

Estabilidad de taludes en la presa de colas Agua Dulce en Potosí, Bolivia

Yenifer Ruth Tuco Huarahuara
Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae).
email: yrtucoh@gmail.com

Dr. Yoermes Gonzáles Haramboure
Centro de Investigaciones Hidráulicas,
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae).
email: yoermes@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

La presa de colas Agua Dulce ubicada en Potosí, Bolivia, perteneciente a la Empresa Minera Santa Lucía Ltda., almacena relave convencional y ha sido construida por el método Aguas Arriba. Durante su etapa de operación no se cumplieron las características geométricas planteadas en su proyecto original; por ello, para el análisis de estabilidad de taludes se proponen diferentes modelos en función de cuatro parámetros: geometría de la sección, condición de drenaje, condición de carga y método de análisis, mediante el programa GeoStudio 2012. Los resultados obtenidos permiten definir las relaciones e influencia de la variación de los parámetros analizados, conviniendo que es viable el cierre de la presa bajo una relación del último talud de 1:2,34 hasta la cota de cierre, garantizando el correcto funcionamiento de los drenes de fondo.

Palabras clave: estabilidad de taludes, factor de seguridad, minería, presa de colas, relaves.

Stability of slopes at the Agua Dulce tailings dam in Potosí, Bolivia

ABSTRACT

The Agua Dulce tail dam located in Potosi, Bolivia, belonging to the Santa Lucia Mining Company Ltda., it stores conventional tailings and has been constructed by the Aguas Arriba method. During its operation stage, the geometrical characteristics proposed in its original project were not met; therefore, for the stability analysis of slopes, different models are proposed according to four parameters: section geometry, drainage condition, load condition and analysis method, through the GeoStudio 2012 program. The obtained results allow to define relations and influence between the variation of the parameters analyzed, agreeing that the closure of the tail dam is feasible under a ratio of the last slope of 1: 2,34 to the closing level, guaranteeing the correct functioning of the bottom drains.

Keywords: slope stability, safety factor, mining, tail dam, tailings.

INTRODUCCIÓN

Bolivia, país minero, ocupa el puesto 23 del ranking mundial respecto al ICM (Índice de Contribución Minera) referido a la minería no combustible, que tiene en cuenta el dinamismo de la actividad minera, el aporte al PIB y su contribución a la exportación minera (ICMM 2014). Los residuos generados por esta actividad se depositan en presas de colas, las mismas que durante toda su etapa de proyecto deben cumplir con su estabilidad química y física, en particular la estabilidad de sus taludes. Una de las principales compañías mineras en Bolivia es la Empresa Minera Santa Lucía Ltda., a cargo de la presa de colas Agua Dulce. Esta presa se encuentra en etapa de pre-cierre por lo cual es necesario garantizar que en el cierre definitivo de la misma se mantenga estable y segura respecto al análisis estático de sus taludes, debido a que en su etapa constructiva no se cumplieron las características geométricas planteadas en el proyecto original.

Las colas o relaves son los residuos últimos del procesamiento de minerales, donde adquieren una determinada agresividad química producto de la utilización de agentes químicos (plomo arsénico, mercurio, entre otros). Poseen una consistencia lodosa que contiene mineral sedimentado en pequeñas fracciones de rocas inertes e inocuas en grandes volúmenes. La variación del contenido de sólidos da lugar a la existencia de diferentes tipos de relaves, con la finalidad de mejorar su comportamiento físico en función del mayor contenido de sólidos. Los tipos de relaves son: convencional, espesado, en pasta y filtrado, con contenidos de sólidos entre 30%-55%, 40%-70%, 65-85% y superior al 85% respectivamente (Aitken et al. 2017).

Las características geotécnicas que se evalúan en los relaves son idénticas a las de los suelos naturales. Las principales diferencias están en función del mineral precedente del relave, tipo de relave, tiempo y distancia de deposición. Estas características determinan su resistencia, permeabilidad y compresibilidad, lo que a su vez influye en el análisis de estabilidad, filtración y deformación de las presas de colas. Las partículas gruesas del relave se depositan con mayor rapidez, principalmente cerca de los puntos de vertido mientras que las finas tardan más tiempo en depositarse. Los pesos específicos que se pueden encontrar dentro de una misma presa varían hasta en un 25%, variación que es indirectamente proporcional al contenido de sólidos en el relave (Cancela 1987). Los relaves poseen un elevado ángulo de fricción interna, producto del proceso de molienda que sufren dentro del procesamiento de minerales, además de la eliminación de partículas débiles por el lavado y transporte. El grado de saturación es superior al 85%, lo que implica generalmente menor estabilidad geotécnica y mayor probabilidad de rotura de la presa por deslizamiento de taludes y licuación (Rodríguez y Oldecop 2011). Ello se debe a la ocurrencia simultánea de varios fenómenos hidráulicos como el ascenso capilar del agua freática, el aporte de agua que implica el vertido de nuevos relaves y la infiltración del agua de escorrentía.

