

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA CORTINA BAJO CONDICIONES ESTÁTICAS Y ACCIDENTALES SISMO

Para comenzar con el capítulo se hace necesario recordar el concepto de factor de seguridad.

Factor de seguridad. Cociente entre fuerzas resistentes y las fuerzas movilizadoras.

Partiendo de esta definición se puede ver que para una condición definida, como es el caso del depósito para jales de la unidad minera La Negra, el factor de seguridad en condiciones estáticas será mayor que para una condición con sismo, puesto que este último apoya las fuerzas movilizadoras.

Para el diseño (altura del talud y geometría del enrocamiento) se busco llegar a un factor de seguridad en condiciones estáticas de 1.5 y en condiciones accidentales por sismo de 1.1 (Manual de Obras Civiles, 1993).

3.1. CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD EN CONDICIONES ESTÁTICAS Y ACCIDENTALES POR SISMO, CON RELACIÓN A LA ALTURA DE LA CORTINA

Para hacer el análisis de estabilidad se decidió considerar dos secciones del depósito para jales, una que cruce de forma ortogonal al eje de la cortina (sección A-A') y otra que cruce la presa de tal forma que se pueda apreciar el aporte de la presa 4 en la estabilidad global del depósito para jales #5 (sección B-B'). En la figura 6.1 se indican los ejes de estudio.

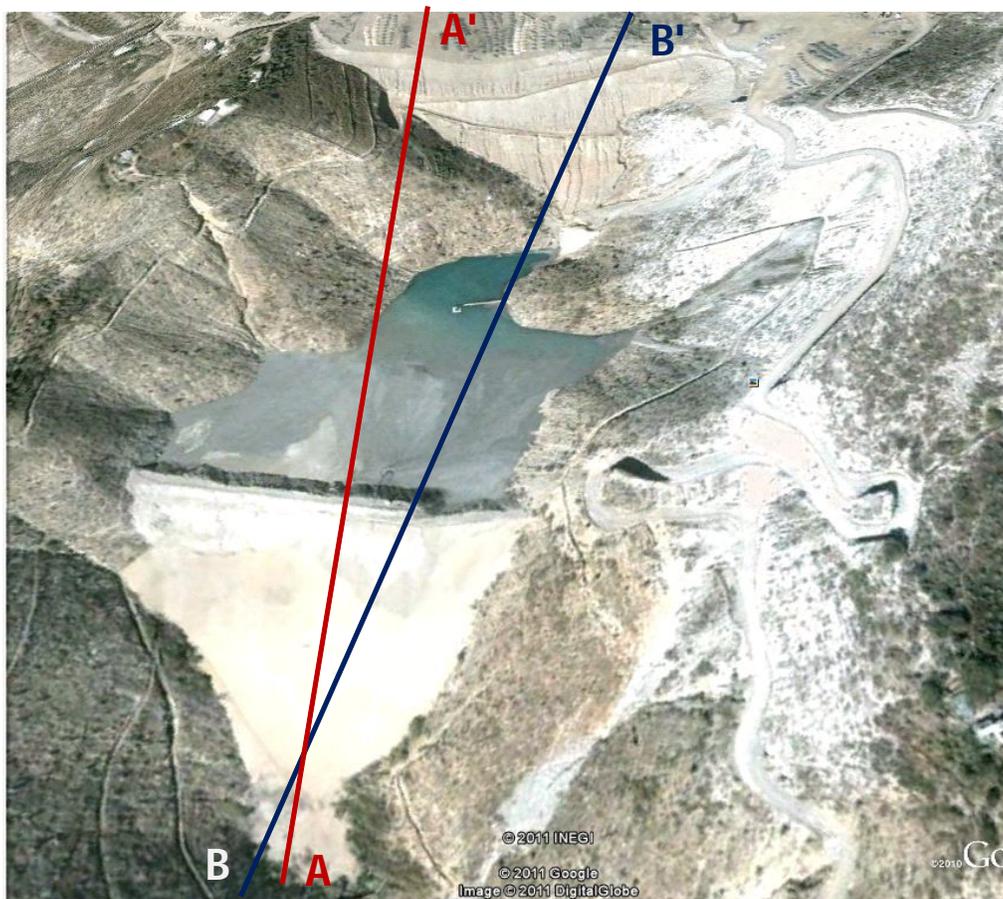
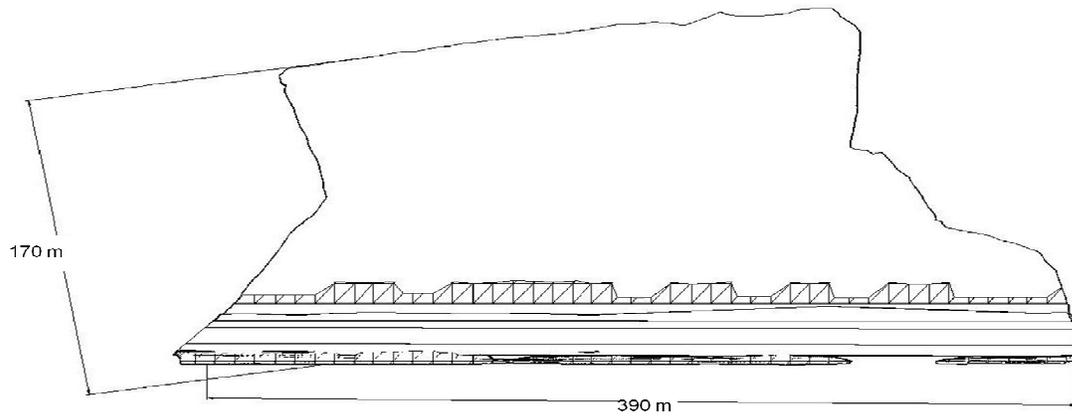


