

ANÁLISIS DEL DESLIZAMIENTO DEL TALUD NW DE LA CORTA MINERA DE COBRE LAS CRUCES

**Daza Sánchez Antonio, Gutiérrez–Ravé Caballero Jesús, López Pineda Germán, Carreras
Medina Manuel y Viñals Moreno Antonio.**

Grupo “Seminario Antonio Carbonell” RNM244. EPS de Belmez. Universidad de Córdoba.
Escuela Politécnica Superior de Belmez (Universidad de Córdoba)
me1dasaa@uco.es jgutierrezrave@uco.es

RESUMEN

Se realiza el análisis de la rotura poligonal de taludes con cinco dovelas que admiten diferentes presiones de agua, también cualquier rango de continuidad estructural en el relevo de la superficie de rotura de las dovelas. El método desarrollado en la EPSB calcula el drenaje y ha permitido el dictamen geotécnico con el seguimiento retrospectivo del coeficiente de seguridad, en el análisis del deslizamiento del talud NW de la corta minera de Cobre Las Cruces.

Palabras clave: Rotura poligonal, relevo discontinuo, saturación, presión de agua, tensiones naturales.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes requiere un modelo de cálculo para el deslizamiento poligonal del terreno conociendo la presión del agua, las tensiones naturales y la caracterización geomecánica de rocas blandas. El equilibrio límite requiere el equilibrio de fuerzas horizontales y la corrección del deslizamiento global del talud NW de la Corta Minera de Cobre Las Cruces en 2019 (Gerena-Sevilla), éste es el objetivo del método utilizado de “Rotura poligonal y relevo discontinuo” donde el inicio de la fractura por la base de rotura de las dovelas requiere un porcentaje de continuidad o relevo discontinuo, que depende de la inclinación y resistencia al corte de discontinuidades, también de la disipación de la presión de agua y de la deformación por voladuras. El análisis geotécnico considera que no se moviliza la fuerza cortante vertical entre las dovelas, el deslizamiento global del talud se basa en los parámetros residuales del terreno y las permeabilidades multicapa.

El método ha sido aplicado en taludes de baja permeabilidad con deslizamientos poligonales (Benamejé, Lignitos de Meirama) y en la vigilancia de taludes mineros en la cuenca carbonífera del Guadiato (San Ricardo, Cervantes, San Antonio) y actualmente en el análisis del deslizamiento del talud NW de la Corta de Cobre las Cruces se ha conocido la deformación y la presión hidrostática con piezómetros ha cuantificado la saturación del talud. Las deformaciones progresivas no han sido causadas por la sismicidad, son causadas por las tensiones inducidas por voladuras que evolucionan a la rotura con la presencia de agua. Con ensayos se deduce la resistencia al corte de discontinuidades y con Geotécnica Sísmica se han medido las tensiones naturales ($K_0=1'6$) y el ángulo de fricción. La estabilidad requiere considerar las discontinuidades y la presión de agua, también las tensiones naturales y el control de vibraciones para evitar dañar la roca remanente.

2. MATERIALES

Después de sectorizar el terreno se inicia el seguimiento de la estabilidad de los taludes mediante la auscultación del comportamiento, en superficie no se detecta grieta de tracción, al iniciarse los desplazamientos de hasta 1 mm/día y se disipan las presiones de poro, el control por satélite (figuras 1, 2 y 3) y topográfico que se establece en puntos de control. Necesitamos conocer la dirección y velocidad de los desplazamientos que aportan la inclinación del plano de fractura de las dovelas inestables y grietas de tracción con desarrollo significativo que requiere la vigilancia de deformaciones, ello hasta que está suficientemente claro el mecanismo de rotura que origina el movimiento activo del terreno sobre el plano de rotura conocido con inclinómetros. El análisis directo del talud conociendo los parámetros geomecánicos residuales, las tensiones y los módulos de deformación obtenidos con Geotecnia Sísmica para el análisis del talud NW de Cobre Las Cruces. El análisis inverso de taludes se realiza “a posteriori”, después del deslizamiento con el estado tensional y deformaciones, a partir de los desplazamientos reales, volúmenes y parámetros resistentes.

Las familias importantes de discontinuidades en el deslizamiento (figura 4) son la estratificación de las margas azules del mioceno con buzamiento 3°E, la J1 subvertical a 50°N con dirección NW–SE y es la grieta en la pista norte de la mina, y la J2 vertical con dirección E–W de la grieta lateral.

En el macizo rocoso si no disponemos de piezómetros se hace difícil cuantificar presiones de agua diferentes a la freática, no es nuestro caso ya que disponemos de medidas de piezómetros que disipaban las presiones de poro. Cuando el terreno de baja permeabilidad contiene agua y apenas se permite su circulación se mantiene la presión de agua en el macizo rocoso cuando posee discontinuidades cerradas. El drenaje con sondeos horizontales habría disminuido la presión del agua en el talud, la evacuación sostenida de unos 10 l/min/dren puede rebajar el nivel freático minimizando efectos negativos y prevenir el flujo ascensorial. El drenaje del talud reduce la carga que actúa en el terreno, se estima que los sondeos horizontales, con una profundidad de 30 m, drenarían parte del talud y la separación horizontal entre drenes se considera como la longitud horizontal media de una dovela. Podría existir agua colgada o confinada en alguna dovela y es importante conocer esta distribución de presiones. La instrumentación piezométrica en la cuenca del Guadiato con un 40% de saturación provocó inestabilidad, se dan presiones de agua hasta de 7 kg/cm² a 100 m de profundidad.

Actualmente en Cobre Las Cruces el 70% de saturación marca el equilibrio límite del deslizamiento, hubiese sido importante disminuir la presión del agua en el talud, la variación del nivel piezométrico inicia la fractura en estos terrenos de baja permeabilidad o con variada permeabilidad multicapa. Se han considerado las isopiezas de los últimos años estableciéndose el freático con una determinada saturación, que puede ser suficiente para iniciar la rotura del talud desde el equilibrio límite, se conforma un frente húmedo que hace subir el freático con los aportes altos de lluvia y de la presencia de agua en el entorno de la mina elevando la saturación.

Se ha introducido el término “relevo discontinuo” en el inicio de la fractura por el pie o por el fondo del talud como porcentaje de la continuidad del plano de rotura inicial de cada una de las cinco dovelas consideradas en la tabla 1, junto a la rotura poligonal se presenta el dibujo del ajuste con una curva (figuras 5 y 6). Un relevo discontinuo inferior al 35% representa margas duras o pizarras (nivel 4 en Cobre Las Cruces) y juntas rugosas y cerradas a través del macizo rocoso (tabla 1); en el rango de relevo discontinuo del 35 al 55% están los niveles 2 y 3 de margas y tenemos juntas abiertas que consideran la fractura pico. A las margas meteorizadas y a los planos de rotura que poseen discontinuidades entre el 55 y 75% se le aplican parámetros geomecánicos residuales con corte artificial o triturado compactado <1 cm. Por último, en el relevo discontinuo del 75 al 95%, nivel 1 superficial de margas o para juntas pulidas, el valor residual de resistencia al corte se obtiene de arcilla triturada húmeda (tabla 1).