Las presas de relaves son estructuras geotécnicas destinadas a almacenar los relaves de manera estable e inocua al medio ambiente natural, tanto física como químicamente, generando la menor afectación posible al ecosistema circundante. Las presas de colas almacenan tanto sólidos como líquidos, las mismas colas se usan como material de construcción del dique de la presa en un proceso por etapas, en función del desarrollo de las operaciones mineras, a fin de no anticipar inversiones, reducir la inversión inicial y anticipar cambios en los procesos de extracción y tratamiento de minerales. La tipología de las presas de relaves se encuentra en función del relave almacenado y el lugar de disposición; las más frecuentes son las presas sobre

la superficie, construidas bajo los métodos Aguas Arriba, Aguas Abajo y de Eje Central (Espinace 2015), (Palma 2016), siendo el método de Aguas Arriba el de mayor facilidad constructiva y menor estabilidad física.

PRESA DE COLAS “AGUA DULCE”

La presa de colas Agua Dulce (figura 1) se ubica en la comunidad de Agua Dulce, provincia de Tomás Frías, departamento de Potosí, Bolivia. Los relaves almacenados provienen de la planta de tratamiento de la misma denominación, que trata los minerales de zinc (Zn), plomo (Pb) y plata (Ag), que provienen principalmente del Cerro Rico de Potosí y de la Mina Melena.

La presa se ubica en un emplazamiento de 60 000 m², que almacena 5 000 000 m³ de relave convencional construida por el método Aguas Arriba; alcanzando 15 metros de altura desde la corona del dique de arranque hasta la cota de cierre. Según la Ley N° 1777 (1997), del Código de Minería de Bolivia, esta presa se clasifica como un dique de gran volumen debido a que las acumulaciones de residuos superan los 50 000 m³. Atendiendo a esto, para garantizar la estabilidad y seguridad de taludes en presas de gran volumen de relaves, se considerará un FS mínimo de 1,5 (Knight Piésod Consultores 2001).

En estas obras geotécnicas se distingue la presencia de tres materiales principales: el suelo de la cimentación, el material de préstamo que compone al dique de arranque y el relave almacenado, cuyas propiedades se reflejan en la tabla 1. Además, es común la presencia de un espejo de agua en la superficie.



Figura 1. Dique de colas Agua Dulce

Tabla 1. Propiedades geotécnicas de los materiales de la presa de colas Agua Dulce

MATERIAL	ϕ^0	C (kPa)	γ seco (kN/m³)	γ saturado (kN/m³)	k (m/s)
Suelo de la cimentación	25	7	17,6	19,4	1 e-15
Dique de arranque	26	8	20,0	21,5	1 e-8
Relave	31,53	10	19,5	21,2	2,82 e-7

A partir de los parámetros geotécnicos de los materiales del terraplén y el cimiento de la presa, facilitados por el laboratorio de mecánica de suelos contratado a tal efecto, se desarrolla la presente investigación para determinar las condiciones actuales de estabilidad del talud construido, que difiere geoméricamente de lo establecido en el proyecto de cierre, siendo el construido de mayor pendiente. Para ello, se aplican los métodos de análisis más frecuentemente utilizados en este campo, se toman en cuenta diferentes condiciones de drenaje y se analiza la posibilidad de utilizar la explanación resultante como parqueo.

MODELOS PLANTEADOS

La viabilidad del cierre de la presa se analizó bajo potenciales condiciones constructivas. Por ello, se crearon cuatro modificaciones respecto a la sección geométrica de proyecto de la presa, tres modificaciones en las condiciones de drenaje y tres en las condiciones de carga; creando 2 diferentes modelos analizados bajo los métodos de Fellenius, Bishop y Morgenstern & Price (GEO-SLOPE 2012a).

El Modelo 1 (figura 2a) tiene en cuenta las condiciones de drenaje y el Modelo 2 (figura 2b) se analiza bajo las condiciones de carga propuestas, la descripción del código de los modelos se aprecia en la tabla 2.