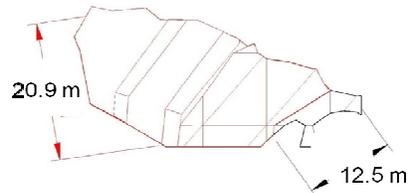
FIGURA 6.1. Orientación de las secciones de estudio en el depósito de jales

Considerando estas dos secciones se calculó la distancia vertical que existe de la corona al basamento, para diferentes cotas. Debido a la conformación del terreno, para ambas secciones el espesor de jal resulta diferente (Tablas 6.1 y 6.3). En las tablas 6.1 y 6.3 se muestra que para el corte A-A' el espesor máximo es de aproximadamente 74 m, mientras que para el corte B-B' es del orden de 106 m, cuando la cortina llega a la cota 1911.

Se determinó el largo del depósito (medido sobre la sección A A') y el ancho de la cortina contenedora en la boquilla del vaso de almacenamiento, conforme incrementa la altura. El largo va de 20.91 m en la base, a 170 m de ancho en la cota 1911. En lo que se refiere a la cortina en su base tiene 12.58 m de ancho y para la cota 1911 tiene 390 m (figura 6.2). En su altura actual 1847 m.s.n.m. el largo del depósito es de 130 m y el ancho de la cortina es de 219.1 m.



a) Condición final, cota 1911

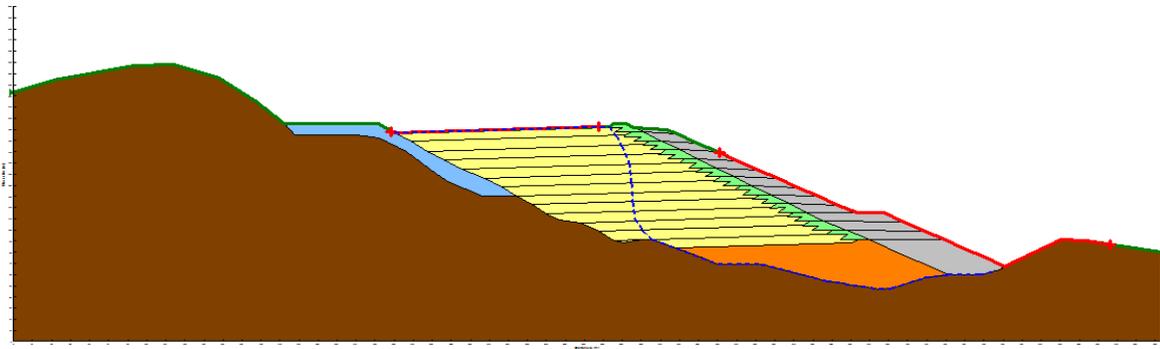


b) Condición inicial, cota 1743

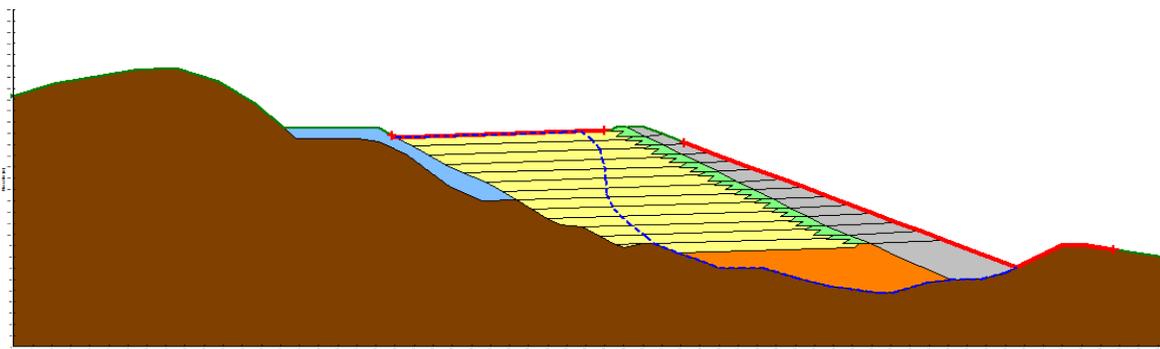
FIGURA 6.2. Dimensiones del depósito para jales, vista en planta

Para el cálculo del factor de seguridad se empleó el método de Morgenstern-Price, los valores obtenidos para las secciones A-A' y B-B' se muestran en las tablas 6.1, 6.2 y 6.3, en color azul se indica la condición actual.