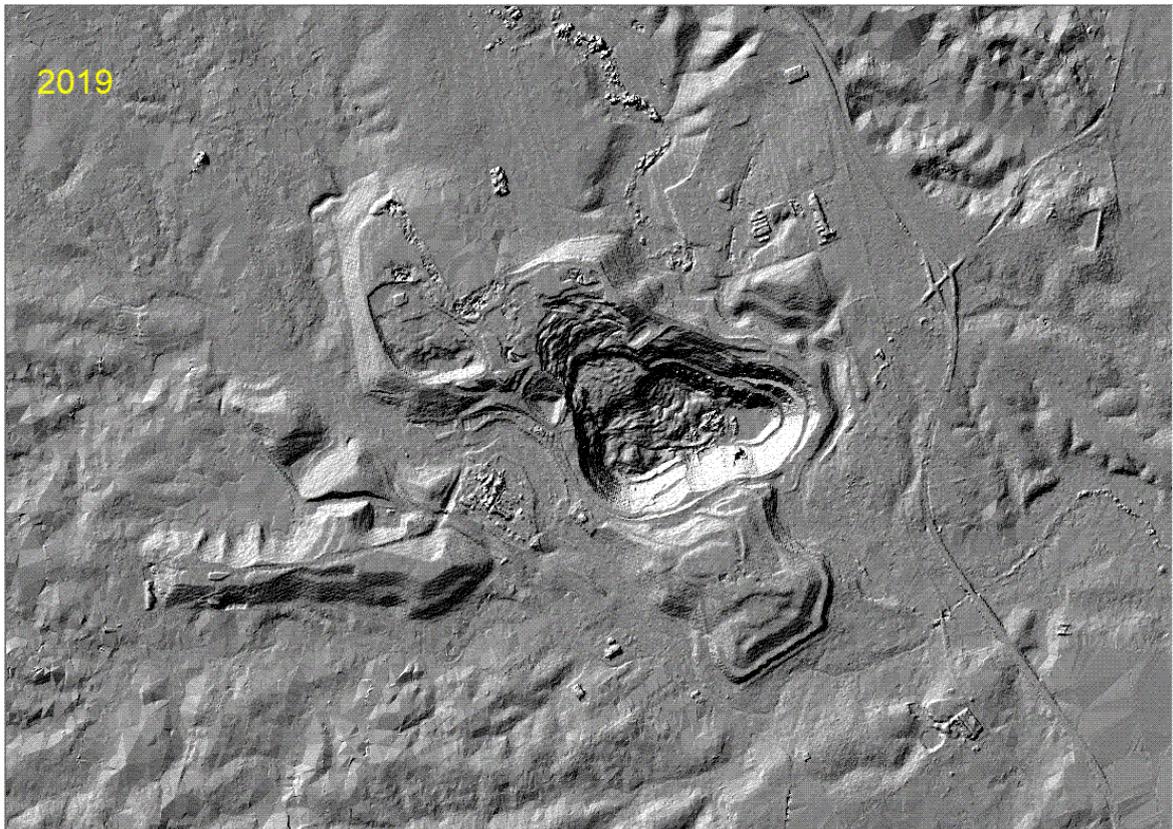
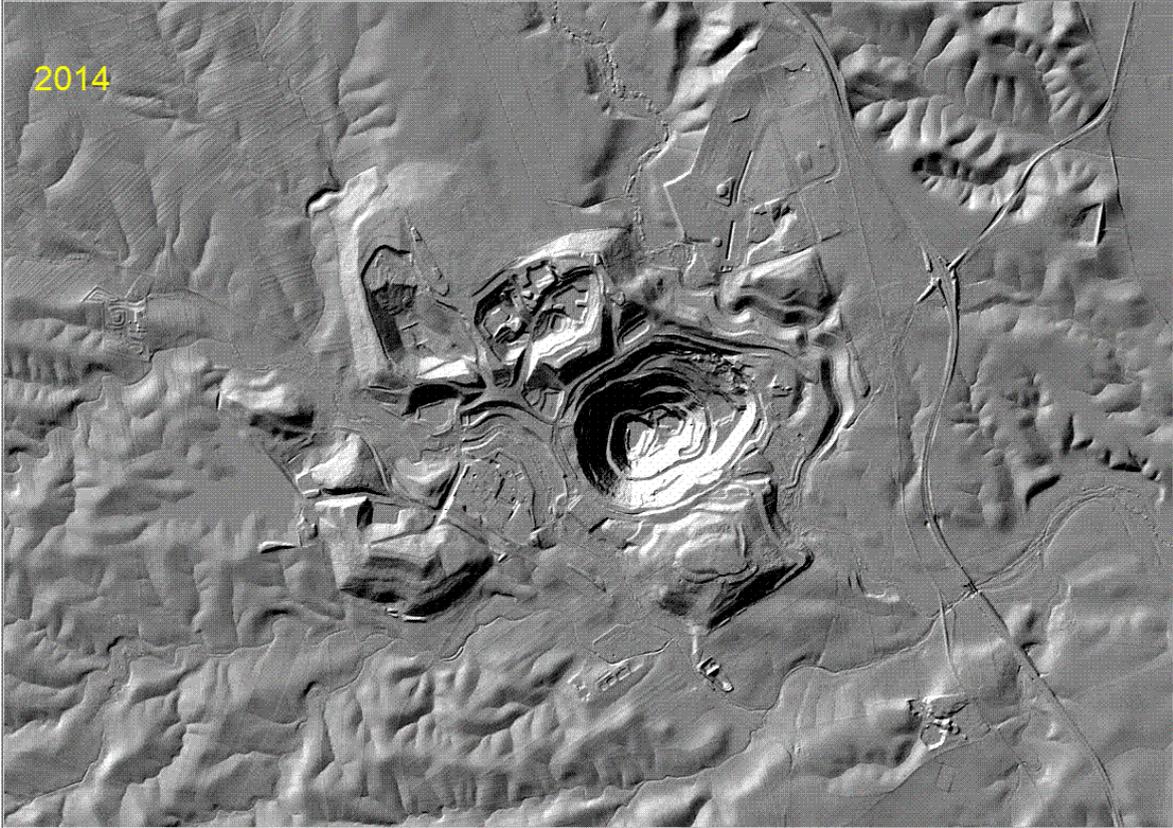


Figura 1: Fotos satélite de la Corta de Cobre las Cruces antes y después del deslizamiento del NW-SE.