Figura 2. Código de identificación (a) Modelo 1 (b) Modelo 2

SECCIONES MODELADAS

La presa de colas Agua Dulce está compuesta por un dique de arranque de taludes 1:2,2 aguas arriba y aguas abajo con una altura promedio de 3,75 m, cuya corona de 4,6 m de ancho se sitúa en la cota 3748 m.s.n.m.

El incremento en altura por el método Aguas Arriba se hizo con la construcción de tres bermas situadas cada cinco metros en elevación, de taludes aguas abajo 1:3. La proyección del talud aguas abajo de la tercera berma se ha visto afectado por modificaciones en la etapa constructiva; el proyecto original plantea que este talud sea 1:3, pero se perfiló con una relación 1:2,34, lo cual pone en duda la seguridad garantizada por el proyecto inicial. Por ello, las modificaciones en las secciones se efectúan en el último talud, desde la cota 3757,9 m.s.n.m. hasta la cota de corona (3763 m.s.n.m.).

La Sección 1 (figura 3a) posee la geometría actual de la presa, el último talud tiene una relación 1:2,34 y llega hasta la cota 3761,7 m. La Sección 2 (figura 3b) llega hasta la cota de

cierre con un talud 1:3. La Sección 3 (figura 3c) llega hasta la cota de cierre con un talud 1:2,34. La Sección 4 (figura 3d) tiene la misma geometría que la Sección 3, con la diferencia que dentro de las cotas 3761,7 a 3763 m (cota de cierre) se prevé el posible almacenamiento de un relave con características geotécnicas desfavorables respecto al actualmente depositado, las características geotécnicas de este Relave 2 se aprecian en la tabla 3.

Tabla 2. Parámetros del código de identificación del Modelo 1 y Modelo 2

Parámetros del código	Símbolo en el código	Descripción
Sección	S1	Sección actual.
	S2	Sección proyecto.
	S3	Sección actual con proyecto de relave actual.
	S4	Sección actual con proyecto que almacena dos tipos de relaves.
Condición de drenaje	CDA	Condición con espejo de agua y drenaje a 6m del pie del talud aguas arriba del dique de arranque.
	CDB	Condición con espejo de agua y drenaje en la cuneta del vial aguas abajo del dique de arranque.
	CDC	Condición con espejo de agua y drenaje en la corona del dique de arranque.
Condición de carga	CCA	Condición sin espejo de agua y con concavidad del espejo de agua.
	CCB	Condición sin espejo de agua y sin concavidad del espejo de agua.
	CCC	Proyección de parqueo sobre la presa de colas Agua Dulce cerrada.
Método de análisis	M1	Método de Fellenius u ordinario.
	M2	Método Bishop.
	M3	Método Morgenstern & Price.

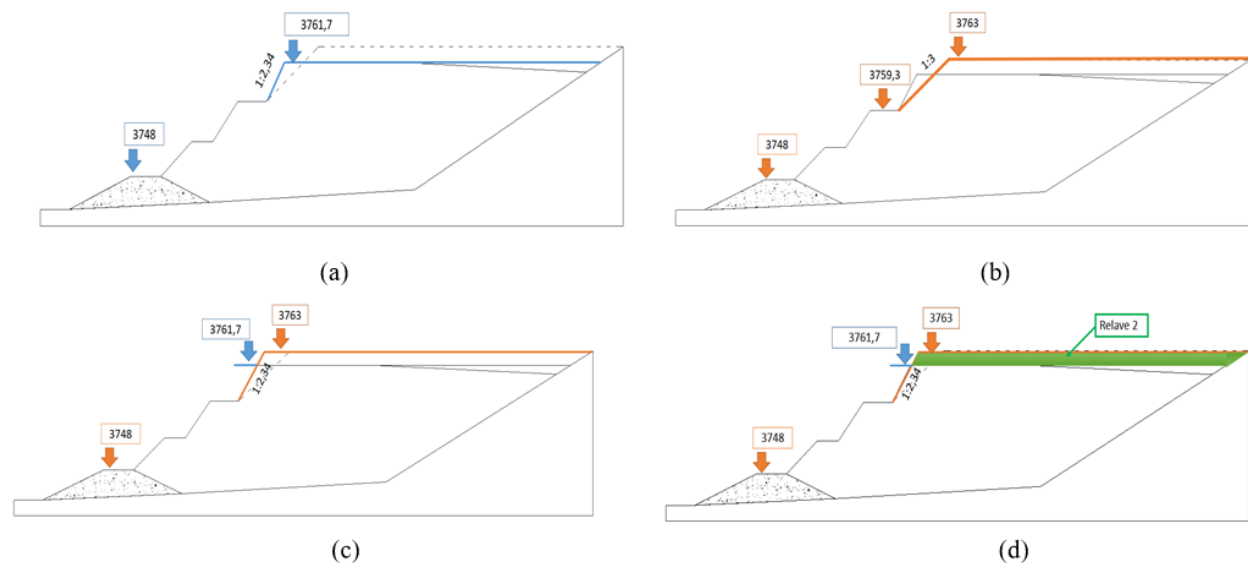


Figura 3. Secciones modeladas. (a) Sección 1 (b) Sección 2 (c) Sección 3 (d) Sección 4

