico con endurecimiento isotrópico para cizalle y compresión. En su actual formulación, el modelo reproduce razonablemente: i) el aumento en la rigidez con la presión de confinamiento; ii) el comportamiento elástico a baja deformación; iii) endurecimiento pre-fallamiento con una curva hiperbólica de esfuerzo-deformación; y iv) un monto limitado de amortiguación de histéresis [1].

Los modelos estructurales fueron modelados como materiales elásticos lineales. Las geocuadrículas de la pared MSE fueron representadas como elementos elásticos planos sin rigidez de flexión. La cara vertical de la pared no tiene elementos rígidos, así que no estuvo sujeta a un análisis especial en los modelos. Los parámetros materiales se muestran en las Tablas 1 y 2. Para el análisis dinámico, se usaron los mismos parámetros del caso estático.

Tabla 1. Parámetros constitutivos para Unidades 1 y 2.

Grava (GP-GM)	Símbolo	Unidad	Unidad 1	Unidad 2
Peso unitario	γ	kN/m ³	24.0	23.0
Contenido de humedad	ω	%	4.0	5.0
Proporción de vacío	e	-	0.17	0.24
Ángulo de fricción crítico	ϕ_c	°	40.0	41.0
Ángulo de fricción máximo	ϕ_{max}	°	42.0	41.0
Ángulo de dilatación	ψ	°	4.0	0.0
Cohesión	c	kPa	1.0	1.0
Deformación por cizalle de referencia	$\gamma_{0.7}$	-	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Exponente de esfuerzo	m	[1]	0.50	0.50
Proporción de fallamiento	R_f	-	0.90	0.90
Presión de referencia	p_{ref}	kPa	100.0	100.0
Rigidez de cizalle de deformación pequeña	G_{ref_0}	MPa	200.0	180.0
Rigidez de descarga/recarguío a 100 kPa	E_{ur}^{ref}	MPa	100.0	90.0
Rigidez de secante a 100 kPa	E_{50}^{ref}	MPa	33.0	30.0
Rigidez edométrica a 100 kPa	E_{oed}^{ref}	MPa	20.0 a 33.0	18.0 a 30.0
Razón de Poisson para descarga-recarga	ν_{ur}	-	0.20	0.20
Parámetros de amortiguación de Rayleigh	α	1/s	0.1047	1.1047
(amortiguación $\varepsilon=1\%$ entre 1Hz y 5Hz)	β	S	0.000531	0.000531
Presión de pre-sobrecarga	POP	kPa	200.0	200.0

Tabla 2. Parámetros constitutivos para la Unidad 3, fundación y estructura del chancador.

Grava (GP-GM)	Símbolo	Unidad	Unidad 3	Fundación	Chancador
Peso unitario	γ	kN/m ³	26.0	24.0	10.7
Módulo de Young	ω	GPa	9.5	21.7	12.7
Razón de vacío	e	-	0.20	0.17	0.17
Parámetros de amortiguación de Rayleigh	α	1/s	0.05236	0.04712	0.04712
(amortiguación $\varepsilon=1\%$ entre 1Hz y 5Hz)	β	s	0.000265	0.0003979	0.0003979

5. Análisis Sísmico

Se analizaron los catálogos sísmicos regionales (CISMID) y (PEER); se seleccionó un conjunto de registros sísmicos compatibles con la demanda sísmica del proyecto en términos

de magnitud (M), distancia del hipocentro (R) y con un valor PGA y se escaló al diseño de parámetros sísmicos del sitio. Los registros preseleccionados se agruparon y ordenaron en términos de intensidad y duración de Arias para un PGA similar al PGA de diseño, el cual fue calculado en base a un estudio probabilístico de la demanda sísmica, donde se estableció un periodo de retorno de 2.475 años para el terremoto por diseño, debido a la importancia de la estructura en el proceso de producción de la mina. Finalmente, se eligieron los dos registros sísmicos que mostraron la máxima duración y máxima intensidad de Arias para realizar análisis dinámicos 2D. Las Figuras 6 y 7 muestran los dos registros sísmicos usados en los modelos, escalados para el PGA por diseño. En total, se consideraron cuatro análisis para el caso estático y tres escenarios para los análisis dinámicos, estos se muestran en las Figuras 8 y 9.