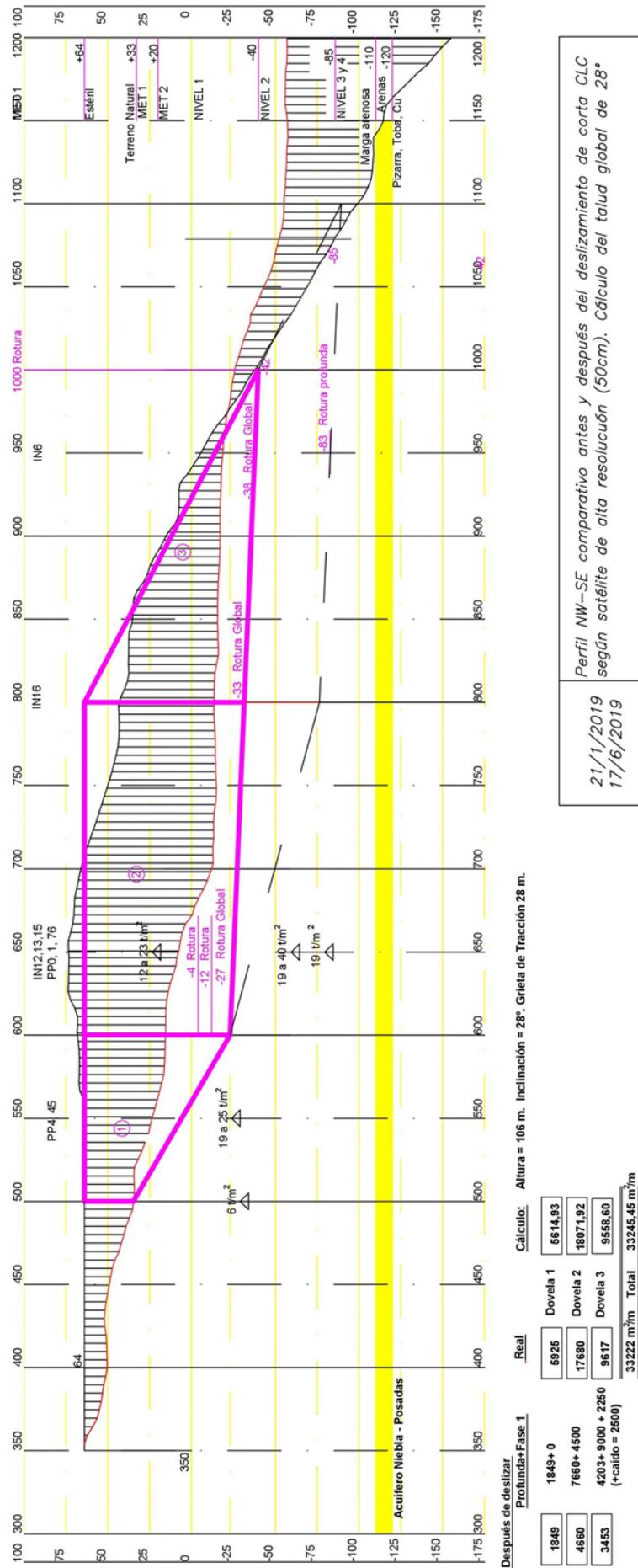


Figura 2. Deslizamiento global Cobre Las Cruces

21/1/2019 17/6/2019	Perfil NW-SE comparativo antes y después del deslizamiento de corta CLC según satélite de alta resolución (50cm). Cálculo del talud global de 28°
Plano Global	Grupo RNM 244 "Seminario Antonio Carbonell" EPSB Belmez. Universidad de Córdoba Area de Ingeniería del Terreno (Departamento de Mecánica)

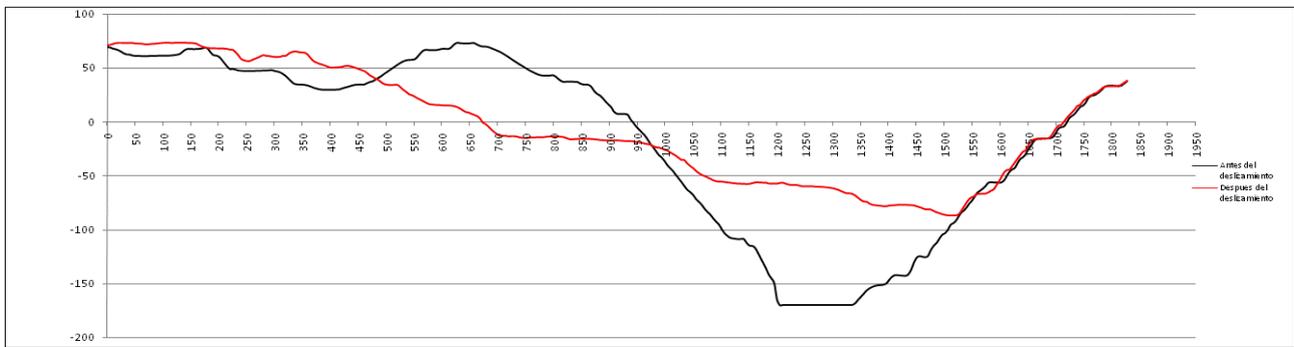


Figura 3: Perfil de satélite antes y después del deslizamiento.

3. METODOLOGÍA

La aplicación del método “Rotura poligonal y relevo discontinuo” en distintos terrenos o macizos rocosos para rotura poligonal/curva permite la corrección del movimiento y un desmonte en coronación o el empuje horizontal sobre un muro o pilotes. Es útil en cimentaciones con la carga portante de las dovelas pasivas como una sobrecarga vertical. Las dovelas activas y pasivas cumplen el equilibrio de fuerzas incluyendo las horizontales y exteriores. Se admiten variables de presión de agua como nivel freático y multicapa que puede afectar a las cinco dovelas con distinta permeabilidad (figuras 5 y 6), además el acuífero superficial de alteración en la 1ª dovela (grieta de tracción) incrementaría la saturación, también algún acuífero confinado puede conectar con la rotura e incrementa la presión de agua en la dovela afectada. Conociendo las fuerzas que actúan y la resistencia al corte se determina el empuje horizontal en el análisis de equilibrio límite que debe predecir las variables con los tanteos, por ello es útil para análisis retrospectivos sin considerar la deformación del terreno. El coeficiente de seguridad “FS” se puede determinar con el cociente entre el sumatorio de la resistencia del terreno al deslizamiento y el sumatorio de fuerzas cortantes desestabilizadoras, para cada aumento de porcentaje de continuidad del plano de fractura de cada dovela supone un sistemático decrecimiento de la cohesión y del ángulo de fricción (tablas 2 y 3) hasta llegar a la inestabilidad global o no convergencia del sistema de relevo discontinuo en la rotura inicial de las dovelas, así valores de FS inferiores al equilibrio límite supone un incremento del desplazamiento del talud.

La superficie de rotura por el pie o el fondo de talud es automática en el perfil de las figuras 5 y 6, con la inclinación de la rotura “ Ψ ” y la distancia en la base “D” de las dovelas hasta disponer la altura del talud “H” y el área de las dovelas “S”, se introducen en la hoja de cálculo de las tablas 2 y 3. Esto junto a los parámetros geomecánicos del relevo discontinuo (tabla 1) permite conocer el proceso de reducir la resistencia al corte en la pre-rotura. El método se ha implantado en una hoja de cálculo, la metodología consiste en el análisis mecánico de cada dovela en que se ha dividido el talud deslizante y según las fuerzas desde las dovelas activas hacia las pasivas (tablas 2 y 3), supone que no se movilizan tensiones cortantes en las caras verticales de contacto de las dovelas que subestima el factor de seguridad. Introduciendo la inclinación y distancia de la base de rotura se tiene la forma de la superficie deslizante, también la altura de la grieta de tracción de pre-rotura inicia la 1ª dovela que es función de la altura y ángulo de talud, la separación de la 2ª y 3ª dovela justifica la cabeza de talud.

Variables de cada dovela son la presión de agua y el relevo discontinuo en rotura (tabla 1), con la saturación desde condiciones secas/drenadas a saturadas al 90%. La presión de agua “u” puede ser la hidrostática (freática) obtenida en la hoja de cálculo de las tablas 2 y 3, la fuerza hidrostática en el plano de rotura “U” es el producto de la presión “u” por la distancia en la base de rotura “D”. La cohesión “C” y el ángulo de fricción básico “ ϕ ” (entre el efectivo y el residual) dependen del porcentaje de relevo discontinuo en las dovelas. Cuando el freático es inferior a la horizontal del pie del talud en las dovelas pasivas se dispone presión de agua nula.