Tabla 3. Características geotécnicas del Relave 2

MATERIAL	ϕ^o	C (kPa)	γ seco (kN/m ³)	γ saturado (kN/m ³)	k (m/s)
Relave 2	25,22	8	21,45	23,32	2,82 e-6

Condiciones de drenaje

La presa de colas Agua Dulce posee drenes de fondo hasta seis metros arriba del pie del talud aguas arriba del dique de arranque, geomembranas en el fondo de la presa hasta la corona del dique de arranque y debido a la presencia de un espejo de agua en la superficie existe una condición de infiltración.

El análisis de estabilidad de taludes en el Modelo 1 se realizó mediante un análisis precedente de filtración y flujo establecido con el Módulo SEEP/W del software GeoStudio 2012 (GEO-SLOPE 2012b) con el cual se determina la posición de la línea de corriente superior en cada sección.

La Condición CDA (figura 4a) considera el correcto funcionamiento del dren de fondo ubicado a seis metros del pie del talud aguas arriba del dique de arranque.

La Condición CDB (figura 4b) propone que el conducto de flujo libre se encuentra en la cuneta de la carretera Potosí-Uyuni ubicada a 50 metros aguas abajo del dique de arranque. La Condición CDC (figura 4c) considera el drenaje en la corona del dique de arranque, previendo el correcto funcionamiento de las geomembranas y la obstrucción de los drenes de fondo.