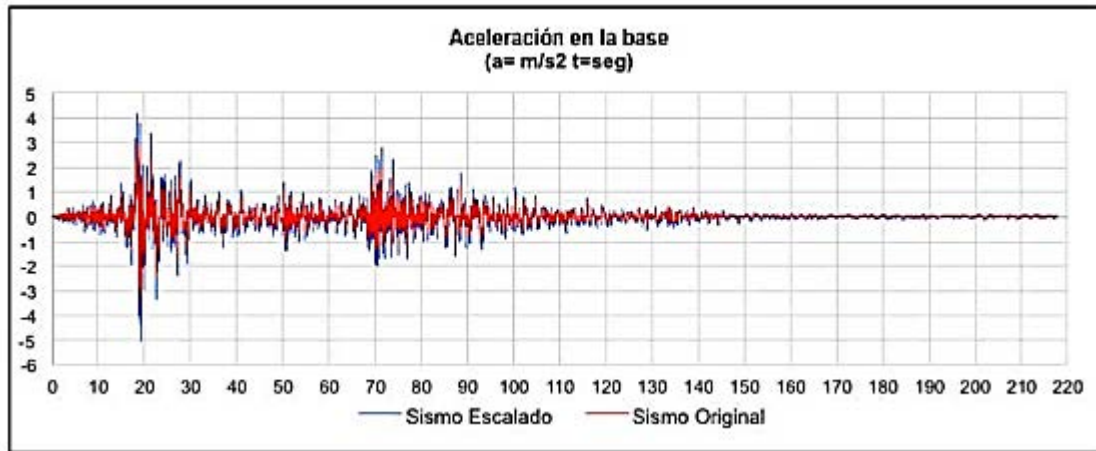


Figura 6. (a) Terremoto de Pisco (2007).

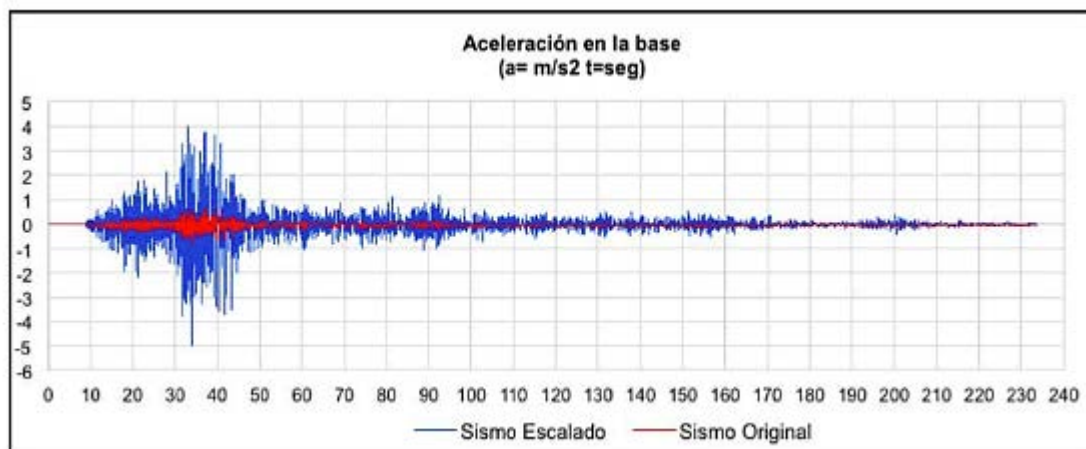


Figura 7. (a) Denali – Terremoto de Alaska (Fairbanks 2002).