RELEVO DISCONTINUO EN ROTURA INICIAL (%)

(%)	FRICCIÓN BÁSICO (Ø)	COHESION BÁSICA (T/m ²)	
0	28,00	30,00	PIZARRA/TOBA/Cu
10	26,00	25,00	PIZARRA/TOBA/FRAC
25	24,00	20,00	ARENA/MARGA ARENA
35	22,00	15,00	NIVEL3/4.DURA
45	20,00	10,00	NIVEL2.AZULMASIVA
55	18,00	6,00	NIVEL1.PRECONSOLI
65	16,00	3,00	MARGA AZUL.MET 2
75	14,00	1,00	MARGA CLARA.MET 1
85	12,00	0,00	RESIDUAL.NIVEL1/2
100	10,00	0,00	RESIDUAL.MET 1/2

PRESIÓN DE AGUA EN ISOPIEZAS DE SATURACIÓN T/m²

%	1 ^a ACTIVA	2 ^a ACTIVA	3 ^a ACTIVA	4 ^a PASIVA	5 ^a PASIVA
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,00	2,00	1,00	0,00	0,00
35	5,00	5,00	2,00	0,00	0,00
45	10,00	15,00	5,00	0,00	0,00
55	20,00	30,00	10,00	0,00	0,00
65	30,00	40,00	15,00	0,00	0,00
75	40,00	50,00	20,00	0,00	0,00
85	45,00	60,00	25,00	0,00	0,00
100	50,00	70,00	30,00	0,00	0,00

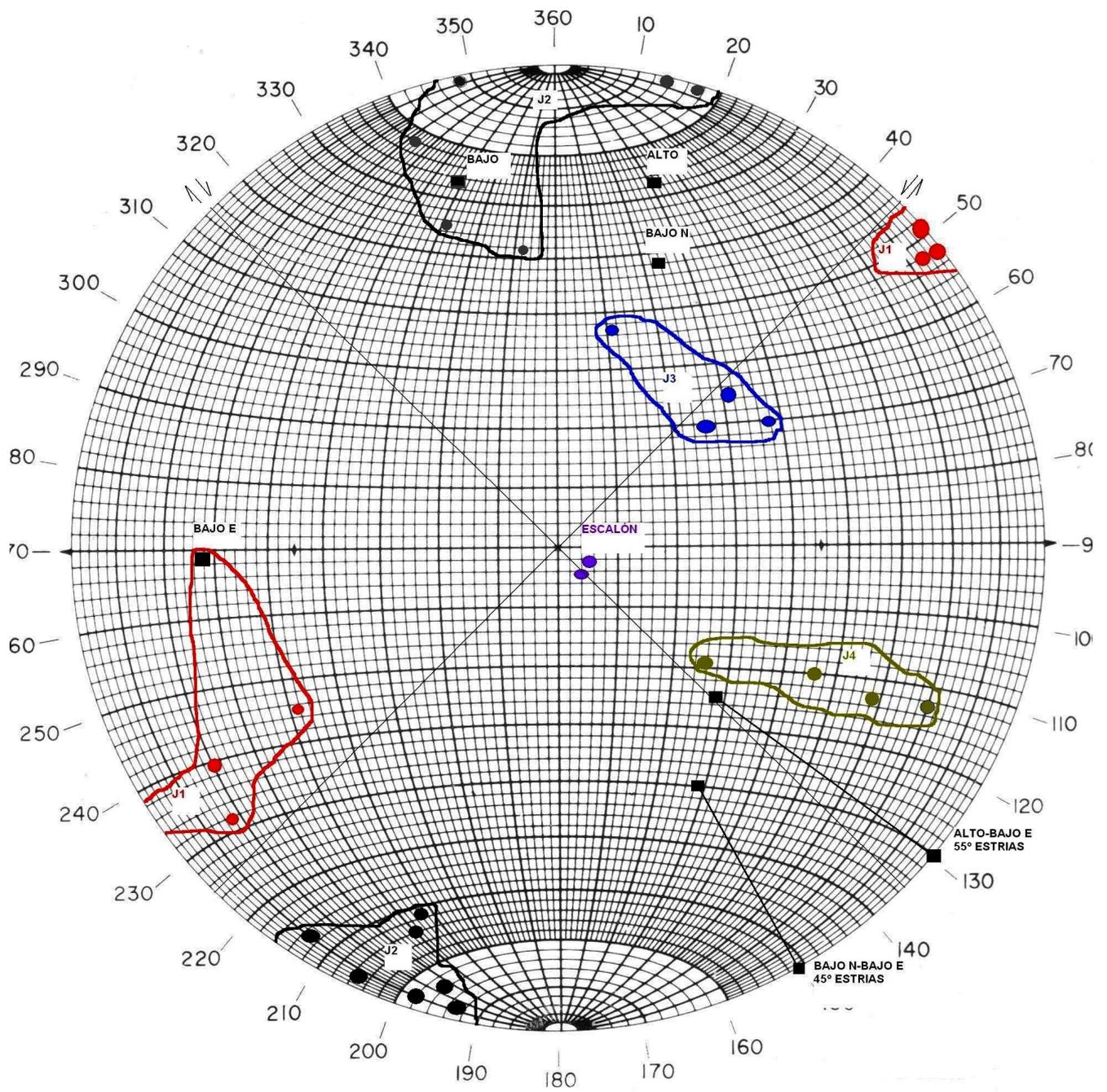
Tabla 1. Relevos discontinuos en Cobre Las Cruces.

Se puede estimar la separación entre drenajes como la longitud horizontal media de una dovela "Lmedia". El flujo hacia el pie del talud depende del nivel freático y de la isopieza de saturación (desplegando el porcentaje en la figura 5) obteniendo la presión de agua (Tabla 1) en la base de las dovelas. En terreno multicapa se introduce la permeabilidad lateral "K" en cada dovela para obtener el caudal de circulación o dren "Q" (1) ($Q = L_{media} \cdot Q_{filtración/m}$). La potencia mojada "e" medida en la vertical de la cabeza del talud desde el freático a la rotura y el gradiente hidráulico "i" es el cociente entre la diferencia de potencial o carga hidráulica "H-h" (altura de talud menos la profundidad menor del freático) y la longitud horizontal recorrida en rotura "L". La velocidad de filtración media "Vm" ($V_m = K i / n$) es la relación de la velocidad de descarga de Darcy y la porosidad "n", la baja porosidad indica velocidad de filtración alta. Así la interacción entre caudal de drenaje y la saturación sería:

$$Q = \text{área} [K(H-h) / L] = e L [K (H-h) / L] = K e (H-h) \quad (1)$$

En la hoja de cálculo de las figuras 5 y 6 se representa la línea de flujo del acuífero freático según la isopieza de saturación (%) del talud, que es introducida en una selección desplegable, y la permeabilidad lateral del terreno en cada dovela que es la suma de K de poro y K de falla o discontinuidad abierta.

Si a mayor profundidad existe un macizo rocoso más impermeable "K2" se presupone un ángulo de incidencia "i" de líneas de corriente con ángulo de refracción "t" sub-vertical en profundidad ($\tan i / \tan t = K/K_2$) que no da red de filtración al pie de talud, por el contrario, si en el terreno inferior a la superficie de rotura la permeabilidad es mayor entonces la red de flujo de filtración se transmite o refracta adoptando la posición sub-horizontal hacia la base del talud. La profundidad de la referencia que delimita la red de flujo paralela al nivel freático se ha estimado como la superficie de rotura en las dovelas pasivas.



DESPLAZAMIENTO NW-SE EN COBRE LAS CRUCES. DISCONTINUIDADES Y ROTURA ALTO-BAJO SEMINARIO ANTONIO CARBONELL(GRUPO RNM244).EPSB BELMEZ-UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Figura 4: Rotura y grieta: discontinuidades J1 y J2, estratificación alto-bajo E.