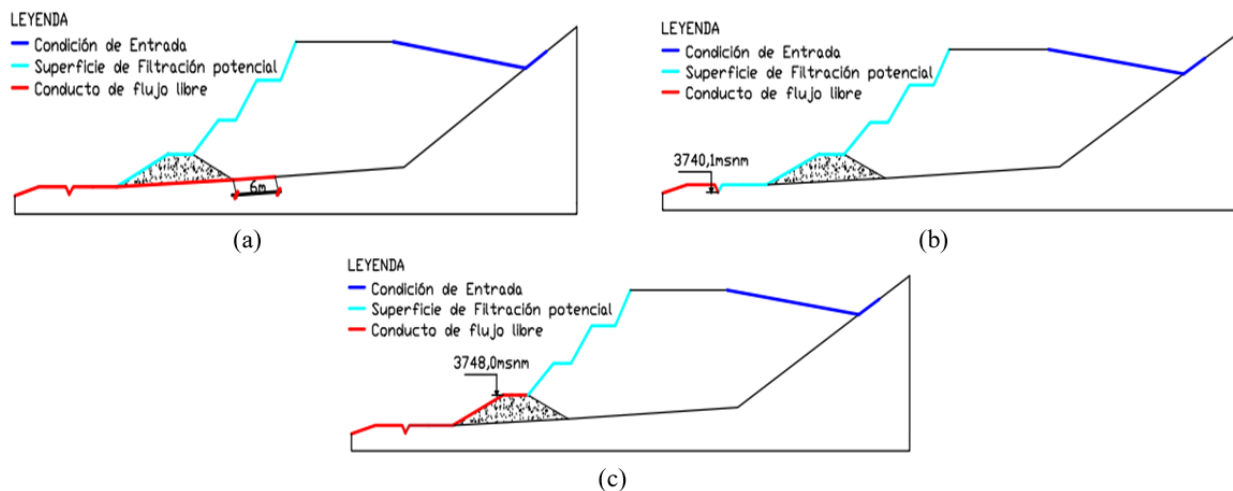


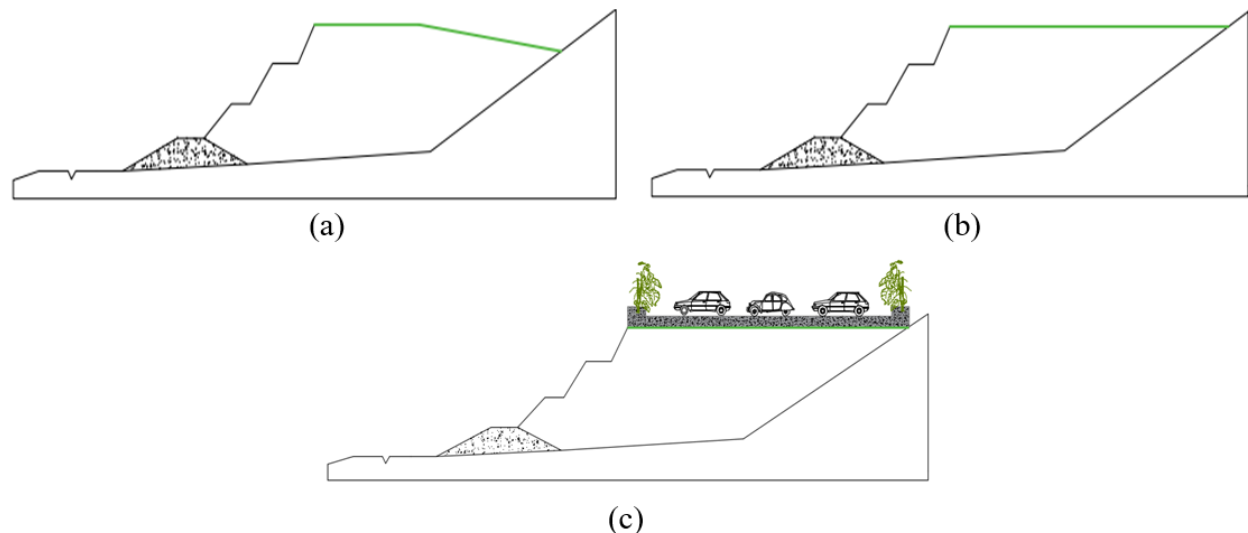
Figura 4. Condiciones de drenaje (a) Condición CDA (b) Condición CDB (c) Condición CDC

Condiciones de carga

Las condiciones de carga no consideran la existencia de un espejo de agua, debido a diferentes factores como evaporación o bombeo de agua y su correspondiente reutilización en la planta de tratamiento, con la finalidad de disminuir el impacto ambiental, o como medida de precaución al otorgarle mayor estabilidad física a la presa.

La Condición CCA (figura 5a) considera la existencia de la concavidad originada por la existencia previa del espejo de agua en la superficie. La Condición CCB (figura 5b) asume que la superficie de cierre es horizontal, producto de una actividad de relleno de la concavidad de la Condición CCA.

La Condición CCC (figura 5c) propone la construcción de un parqueo sobre la cota de cierre de la presa de colas como plan de rehabilitación del área afectada por la presa de colas Agua Dulce, teniendo en cuenta una carga, para un tráfico ligero de 8,6 kPa.



**Figura 5. Condiciones de carga. (a) Condición CCA
(b) Condición CCB (c) Condición CCC**

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA PRESA DE COLAS AGUA DULCE

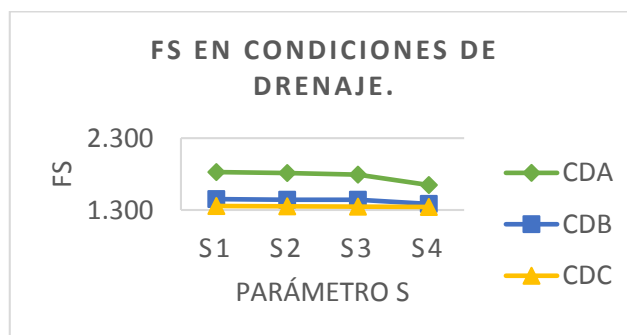
Influencia de la variación de las condiciones de drenaje

Con el análisis de filtraciones realizadas en el Modelo 1 para las condiciones de drenaje se analizaron las cuatro secciones, dichos resultados se expresan en la tabla 4 y figura 6, por el método Bishop.

Tabla 4. FS obtenidos en el Modelo 1

FS en condiciones de drenaje						
Sección	CDA		CDB		CDC	
	Modelo	FS	Modelo	FS	Modelo	FS
S1	S1-CDA-M2	1,828	S1-CDB-M2	1,453	S1-CDC-M2	1,356
S2	S2-CDA-M2	1,816	S2-CDB-M2	1,444	S2-CDC-M2	1,352
S3	S3-CDA-M2	1,793	S3-CDB-M2	1,444	S3-CDC-M2	1,348
S4	S4-CDA-M2	1,649	S4-CDB-M2	1,385	S4-CDC-M2	1,342

Los resultados del Modelo 1 son superiores a un FS de 1,3 lo que garantiza la estabilidad de la presa de colas bajo todas las condiciones de drenaje planteadas; sin embargo, la seguridad de la presa sólo se garantiza en la Condición CDA donde se aprecian FS superiores a 1,5.