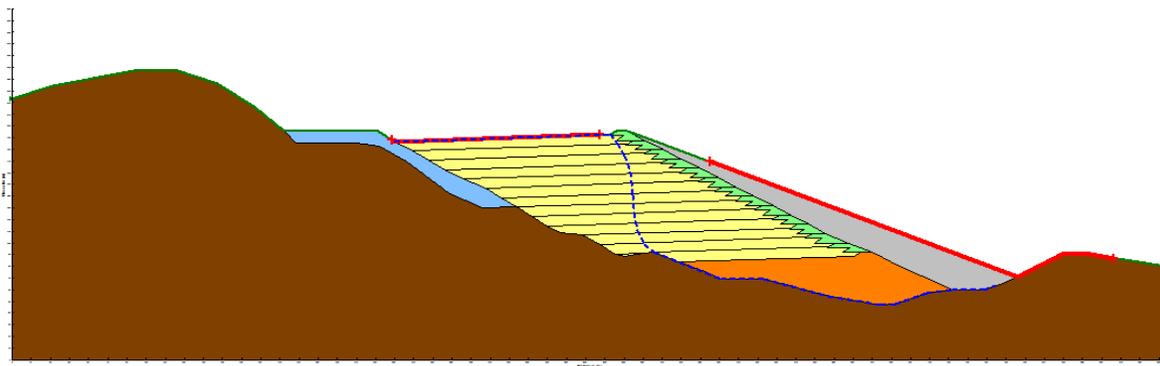
En la siguiente figura se muestran las tres propuestas de arroje con enrocamiento:



a) Propuesta 1. Arrope con enrocamiento, con berma.



b) Propuestas 2. Arrope con enrocamiento con terraplén en la corona.



c) Propuesta 3. Arrope con enrocamiento sin terraplén en la corona.

FIGURA 6.2. Propuestas de arrope con enrocamiento, sección B-B'

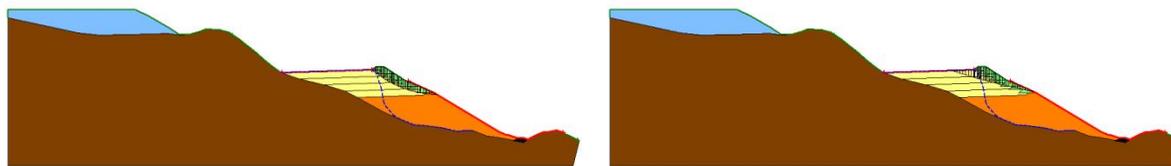
Tabla 6.1. Factor de seguridad para condición sin enrocamiento

Sección A-A´

Elevación a la corona (m.s.n.m.)	Factor de seguridad		Altura de la cortina (m)	Espesor de jal (m)	Volumen de jal almacenado (Mm ³)
	Condición sin enrocamiento (estático)	Condición sin enrocamiento (dinámico)			
1807	2.184	2.140	64	40.87	0.389
1815	2.119	1.976	72	47.43	0.535
1823	1.999	1.210	80	49.78	0.703
1831	1.399	0.839	88	52.52	0.895
1839	1.137	0.739	96	54.17	1.120
1847	0.854	0.725	104	54.69	1.377
1855	0.777	0.612	112	53.33	1.667
1863	0.782	0.574	120	53.56	1.986
1871	0.715	0.569	128	58.08	2.327
1879	0.694	0.539	136	61.69	2.691
1887	0.685	0.536	144	65.75	3.078
1895	0.667	0.517	152	70.59	3.482
1903	0.655	0.509	160	75.84	3.904
1911	0.489	0.479	168	74.75	4.346

De la tabla anterior podemos observar que la estructura es inestable desde la cota 1847, para condiciones estáticas y desde la cota 1831 para la condición accidental por sismo, por lo que no es posible continuar incrementando la cortina sin comenzar a estabilizar el talud, aunque como ya se ha mencionado antes, los parámetros para el cálculo del factor de seguridad fueron muy conservadores.

En la figura 6.3 se muestran las condiciones actuales (sin enrocamiento, cota 1839) en las que se encuentra el depósito para jales # 5.