DESPLAZAMIENTO GLOBAL INICIAL.POLIGONAL Y RELEVO DISCONTINUO

TALUD COBRE LAS CRUCES.	SATURACIÓN 1ª	75 %	75 %	SATURACIÓN
ALTURA (H)	106,18 m	DISCONTINUO 1ª	100 %	DISCONTINUO 2ª
$\sigma_{compresión}$	100,00 kg/cm²	DISCONTINUO 3ª	100 %	DISCONTINUO 4ª 5ª
M. POISSON	0,50	*Módulo Young (-) Gpa	2	
* $\sigma_{tracción}$	18,10 kg/cm²	*Módulo Young (+) Gpa	6	Ángulo global =28°

DOVELA: 1ª ACTIVA

DISTANCIA EN LA BASE DEL PLANO DE ROTURA (m) (D1)	114,50
SUPERFICIE DE LA DOVELA (m ²) (S1)	5.614,93
PESO ESPECÍFICO APARENTE (T/m ³) (γ1)	1,90
INCLINACIÓN O BUZAMIENTO DE PLANO ROTURA (ψ1)	30,00

ANGULO FRICCIÓN BÁSICO.ROTURA INICIO DISCONTINUA (Ø1)	10,00
COHESION BÁSICA.ROTURA INICIAL DISCONTINUA T/m ² (C1)	0,00
PRESION DE AGUA EN ISOPIEZA DE SATURACIÓN T/m ² (u1)	40,00
PESO DE LA DOVELA EN POSIBLE ROTURA.....(W1)	10.668,37
ESFUERZO NORMAL EN LA BASE DE ROTURA (N1)	9.239,08
RESISTENCIA AL CORTE EN EL PLANO DE ROTURA...(R1)	821,52
ESFUERZO TANGENCIAL EN LA ROTURA.....(T1)	5.334,18
FUERZA HIDROSTÁTICA EN PLANO DE ROTURA (Ton) (U1)	4.580,00

DOVELA: 2ª ACTIVA

DISTANCIA EN LA BASE DEL PLANO DE ROTURA (m) (D2)	200,00
SUPERFICIE DE LA DOVELA (m ²) (S2)	18.071,92
PESO ESPECÍFICO APARENTE (T/m ³) (γ2)	1,95
INCLINACIÓN O BUZAMIENTO DE PLANO ROTURA (ψ2)	3,00

ANGULO FRICCIÓN BÁSICO.ROTURA INICIO DISCONTINUA (Ø2)	10,00
COHESION BÁSICA.ROTURA INICIAL DISCONTINUA T/m ² (C2)	0,00
PRESION DE AGUA EN ISOPIEZA DE SATURACIÓN T/m ² (u2)	50,00
PESO DE LA DOVELA EN POSIBLE ROTURA.....(W2)	35.240,24
ESFUERZO NORMAL EN LA BASE DE ROTURA (N2)	35.191,95
RESISTENCIA AL CORTE EN EL PLANO DE ROTURA...(R2)	4.442,02
ESFUERZO TANGENCIAL EN LA ROTURA.....(T2)	1.844,33
FUERZA HIDROSTÁTICA EN PLANO DE ROTURA (Ton) (U2)	10.000,00

DOVELA: 3ª ACTIVA

DISTANCIA EN LA BASE DEL PLANO DE ROTURA (m) (D3)	200,00
SUPERFICIE DE LA DOVELA (m ²) (S3)	9.558,60
PESO ESPECÍFICO APARENTE (T/m ³) (γ3)	2,00
INCLINACIÓN O BUZAMIENTO DE PLANO ROTURA (ψ3)	3,00

ANGULO FRICCIÓN BÁSICO.ROTURA INICIO DISCONTINUA (Ø3)	10,00
COHESION BÁSICA.ROTURA INICIAL DISCONTINUA T/m ² (C3)	0,00
PRESION DE AGUA EN ISOPIEZA DE SATURACIÓN T/m ² (u3)	20,00
PESO DE LA DOVELA EN POSIBLE ROTURA.....(W3)	19.117,20
ESFUERZO NORMAL EN LA BASE DE ROTURA (N3)	19.091,00
RESISTENCIA AL CORTE EN EL PLANO DE ROTURA...(R3)	2.660,95
ESFUERZO TANGENCIAL EN LA ROTURA.....(T3)	1.000,52
FUERZA HIDROSTÁTICA EN PLANO DE ROTURA (Ton) (U3)	4.000,00

RESULTADO

TENSIÓN HORIZONTAL (LATERAL GEOSTÁTICA) T/m ² "TH"	201,74
TENSIÓN LATERAL NATURAL (aceleración sísmica < 0,06g) "TH"	325,00
SUMATORIO DE FUERZAS RESISTENTES..... (FR)	7.804,69
SUMATORIO DE FUERZAS DESESTABILIZADORAS..... (FM)	7.460,49

COEFICIENTE DE SEGURIDAD DEL TALUD (FS) 1,00

OPCIONES

COEFICIENTE DE SEGURIDAD ADOPTADO (FS) 1,00

EMPUJE HORIZONTAL SOBRE MURO/ANCLAJE PIE Horiz. (EH)	(19,21)
DESMONTE EN CABEZA (TONELADAS/METRO) (Wdesmonte)	(44,35)
DESMONTE EN CABEZA (METROS CUBICOS/METRO) (Wdesmonte/γ)	(22,75)

TALUD:	106,18		
SATURACIÓN 1AC	75 %	SATURACION	75 %
DISCONTINUO 1AC	100 %	DISCONTINUO 2AC	100 %
DISCONTINUO 3AC	100 %	DISCONTINUO PASIVA	100 %

Tabla 2. Deslizamiento global inicial Cobre las Cruces

HIPOTESIS PROFUNDA ANTERIOR A ROTURA (RELEVO DISCONTINUO)

TALUD COBRE LAS CRUCES.	SATURACIÓN 1ª	10 %	10	SATURACIÓN
ALTURA (H)	154,50 m	DISCONTINUO 1ª	100 %	DISCONTINUO 2ª
$\sigma_{com\ presión}$	100,00 kg/cm ²	DISCONTINUO 3ª	65 %	DISCONTINUO 4ª 5ª
M. POISSON	0,50	*Módulo Young	(-) Gpa	2
* $\sigma_{tracción}$	18,10 kg/cm ²	*Módulo Young	(+) Gpa	6

Ángulo global = 28°

DOVELA: 1ª ACTIVA		
DISTANCIA EN LA BASE DEL PLANO DE ROTURA (m)	(D1)	114,50
SUPERFICIE DE LA DOVELA (m ²)	(S1)	5.614,93
PESO ESPECÍFICO APARENTE (T/m ³)	(γ 1)	1,90
INCLINACIÓN O BUZAMIENTO DE PLANO ROTURA	(ψ 1)	30,00

ANGULO FRICCIÓN BÁSICO. ROTURA INICIO DISCONTINUA (\emptyset 1)		10,00
COHESION BÁSICA. ROTURA INICIAL DISCONTINUA T/m ² (C1)		0,00
PRESION DE AGUA EN ISOPIEZA DE SATURACIÓN T/m ² (u1)		0,00
PESO DE LA DOVELA EN POSIBLE ROTURA..... (W1)		10.668,37
ESFUERZO NORMAL EN LA BASE DE ROTURA (N1)		9.239,08
RESISTENCIA AL CORTE EN EL PLANO DE ROTURA... (R1)		1.629,10
ESFUERZO TANGENCIAL EN LA ROTURA..... (T1)		5.334,18
FUERZA HIDROSTÁTICA EN PLANO DE ROTURA (Ton) (U1)		0,00
DOVELA: 2ª ACTIVA		
DISTANCIA EN LA BASE DEL PLANO DE ROTURA (m)	(D2)	207,00
SUPERFICIE DE LA DOVELA (m ²)	(S2)	22.401,58
PESO ESPECÍFICO APARENTE (T/m ³)	(γ 2)	1,95
INCLINACIÓN O BUZAMIENTO DE PLANO ROTURA	(ψ 2)	15,00