**Figura 6. FS en las secciones del Modelo 1**

Influencia de la variación de las condiciones de carga

Respecto a las secciones modeladas que no consideran una superficie de infiltración (Modelo 2 cuyos resultados se reflejan en la tabla 5 y figura 7), los resultados en todos los casos son superiores al FS de 1,5 requerido en las regulaciones bolivianas, con lo cual se garantiza la estabilidad y seguridad de la presa de colas Agua Dulce bajo las condiciones de carga planteadas, apreciando, asimismo, que los resultados del Modelo 2 son semejantes cuantitativamente entre sí y las variaciones entre cada condición de carga son mínimas.

Tabla 5. FS obtenidos en el Modelo 1

FS en condiciones de carga						
Sección	CCA		CCB		CCC	
	Modelo	FS	Modelo	FS	Modelo	FS
S1	S1-CCA-M2	2,088	S1-CCB-M2	2,083	S1-CCC-M2	-
S2	S2-CCA-M2	2,086	S2-CCB-M2	2,081	S2-CCC-M2	2,075
S3	S3-CCA-M2	2,086	S3-CCB-M2	2,080	S3-CCC-M2	2,075
S4	S4-CCA-M2	2,083	S4-CCB-M2	2,080	S4-CCC-M2	2,076

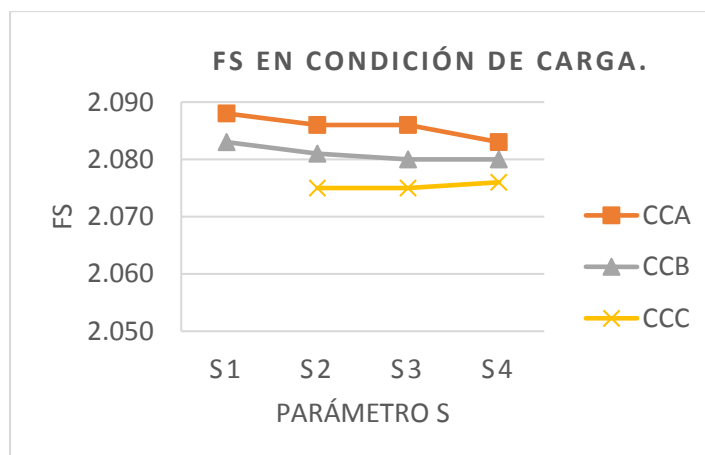


Figura 7. FS en las secciones del Modelo 2

Influencia de la variación de la geometría de las secciones

La variación de la geometría de las secciones se analiza en ambos modelos (tabla 6). La figura 8 compara la Sección 2 y 3, que corresponden a las de proyecto original y sección construida, respectivamente, apreciando que la variación de la pendiente respecto a la planteada en el proyecto original del último talud aguas abajo brinda FS similares, resultando poco significativa la variación del último talud para la garantía de la estabilidad de taludes de la presa de colas Agua Dulce.

Tabla 6. FS de las Secciones 2 y 3

FS para secciones de diferentes pendientes del último talud de la presa					
Condición		S2 (talud 1:2,34)		S3 (talud 1:3)	
		Modelo	FS	Modelo	FS
Condición de drenaje	CDA	S2-CDA-M2	1,816	S3-CDA-M2	1,793
	CDB	S2-CDB-M2	1,444	S3-CDB-M2	1,444
	CDC	S2-CDC-M2	1,352	S3-CDC-M2	1,348
Condición de carga	CCA	S2-CCA-M2	2,086	S3-CCA-M2	2,086
	CCB	S2-CCB-M2	2,081	S3-CCB-M2	2,080
	CCC	S2-CCC-M2	2,075	S3-CCC-M2	2,075

La tabla 7 y figura 9 comparan las Secciones 3 y 4 de igual geometría pero que almacenan diferentes relaves entre las cotas 3761,7 m.s.n.m. y 3763 m.s.n.m. De dicha figura se aprecia que bajo una misma geometría la variación del FS no es significativa cualitativamente, apreciando que en las condiciones de drenaje la variación entre ambas secciones es más amplia que bajo las condiciones de carga, apreciando que la Sección 4 es muy desfavorable en el Modelo 1.