FS=1.137 (estático)

FS=0.739 (dinámico)

Elevación 1839

FIGURA 6.3. Condición actual sin enrocamiento, sección A-A'

Tabla 6.2. Factores de seguridad **estáticos** para propuestas de arroyo con enrocamiento
Sección B-B'

Elevación a la corona (m.s.n.m.)	Factores de seguridad				Altura de la cortina (m)	Espesor de jal (m)
	Condición sin enrocamiento	Propuesta 1 Con berma	Propuesta 2 Con terraplén en la corona	Propuesta 3 Sin terraplén en la corona		
1807	2.806	8.515	13.460	15.910	64	42.59
1815	2.636	6.423	7.677	7.230	72	47.11
1823	1.864	4.726	6.230	5.927	80	51.26
1831	1.134	3.682	4.880	5.004	88	55.49
1839	0.962	3.325	3.911	3.760	96	59.07
1847	0.945	2.959	3.051	3.070	104	63.27
1855	0.800	2.716	2.720	2.712	112	69.40
1863	0.747	2.408	2.461	2.421	120	79.71
1871	0.734	2.213	2.128	2.210	128	82.94
1879	0.703	1.940	1.987	1.956	136	84.23
1887	0.690	1.787	1.845	1.790	144	86.30
1895	0.672	1.565	1.683	1.660	152	89.09
1903	0.668	1.404	1.621	1.525	160	97.15
1911	0.656	1.312	1.474	1.410	168	106.45

De la tabla anterior podemos observar que la propuesta 2 de enrocamiento brinda el mayor factor de seguridad de casi 1.5 en la cota 1911. Para la condición actual se

observa que estamos en el límite de la estabilidad con un factor de seguridad de 0.962 (figura 6.4).

Tabla 6.3. Factores de seguridad **dinámicos** para propuestas de arropo con enrocamiento
Sección B-B´

Elevación a la corona (m.s.n.m.)	Factores de seguridad				Altura de la cortina (m)	Espesor de jal (m)
	Condición sin enrocamiento	Propuesta 1 Con berma	Propuesta 2 Con terraplén en la corona	Propuesta 3 Sin terraplén en la corona		
1807	2.140	4.785	6.188	6.592	64	42.59
1815	1.976	3.894	4.320	4.176	72	47.11
1823	1.210	3.106	3.732	3.617	80	51.26
1831	0.839	2.589	3.161	3.173	88	55.49
1839	0.739	2.380	2.267	2.595	96	59.07
1847	0.725	2.157	2.225	2.222	104	63.27
1855	0.612	2.011	2.224	1.973	112	69.40
1863	0.574	1.746	1.992	1.776	120	79.71
1871	0.569	1.523	1.802	1.577	128	82.94
1879	0.539	1.356	1.402	1.409	136	84.23
1887	0.536	1.250	1.317	1.296	144	86.30
1895	0.517	1.132	1.192	1.171	152	89.09
1903	0.509	1.011	1.093	1.085	160	97.15
1911	0.479	0.936	1.060	1.028	168	106.45

De la tabla anterior se observa que el mayor factor de seguridad lo brinda la propuesta 2 de enrocamiento, con un valor de 1.060 para la cota 1911, aunque para las condiciones accidentales por sismo el factor de seguridad recomendado es de 1.1 y se alcanza en la cota 1895 (figura 6.5).

Sobre la sección B-B´ se encontraron factores de seguridad mayores, debido a que en ésta sección el basamento tiene un menor ángulo de inclinación. Hacia las orillas del embalse los ángulos son mayores (alrededor de 25°) y en la parte central disminuyen considerablemente (hasta 14°).