ANGULO FRICCIÓN BÁSICO. ROTURA INICIO DISCONTINUA (\emptyset 2)		16,00
COHESION BÁSICA. ROTURA INICIAL DISCONTINUA T/m ² (C2)		3,00
PRESION DE AGUA EN ISOPIEZA DE SATURACIÓN T/m ² (u2)		0,00
PESO DE LA DOVELA EN POSIBLE ROTURA..... (W2)		43.683,08
ESFUERZO NORMAL EN LA BASE DE ROTURA (N2)		42.194,62
RESISTENCIA AL CORTE EN EL PLANO DE ROTURA... (R2)		12.720,11
ESFUERZO TANGENCIAL EN LA ROTURA..... (T2)		11.306,01
FUERZA HIDROSTÁTICA EN PLANO DE ROTURA (Ton) (U2)		0,00
DOVELA: 3ª ACTIVA		
DISTANCIA EN LA BASE DEL PLANO DE ROTURA (m)	(D3)	300,00
SUPERFICIE DE LA DOVELA (m ²)	(S3)	23.795,29
PESO ESPECÍFICO APARENTE (T/m ³)	(γ 3)	2,00
INCLINACIÓN O BUZAMIENTO DE PLANO ROTURA	(ψ 3)	3,00

ANGULO FRICCIÓN BÁSICO. ROTURA INICIO DISCONTINUA (\emptyset 3)		16,00
COHESION BÁSICA. ROTURA INICIAL DISCONTINUA T/m ² (C3)		3,00
PRESION DE AGUA EN ISOPIEZA DE SATURACIÓN T/m ² (u3)		0,00
PESO DE LA DOVELA EN POSIBLE ROTURA..... (W3)		47.590,58
ESFUERZO NORMAL EN LA BASE DE ROTURA (N3)		47.525,36
RESISTENCIA AL CORTE EN EL PLANO DE ROTURA... (R3)		14.527,68
ESFUERZO TANGENCIAL EN LA ROTURA..... (T3)		2.490,70
FUERZA HIDROSTÁTICA EN PLANO DE ROTURA (Ton) (U3)		0,00

RESULTADO

TENSIÓN HORIZONTAL (LATERAL GEOSTÁTICA) T/m ² "TH"	293,55
TENSIÓN LATERAL NATURAL (aceleración sísmica < 0,06g) "TH"	
SUMATORIO DE FUERZAS RESISTENTES..... (FR)	28.205,29
SUMATORIO DE FUERZAS DESESTABILIZADORAS..... (FM)	18.027,59
COEFICIENTE DE SEGURIDAD DEL TALUD (FS)	1,56

OPCIONES

COEFICIENTE DE SEGURIDAD ADOPTADO (FS)	1,00
EMPUJE HORIZONTAL SOBRE MURO/ANCLAJE PIE Horiz. (EH)	(10.177,70)
DESMONTE EN CABEZA (TONELADAS/METRO) (Wdesmonte)	(23.504,39)
DESMONTE EN CABEZA (METROS CUBICOS/METRO) (Wdesmonte/ γ)	(12.053,53)

TALUD:	154,50		
SATURACIÓN 1AC	10 %	SATURACION	10 %
DISCONTINUO 1AC	100 %	DISCONTINUO 2AC	65 %
DISCONTINUO 3AC	65 %	DISCONTINUO PASIVA	0 %

Tabla 3. Deslizamiento global hipótesis profunda Cobre las Cruces

DOVELA	DISTANCIA base retura D (m)	INCLINACION α Plano rotura	Longitud horizontal rotura L (m)	PROFUNDIDAD GRETA TRACCION	ALTURA DEL TALUD H (m)	ANGULO General Talud	Profundidad menor BASE DOVELA	Profundidad mayor BASE DOVELA	Superficie DOVELA S (m ²)	VERTICAL ENTRE DOVELAS	ISOPEZA DE SATURACION (FREÁTICO)	POTENCIA MOJADA e(m) "Vertical"	CARGA HIDRAULICA H-h (m)	CAUDAL DRENAJE PIE Q(litro/mm)= K * e*(H-h) Distancia Dren	ISOPEZA DE SATURACION % (FREÁTICO)	PRESION DE AGUA T/m ² FREÁTICA	DOVELA	PERMEABILIDAD LATERAL K (cm/s)= Kporo-Kfractura
1 ACTIVA	114,50	30	99,16	28,00	106,18	28,00	85,25	28,00	5614,93		50%	9,57	10,47	0,02	50%	20,85065788	1 ACTIVA	0,0001
2 ACTIVA	200,00	3	199,73			h (30%)=	85,25	85,25	18071,92		X	28,72	20,93	0,99	Y	31,27598682	2 ACTIVA	0,00001
3 ACTIVA	200,00	3	199,73			h (10%)=	95,72	95,72	9558,60	0,00	0	47,86	78,18	49,84	-28	10,42532894	3 ACTIVA	0,000001
4 PASIVA	0,00	0	0,00				106,18	106,18	0,00		498,6117226	67,00	106,18	94,77	-106,1843825	0	4 PASIVA	0
5 PASIVA	0,00	0	0,00				106,18	106,18	0,00		90%	86,15	106,18	121,84	0	0	5 PASIVA	0
DOVELA	X	Y	498,61	99,72	= L _{media} "Separación Drenes"				33245,45		"e" máxima=	95,72			50%			