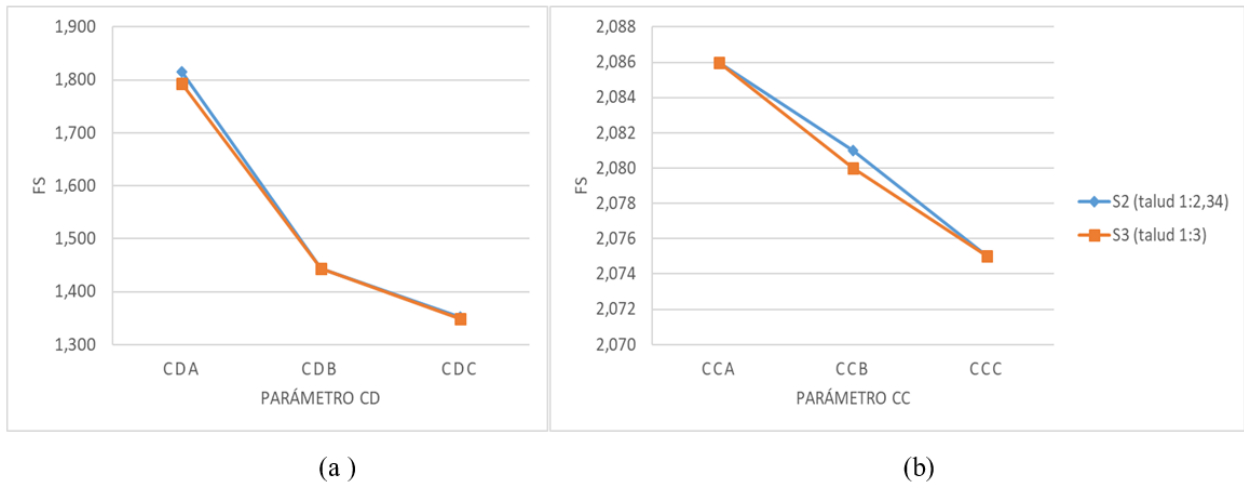


Figura 8. FS de las Secciones 2 y 3 (a) Modelo 1 (b) Modelo2

Tabla 7. FS de las Secciones 3 y 4

FS en secciones con igual geometría pero diferentes relaves almacenados					
Condición		S3		S4	
		Modelo	FS	Modelo	FS
Condición de drenaje	CDA	S3-CDA-M2	1,793	S4-CDA-M2	1,649
	CDB	S3-CDB-M2	1,444	S4-CDB-M2	1,385
	CDC	S3-CDC-M2	1,348	S4-CDC-M2	1,342
Condición de carga	CCA	S3-CCA-M2	2,086	S4-CCA-M2	2,083
	CCB	S3-CCB-M2	2,080	S4-CCB-M2	2,080
	CCC	S3-CCC-M2	2,075	S4-CCC-M2	2,076