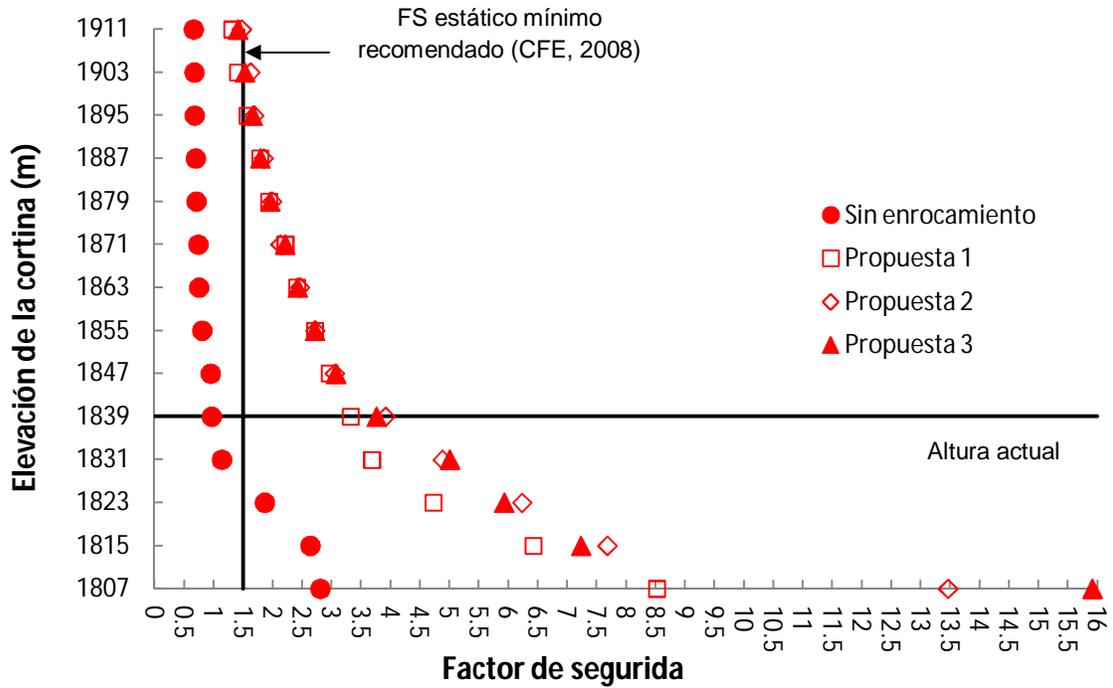


FIGURA 6.4. Factores de seguridad condiciones **estáticas** vs elevación de la cortina, sección B-B´

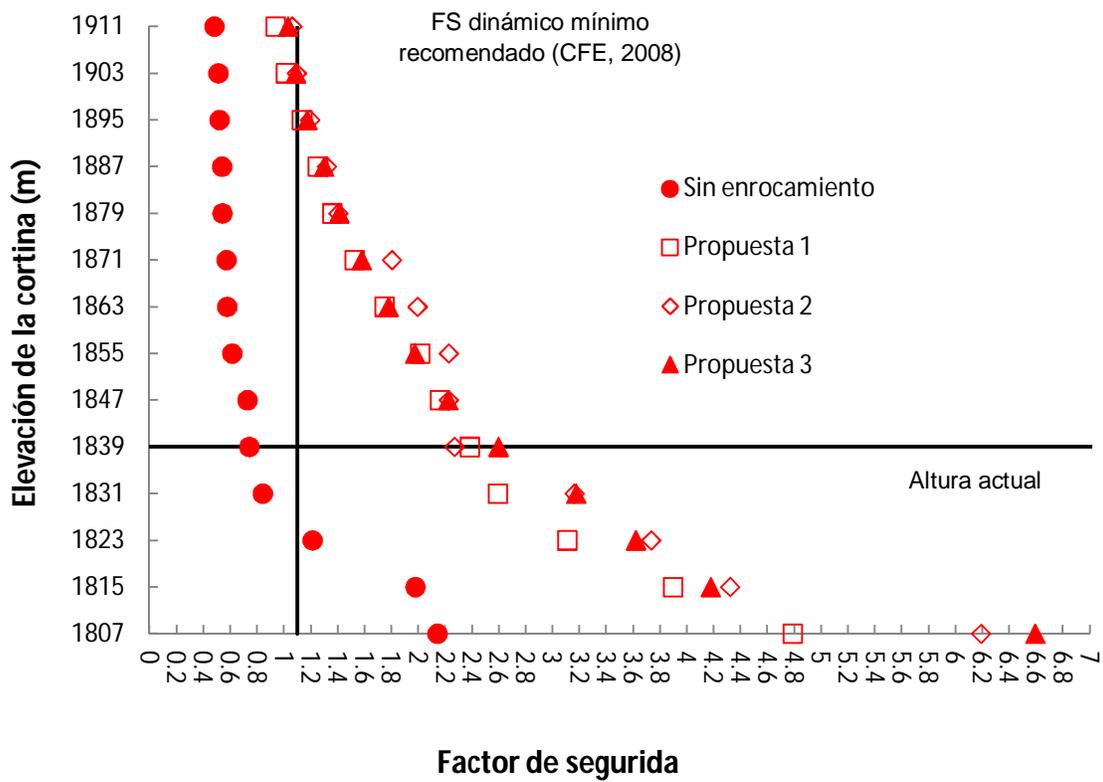
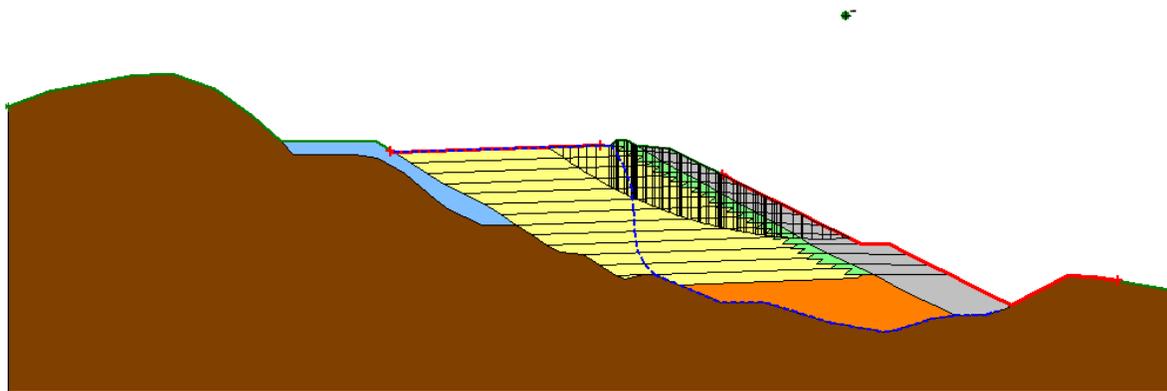