ROTURA POLIGONAL CON ISOPEZA DE SATURACION Y DRENAJE

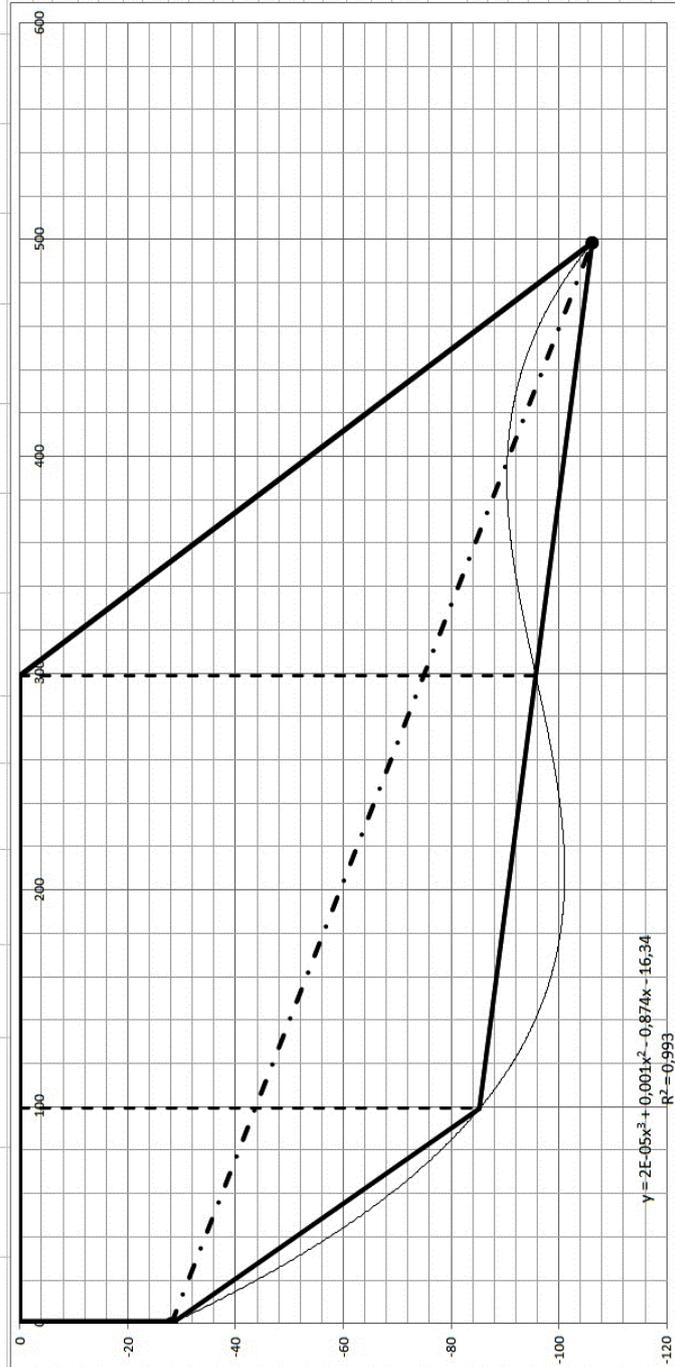


Figura 5. Deslizamiento global inicial en Cobre Las Cruces

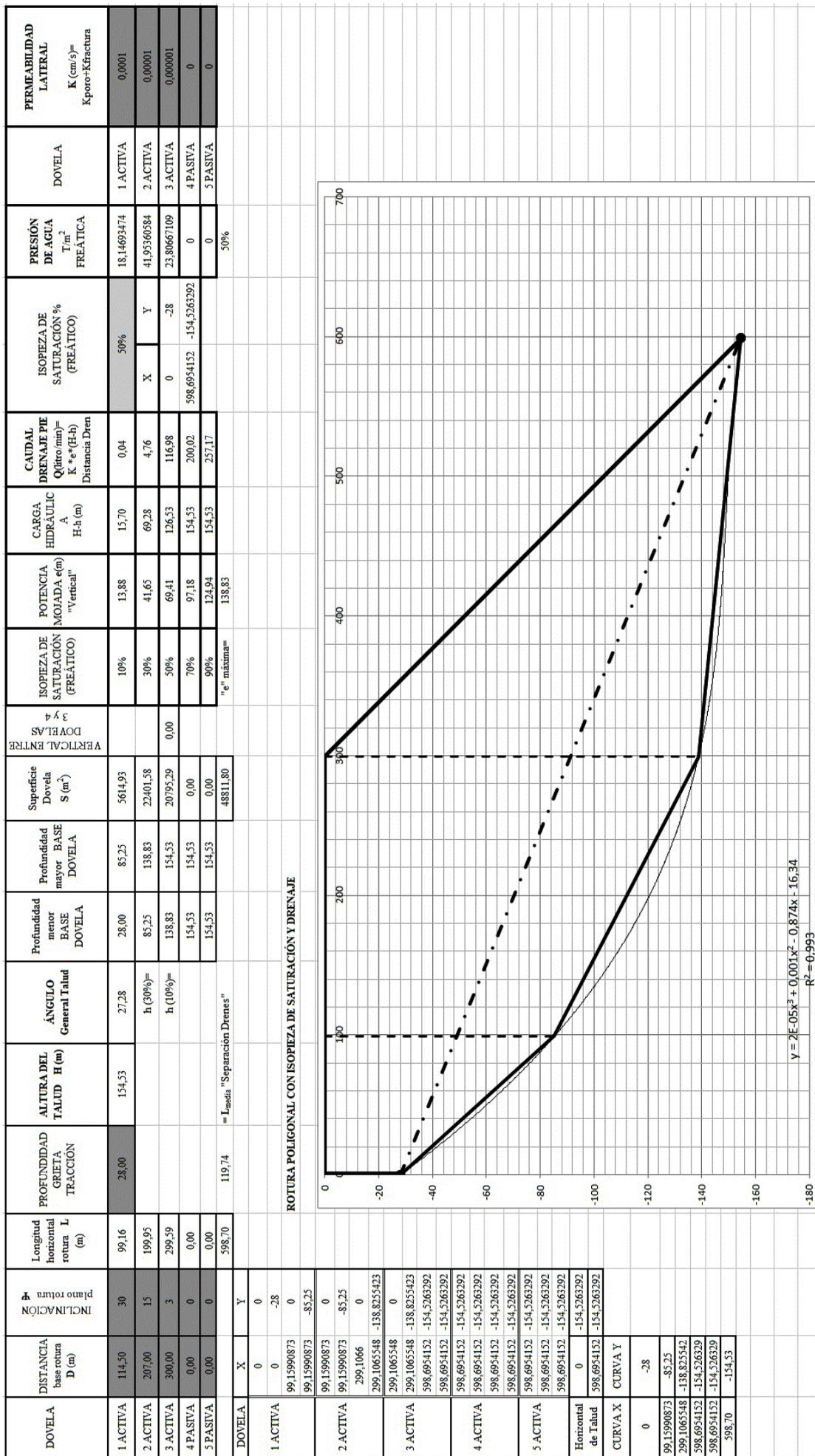


Figura 6. Deslizamiento global profundo en Cobre Las Cruces.

SATURACIÓN Presión de agua	SIN TENSIONES NATURALES			TENSIONES NATURALES en la rotura pie (K ₀ =1) σ _H = σ _V (aceleración=0'007g) V _v =1 mm/s			TENSIONES NATURALES MÁXIMAS pie (K ₀ =1'6) σ _H =1'6 σ _V (aceleración=0'025g) V _v =4 mm/s		
	DESPLAZAMIENTO GLOBAL INICIAL	HIPÓTESIS PROFUNDA Anterior a la rotura	FASE 1 + HIPÓTESIS PROFUNDA Posterior a Fase 1	DESPLAZAMIENTO GLOBAL INICIAL	HIPÓTESIS PROFUNDA Anterior a la rotura	FASE 1 + HIPÓTESIS PROFUNDA Posterior a Fase 1	DESPLAZAMIENTO GLOBAL INICIAL	HIPÓTESIS PROFUNDA Anterior a la rotura	FASE 1 + HIPÓTESIS PROFUNDA Posterior a Fase 1
10%	1'47	1'56	1'90	1'43	1'54	1'84	1'40	1'52	1'80
25%	1'45	1'55	1'82	1'42	1'53	1'82	1'39	1'51	1'79
35%	1'43	1'53	1'84	1'39	1'51	1'78	1'37	1'50	1'75
45%	1'35	1'48	1'74	1'32	1'46	1'69	1'30	1'45	1'66
55%	1'23	1'40	1'58	1'20	1'38	1'53	1'18	1'37	1'50
65%	1'14	1'34	1'45	1'11	1'32	1'40	1'09	1'30	1'38
75%	1'05	1'27	1'32	1'02	1'25	1'28	1'00	1'24	1'26
85%	0'96	1'21	1'20	0'94	1'19	1'16	0'92	1'18	1'14

Tabla 4. Factor de Seguridad en Cobre Las Cruces

4. RESULTADOS

El caudal de drenaje en el talud con sondeos horizontales y verticales contemplado en la hoja de cálculo de las figuras 5 y 6 hubiese permitido bajar el nivel freático y la presión de agua en terrenos de baja permeabilidad, un pequeño flujo drenado obtiene gran disminución de la presión de agua.

Los datos en el contorno de dovelas y los resultados están implantados en dos hojas de cálculo, “Rotura poligonal y relevo discontinuo” y “Rotura poligonal con isopieza de saturación y drenaje”. El peso de la dovela “W” es el producto de la densidad aparente “γ” por la superficie “S”, la fuerza normal en la base de fractura es $N=W \cos\Psi$ y la fuerza tangencial en la rotura $T=W \sin\Psi=N \operatorname{tg}\Psi$. La fuerza de resistencia al corte en la fractura: $R=C D+[N-U] \operatorname{tg}\phi$. Siendo la fuerza normal efectiva “N-U”, obtenemos para el equilibrio la suma de las fuerzas resistentes: $FR = \Sigma [R \cos\Psi]$. De las fuerzas desestabilizadoras: $FM = \Sigma [N \sin\Psi]$.