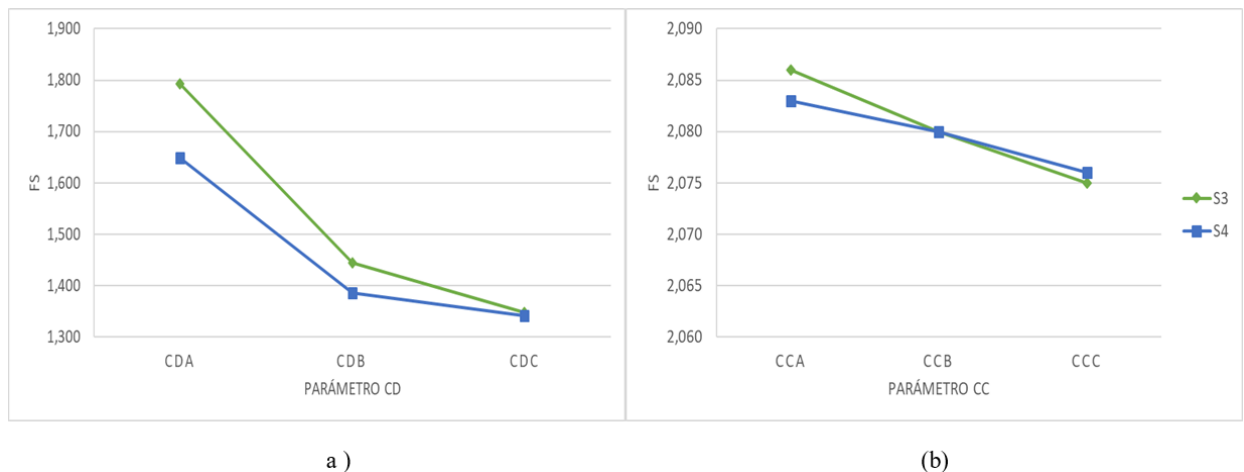


Figura 9. FS de las Secciones 3 y 4 (a) Modelo 1 (b) Modelo2

CONCLUSIONES

- Las características que influyen en la estabilidad y seguridad de los taludes de la presa de colas Agua Dulce, en orden decreciente de importancia, son: presencia de una superficie de infiltración en la presa de colas, posición del conducto de flujo libre en las condiciones de drenaje modeladas, propiedades geotécnicas de los relaves almacenados y variación de la geometría de la presa, respecto a los taludes proyectados.
- La desviación del último talud construido respecto al planteado en el proyecto original no es un factor determinante en el análisis de estabilidad de taludes de la presa de colas Agua Dulce.
- La viabilidad del cierre, respecto al análisis de estabilidad de taludes del dique de colas Agua Dulce se garantiza bajo el cumplimiento del modelo S3-CDA-M2, para el cual la presa de colas llega hasta la cota de cierre con la pendiente que fue construida durante la etapa de operación, garantizando el correcto funcionamiento de los drenes de fondo.
- Para mejorar las características de la presa frente a la estabilidad y seguridad de sus taludes tras su etapa de cierre, es necesario eliminar la condición de infiltración que impone la existencia de un espejo de agua en la superficie, mediante el bombeo y reutilización del agua contenido y la disposición de un drenaje superficial; correspondiente al Modelo 2 donde se asegura un FS superior a 1,9.
- Como plan de rehabilitación del área afectada por la presa de colas Agua Dulce se recomienda desarrollar el proyecto que posibilite la construcción de un parqueo vehicular tras el cierre de la presa, debido a la cercanía de la carretera Potosí-Uyuni y a que la carga impuesta en la Condición CCC bajo las secciones analizadas garantizan FS superiores a los requeridos en las regulaciones bolivianas.

REFERENCIAS

- Aitken D., Godoy-Faúndez A., Vergara M., Concha F. and McIntyre N.** (2017). “Addressing decreasing water availability for the mining industry using cost-benefit analysis”, Ponencia presentada en el XVI World Water Congress, Cancun, Quintana-Roo, México.
- Cancela M.** (1987). “Comportamiento geotécnico de presas de residuos bajo acciones estáticas y dinámicas”, Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Espinace R.** (2015). “Depósitos de relaves: consideraciones en su manejo”. Ponencia presentada en el Seminario Tranques de Relaves: Una mirada detallada para el análisis informado en zonas mineras. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- GEO-SLOPE** (2012a). “Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology”. Manual de usuario. Edición de julio 2012. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Canadá. Extraído de: <http://www.geo-slope.com> en mayo de 2018.

GEO-SLOPE (2012b). “Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology”. Manual de usuario. Edición de julio 2012. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Canadá. Extraído de: <http://www.geo-slope.com> en mayo de 2018.

ICMM (2014). Reporte “The role of mining in national economies”, Mining's contribution to sustainable development, International Council on Mining and Metals, Oxford Policy Management, Reino Unido, ISBN: 978-1-909434-11-0. Extraído de: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/social-and-economic-development/romine_2nd-edition en febrero de 2018.

Ley N°1777 (1997). “Código de minería. Ley del 17 de marzo de 1997”, Congreso Nacional de Bolivia, Bolivia. Extraído de: <http://www.mineria.gob.bo/juridica/19970317-17-32-18.pdf> en febrero de 2018.

Knight Piésod Consultores (2001). “Guía ambiental de presas de colas”. Ministerio de Desarrollo Económico, Viceministerio de Minería y Metalurgia, La Paz, Bolivia. Extraído de: <https://books.google.com.cu/books?id=AeEutwAACAAJ> en septiembre de 2017.

Rodríguez R. y Oldecop L. (2011). “Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves”. Conferencia presentada en el curso de capacitación profesional teórico-práctico en “Aspectos relacionados con la hidrología e hidroquímica en zonas mineras del sur del Ecuador”, Universidad Central del Ecuador. DOI: 10.13140/RG.2.2.31849.70248. Extraído de: <https://www.researchgate.net/publication/306292392> en enero de 2018.

Palma J. (2016). “Operación y control de tranques de relave”. Ponencia presentada en el Seminario Minería Chilena y sus Desafíos: Una visión integral. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.