FIGURA 6.5. Factores de seguridad condiciones **accidentales por sismo** vs elevación de la cortina, sección B-B´

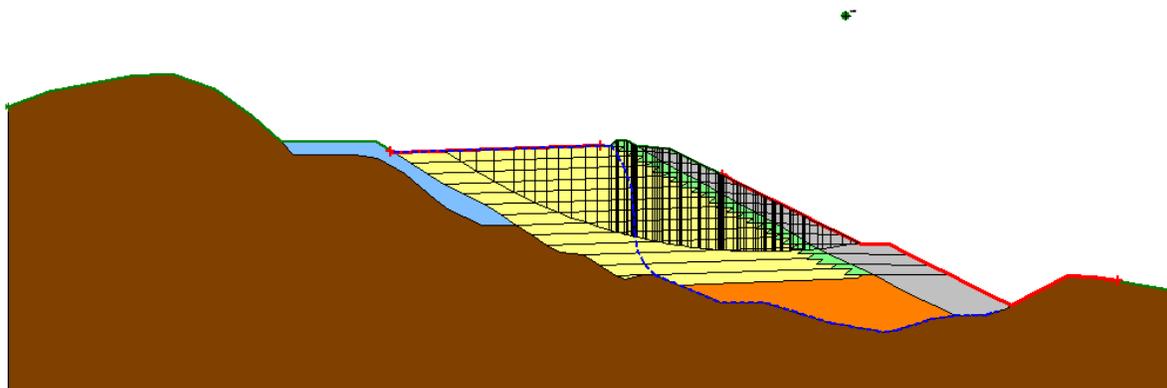
De las graficas anteriores (figuras 6.4 y 6.5) se observa que la mejor condición de estabilidad la brinda la *propuesta 2* de arroyo con enrocamiento, aunque como ya se vio en el capítulo anterior (tabla 5.1) se requiere mayor cantidad de enrocamiento. Por otro lado la *propuesta 3* brinda las condiciones de estabilidad intermedias y la cantidad de material de enrocamiento es similar al de la *propuesta 1*.

En las figuras siguientes (de 6.6-6.11) se muestran las superficies de falla correspondientes a cada propuesta, para una cota de la cortina igual a 1911 y su factor de seguridad asociado, en ellas se puede apreciar que la mayoría de los círculos de falla pasan por la zona de transición elevación 1807 (bloque marcado en color naranja) lo que nos lleva a concluir que es necesario enrocar a una altura mayor de donde se presenta este cambio de propiedades en el material.



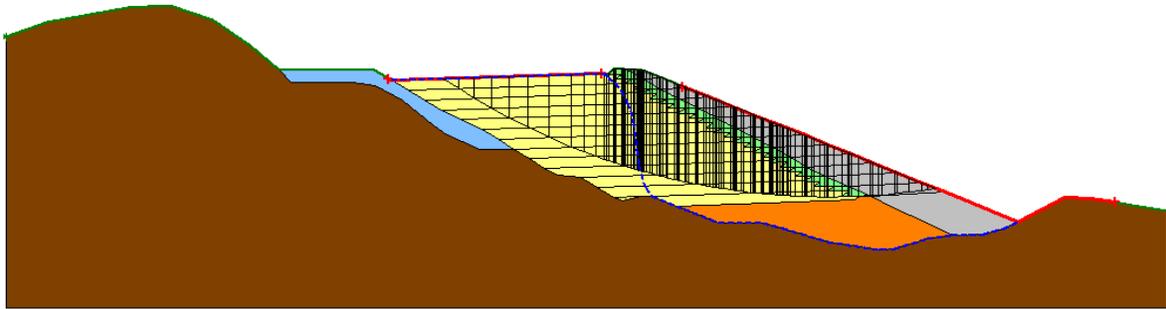
FS=1.317 Elev. 1911

FIGURA 6.6. Vista de perfil de la propuesta 1 de enrocamiento en condiciones estáticas