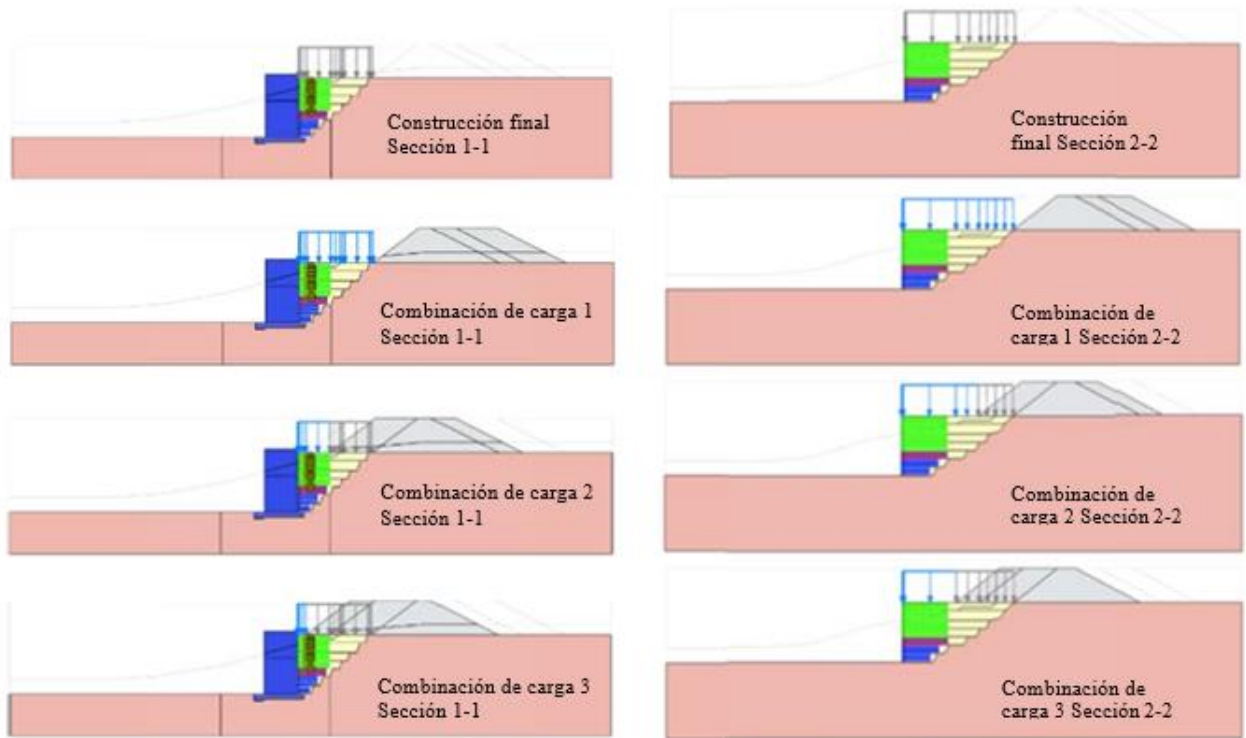


Figura 8. (a) Casos analizados– Análisis estático.

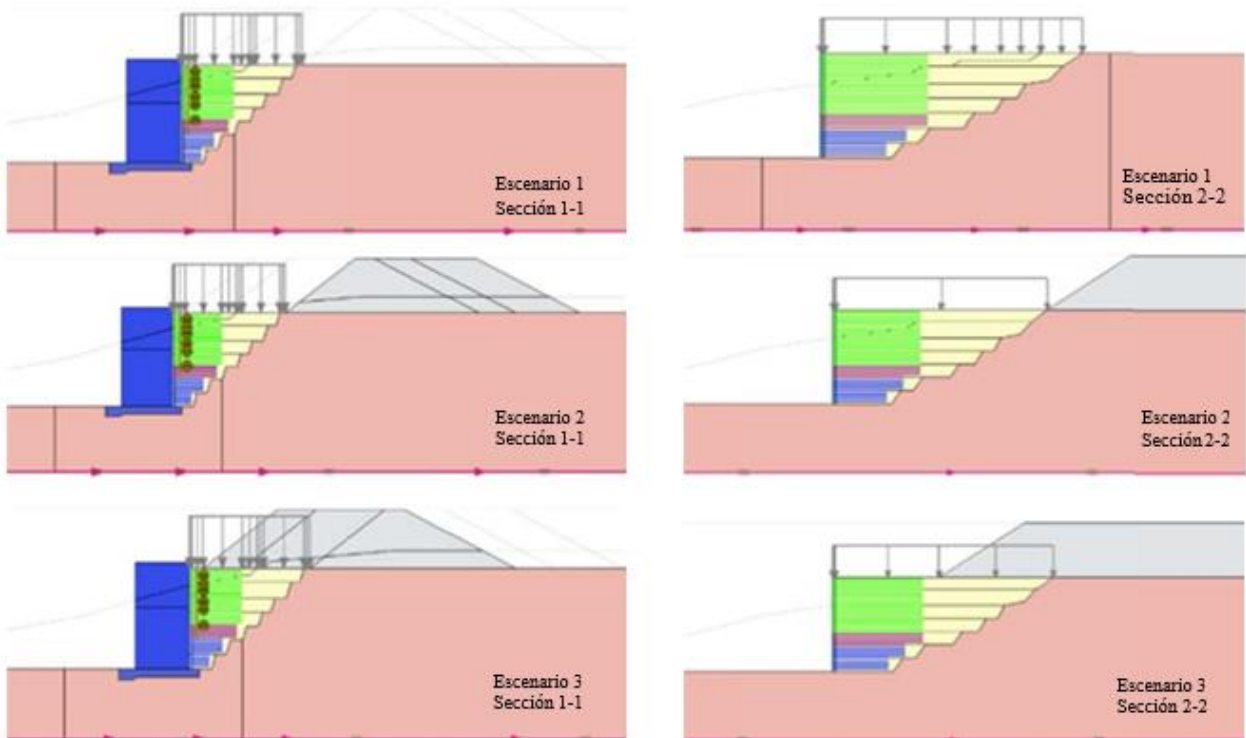


Figura 9. (a) Escenarios analizados– Análisis dinámico.