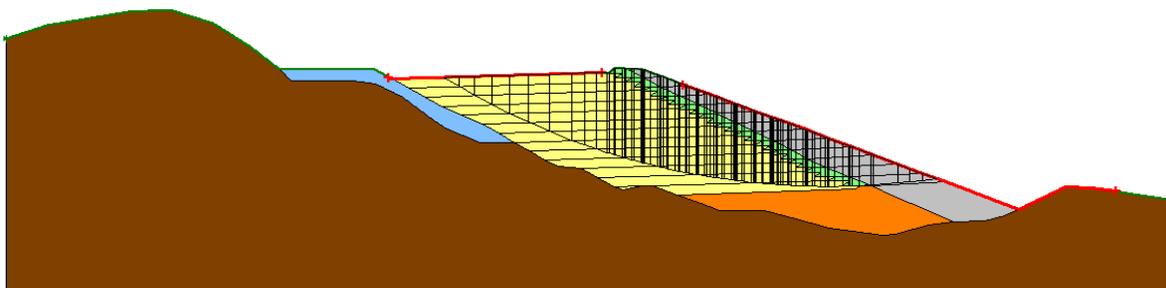
FS=0.936 Elev. 1911

FIGURA 6.7. Vista de perfil de la propuesta 1 de enrocamiento en condición accidental por sismo