6. Resultados

Pared – se evaluaron las presiones de contacto del chancador para diferentes posiciones del acopio, bajo condiciones estáticas y sísmicas. Para el caso estático, la distribución de presión es trapezoidal y los resultados se pueden producir con suficiente exactitud adoptando la teoría de presión de tierra de Rankine con coeficiente de presión $K = 0.25$ [27]. Los resultados indicaron que la translación del acopio desde su posición original, descansando en la roca superior, a una posición cercana al chancador, aumenta la falla inversa total en la estructura en un 70%.

La distribución de presión de contacto obtenida para el evento sísmico se usó para calibrar una distribución triangular simplificada similar al método de Mononobe-Okabe [4]. Se calculó la falla inversa total capaz de reproducir el desplazamiento horizontal residual registrado en el chancador por el análisis dinámico con el modelo numérico.

Se evaluó el chancador superior y los movimientos de la pared MSE en la Sección 1 y la Sección 2 respectivamente, para condiciones estáticas y sísmicas. En el caso estático, la aproximación del acopio al frente de la pared MSE aumentó sus desplazamientos horizontales y verticales en 40 mm y 65 mm respectivamente. Estos desplazamientos representan una distorsión en el frente de la pared de 1%. Los desplazamientos horizontales y verticales en la parte más alta del chancador no fueron afectados por el cambio de posición del acopio debido a la rigidez de la estructura.

Se registraron movimientos horizontales en la corona del chancador de hasta 12 mm en el caso sísmico. En la parte frontal de la pared reforzada, los desplazamientos alcanzaron valores residuales máximos hasta 1270 mm y 480 mm en dirección horizontal y vertical respectivamente. Estos desplazamientos representan una distorsión en el frente de la pared MSE de 3,1%. Se pudo notar que la aproximación del acopio al frente de la pared aumentó el desplazamiento horizontal en 300 mm. La Figura 10 muestra el contorno de los desplazamientos horizontales para la Sección 1 obtenido a partir del análisis sísmico.

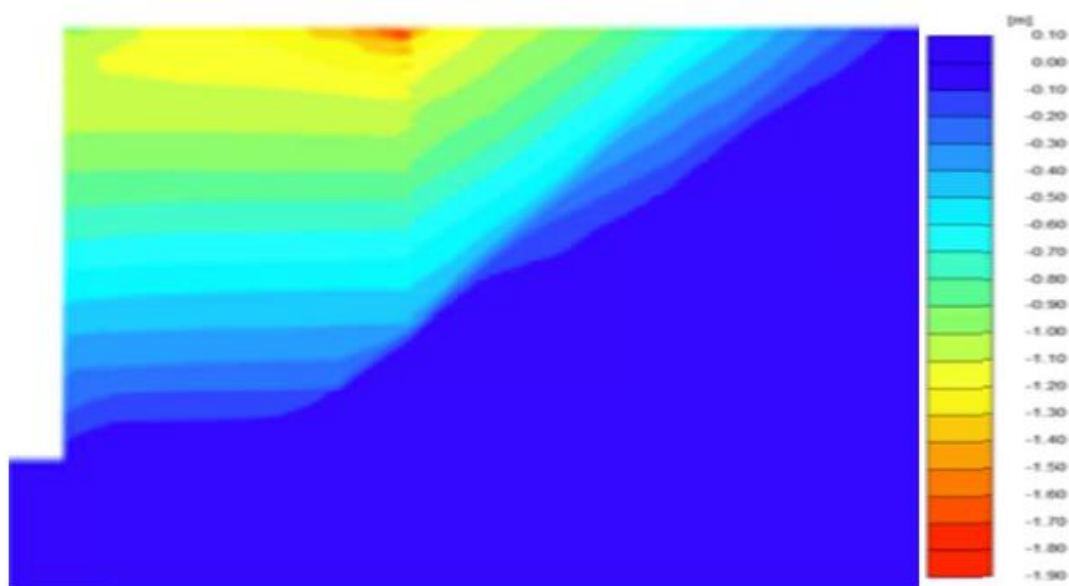


Figura 10. Contorno de desplazamientos horizontales en el análisis sísmico, Sección 1.

El factor numérico de seguridad fue calculado en condiciones estáticas usando el método de reducción de resistencia [5]. Para la Sección 1, la superficie de falla potencial es restringida por la estructura del chancador, así que el análisis numérico del factor de seguridad tiene poco interés.

El factor de seguridad calculado para la Sección 2 es mayor que 2,0 para todos los casos de carga y posiciones del acopio modelado.