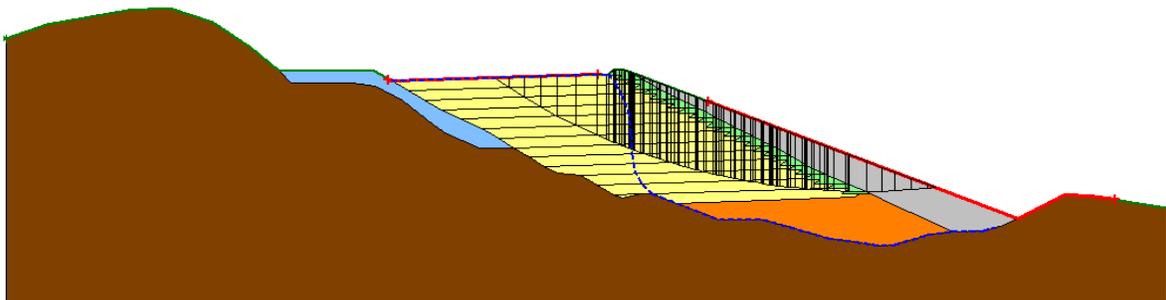
FS=1.474 Elev. 1911

FIGURA 6.8. Vista de perfil de la propuesta 2 en condiciones estáticas



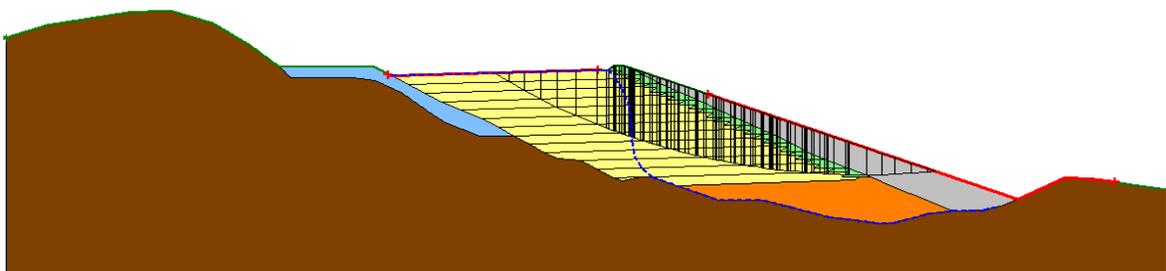
FS=1.060 ELEV. 1911

FIGURA 6.9. Vista de perfil de la propuesta 2 en condición accidental por sismo



FS=1.410 Elev. 1911

FIGURA 6.10. Vista de perfil de la propuesta 3 en condiciones estáticas



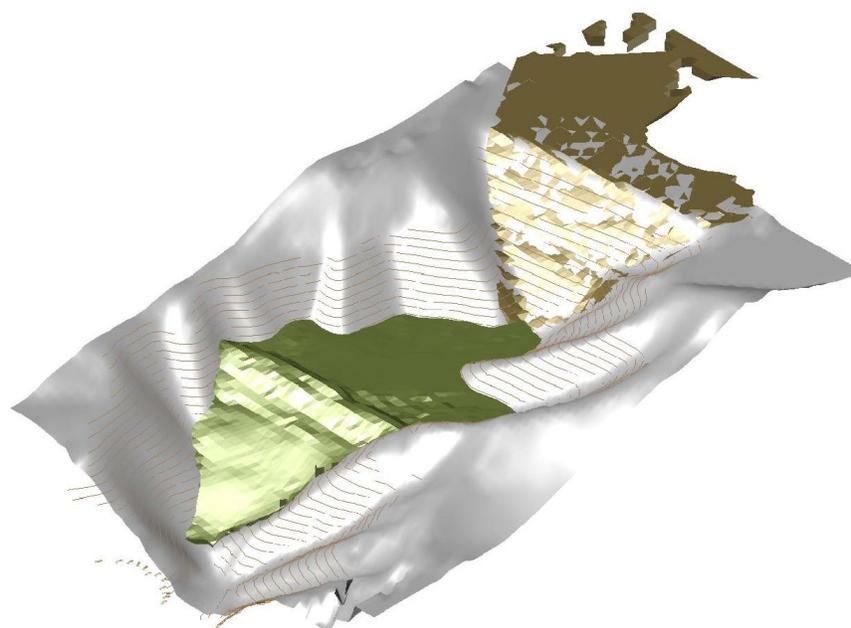
FS=1.028 Elev. 1911

FIGURA 6.11. Vista de perfil de la propuesta 3 en condición accidental por sismo

6.2. ALTURA MÁXIMA A LA QUE SE PUEDE SOBRELLEVAR LA CORTINA

De acuerdo con las figuras 6.4 y 6.5 y con base en la comparación de las tres propuestas de enrocamiento (figuras 6.6-6.11), se concluye que la propuesta que ofrece condiciones óptimas de estabilidad ($FS=1.41$) y menor cantidad de enrocamiento (1.63 Mm^3) es la propuesta 3.

Partiendo de la elección de la propuesta 3 de enrocamiento y tomando en cuenta lo recomendado por el Manual de obras civiles de la CFE, el factor de seguridad de 1.5 para las condiciones estáticas se cumple en la elevación 1903, y de 1.1 en condiciones accidentales por sismo en la cota 1895, por lo que siendo estrictamente rigurosos la elevación máxima a la que puede sobrelevarse la cortina es hasta la cota 1895.

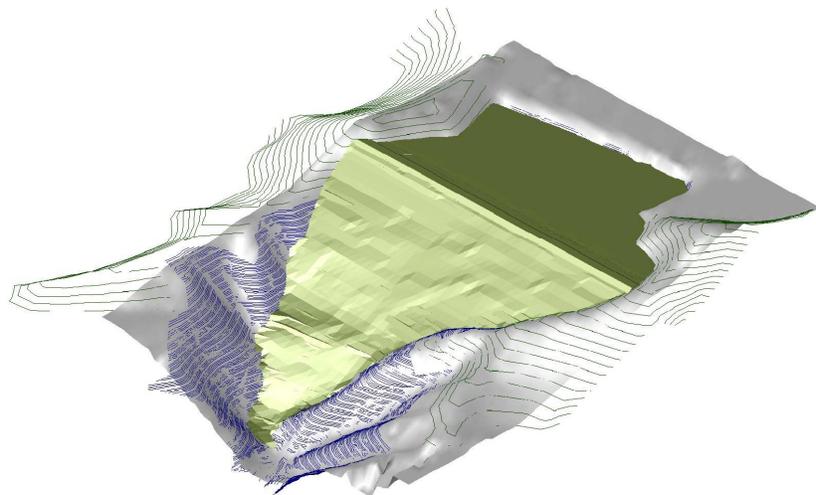


FS= 0.962 Elev. 1839

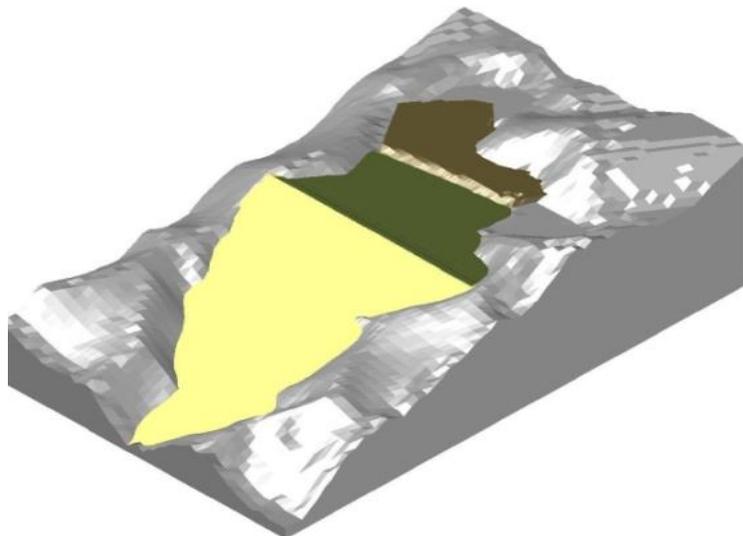
FIGURA 6.12. Condiciones del depósito para jales a diciembre 2010

Aunque le sea repetitivo al lector, me es importante recalcar que los parámetros alimentados al modelo fueron obtenidos de una muestra reconstituida con un valor de peso volumétrico de 1.63, estos son menores a los reales, puesto que para una muestra inalterada el peso volumétrico promedio obtenido fue de 2.33.

En conclusión, podemos sobrelevar la cortina hasta la cota 1911, si se cumple con la geometría propuesta para el enrocamiento.



Sin enrocamiento FS=0.656



Con enrocamiento FS=1.440

FIGURA 6.13. Condiciones del depósito para jales a la elevación 1911