La distancia entre la base del acopio y el frente de la pared MSE produce pequeños cambios en el factor de seguridad, menos del 5% para todos los escenarios y casos de carga analizados. Debido al diseño robusto de la pared MSE misma, todos los modos de falla son de tipo global, donde la pared MSE se mueve como un bloque rígido con poco peligro en su estructura interna. La Figura 11 muestra el contorno de deformación de cizalle total para el cálculo del factor de seguridad de la Sección 2.

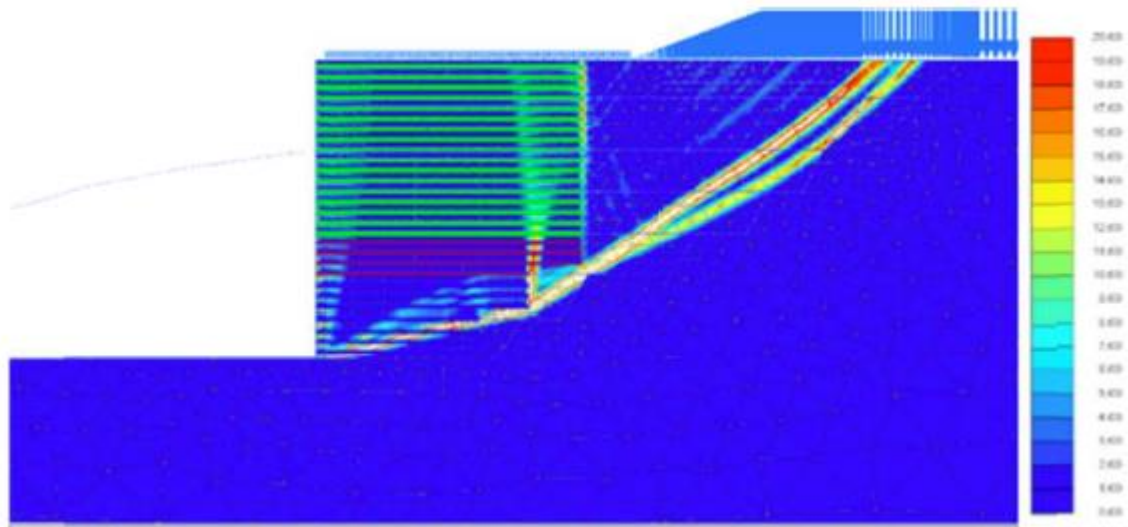


Figura 11. Contorno de deformación de cizalle en el cálculo del factor de seguridad – Sección 2.

7. Conclusiones

Se desarrollaron modelos numéricos en el programa de elementos finitos Plaxis 2D AE para estudiar la interacción estática y dinámica entre un chancador, una pared de tierra estabilizada mecánicamente y un acopio de mineral.

Se llegó a la conclusión de que la seguridad geotécnica de la construcción es adecuada y no es afectada por la posición del acopio. Desde el punto de vista operacional, la estructura del chancador es prácticamente indiferente a la aproximación del acopio en condiciones estáticas. Los desplazamientos calculados en el frente de la pared de tierra reforzada son tolerables porque el frente de la pared no tiene cobertura estructural, por el contrario, la pared MSE está formada con la misma malla de alambre que sirve como grilla de refuerzo en el relleno compactado.

Para el caso sísmico, los desplazamientos reportados por el modelo son importantes, aunque consistentes con el método de cálculo seleccionado y el periodo de retorno del terremoto adoptado para el diseño.

Agradecimientos

Los autores de este artículo desean agradecer a Eddy Valencia y Carlos Contreras por su colaboración con el material publicado y al personal técnico de SRK Consulting y SVS Ingenieros. Particularmente, agradecemos el apoyo de Alejandro Verri y su equipo en SRK por el análisis e interpretación de la parte sísmica y Martin Villanueva (SVS) quién lideró la ejecución del proyecto.

Referencias

- [1] Brinkgreve, RBJ, M H Kappert, and P G Bonnier. Hysteretic Damping in a Small-Strain Stiffness Model. Proc. of Num. Mod. in Geomech., NUMOG X, Rhodes (2007), 737–42.
- [2] PLAXIS 2D Reference Manual Anniversary Edition. (2015), 1–372.
- [3] PLAXIS 2D Material Models Manual Anniversary Edition. (2015), 1–204.
- [4] Whitman, R. V., Liao, S. 1985, Seismic Design of Gravity Retaining Walls. *Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.*
- [5] Sfriso, A. El coeficiente de seguridad en la geomecánica computacional. *CAMSIG* (2008) pp. 1-7.