$$\Sigma x=0 \quad R \cos\Psi - N \sin\Psi = 0 \quad (2)$$

$$\Sigma y=0 \quad W - T \sin\Psi - N \cos\Psi = 0 \quad (3)$$

El coeficiente de seguridad “FS” sería:

$$FS = \Sigma[R \cos\Psi] / [\Sigma[N \sin\Psi]+TH] \quad (4)$$

Otro coeficiente de seguridad es el optado para obtener el empuje horizontal “EH” que soportaría un muro o la componente horizontal de un anclaje en el pie:

$$FS = \Sigma[R \cos\Psi] / [\Sigma[N \sin\Psi]+TH-EH] \quad (5)$$

La tensión lateral natural puede introducirse como tensión horizontal “TH” cuando no se ha medido y se desea considerar, también puede incrementarse con la tensión cortante o aceleración horizontal de ondas sísmicas de un terremoto. Opcionalmente, si introducimos un determinado coeficiente de seguridad, podemos resolver el empuje horizontal “EH” ($EH=FM-[FR/FS]+TH$) a aplicar en el pie del talud con un muro o las toneladas de terreno excavadas del desmote “Wd” en coronación por metro de talud, siendo “W1final” la diferencia del peso de la 1ª dovela “W1” menos “Wd”.

$$T1final = (T1 \cos\psi1 - EH) / \cos\psi1 \quad (6)$$

$$W1final = T1final / \sin\psi1 = (T1 \cos\psi1 - EH) / (\cos\psi1 \sin\psi1)$$

$$Wd = W1 - (T1 \cos\psi1 - EH) / (\cos\psi1 \sin\psi1) = W1 - [T1 \cos\psi1 - (N1 \sin\psi1 - (R1 \cos\psi1 / FS) + TH)] / (\cos\psi1 \sin\psi1)$$

5. CONCLUSIONES

Se ha implantado el método de “Rotura poligonal y relevo discontinuo” para la estabilidad del talud NW de la Corta Cobre Las Cruces (Sevilla) donde se ha producido un deslizamiento rotacional en 2019 con influencias hidráulicas de presiones de agua y una hipótesis más profunda y conservadora en un 20%. El análisis de la inestabilidad se ha realizado con la condición de equilibrio de fuerzas horizontales que permite evaluar déficit de peso en el pie de talud, además de otras opciones correctoras y planificar los taludes futuros que evite los efectos dinámicos de las voladuras en la roca remanente. Las características hidrogeológicas que influyen en la estabilidad son el nivel freático, la presión de agua y la permeabilidad, pueden deducirse estas características hidrogeológicas con la Geotecnia Sísmica (Daza et al., 2018). Otras conclusiones han sido:

- La ley de atenuación de la energía a considerar en las voladuras es la de campo cercano:
 $V_v = 413 \cdot 83 (D/Q^{0.5})^{-1.2322}$
- Se debe evitar estéril en la coronación del talud y utilizar el ángulo de fricción residual.
- En el futuro se debe medir el desplazamiento absoluto en los inclinómetros y el control de la cota Z ya que los planos subverticales que se movilizan dan escaso desplazamiento Y/X.
- Control sistemático de las grietas verticales que pudieran presentarse en las discontinuidades J1 (NW–SE) y J2 (E–W), también las tensiones naturales.

REFERENCIAS

- Ayala Carcedo, F.J. et al., 1987. “*Manual de Taludes*” Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- BSSC, 1998. “Building Seismic Safety Council”. Edition 1997 NEHRP. Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings, FEMA 302–303, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. “Código Internacional de Edificación IBC (2006).
- Cantos, J., 1974. “Tratado de geofísica Aplicada”. Sección de publicaciones de la Escuela de Minas, Madrid.
- Clark Davenport, G., Maldonado, A. y Negrillo, R., 1978. “Técnicas Geofísicas para la determinación de propiedades elásticas”. Tecniterrae (Madrid).
- Coates, D. F., 1973. “*Fundamentos de Mecánica de Rocas*”, Cap. VIII: Dinámica de Rocas. Centro de Inv. Minera. Ministerio de Energía, Minas y Recursos Naturales de Canadá. Litoprint, Madrid (1973). Rock Mechanics applied to the design of underground installations to resist ground shock from Nuclear Blast. 5° Symp. Rock Mechanics, Univ. Of Minnesota.
- Código Técnico de Edificación, 2006. CTE. Documento Básico Cimientos, SE. AENOR, 1993: “Control de vibraciones producidas por voladuras. UNE 22.381.93”
- Cuellar Mirasol, V., 1983. “*Propiedades dinámicas del suelo. Ensayos de campo y de laboratorio*”. 75 pp. Laboratorio de Carreteras y Geotecnia. Ministerio de Fomento. Madrid.
- Cuellar Mirasol, V., 1989. “Uso Geotécnico de parámetros Geofísicos”. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. Curso sobre Técnicas Geofísicas aplicadas al reconocimiento Geotécnico. Madrid, Octubre de 1989.
- Daza Sánchez, A., 2011. “*Aplicaciones industriales de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba*” Tesis Doctoral “Cum Laude”, Universidad de Córdoba. <http://hdl.handle.net/10396/5231>
- Daza, A., 1989. “Empuje hidrostático en taludes con baja permeabilidad”. Capítulo de libro: Tomo homenaje a Jorge Porras Martín, de la Asociación Española de Hidrología Subterránea. IGME: “*Hidrogeología y Recursos Hidráulicos XIV*”, pp 113–124. Madrid.
- Daza A., Gutiérrez-Ravé, J., Siles, J., Aroca, G., Almansa, C., Sánchez, M.D. y Viñals, A., 2016. “Innovación en Sísmica de Impactos para vibraciones del Terreno”. *10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Edita: Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (Tomo I) ISSN 978–84–945284–2–2, pp 147–156. A Coruña.
- Daza A., Gutiérrez-Ravé J. y Aroca G., 2018. “Geotecnia sísmica y modelo progresivo distensivo de la onda canal en el Terreno”. “*XIV Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales. Sosteniendo el Futuro*” y “*Slope Stability Symposium*”. ISBN: 978-84-09-01295-4, 1:2245–2256. Sevilla.
- Denver, H., 1982. Modulus of Elasticity for Sand Determined by SPT and CPT. Proc. ESOPT.2. Amsterdam.
- González Montero, J., 1978. “Disgregación de rocas. Análisis de la alternativa: escarificación o voladura”. Revista *Industria Minera*, Colegio de Ingenieros de Minas, agosto 1978, pp. 27–39.
- Hardin B.D. y Black W.L., 1968. “Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay” y Soil Mech. Div., Proc. ASCE, Vol.94 n°SM2, Mar, pp. 353–369.

- Hardin B.D. y Dwevich V.P., 1972. "Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves" *J. Soil Mech. Found. Div. Proc. ASCE*. Vol. 98 n° SM7.
- Hoek, E. & Brown, E.T., 1980. *Underground Excavations in Rock*. London, Instn. Mining Metall, 532 pp.
- Hoek, E. & Bray, J., 1981. *Rock Slope Engineering*. London, Instn. Mining Metall, 458 pp.
- Imai T., Yoshimura Y., 1975. "The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan". Technical note OYO Corporation.
- Imai, T. y Tonouchi K., 1982. "Correlation of N value with S-wave velocity and Shear Modulus. In Proceedings of 2nd European Symposium of Penetration Testing, Amsterdam, pp. 67–72.
- Kokusho, T., 1987. "In-situ dynamic soil properties and their evaluation" Proceeding 8th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto, 2: 215–240.
- Lunne, T., Lacasse, S. and Rad, N.S. (1994). General Report: SPT, CPT, PMT, and recent developments in in-situ testing. *Proceeding, 12th ICSMFE*. Rio de Janeiro, 4: 2339–2403.
- Mayne, P.W., 2001. "Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests" Institute Georgia USA. *Proceedings, International Conference on In-situ Measurement of soil properties y case histories (In situ 2001)* Bali, Indonesia, May 21–24, 2001, pp. 27–48.
- Olalla C., 2007. COICCP "Recomendación al estudio geotécnico del Código Técnico de Edificación". Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Madrid.
- Ramirez Oyanguren, P. y Alejano Monge L., 2004 "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes" ETSIM de Madrid, 285 pp.
- Robertson, P.K. y Campanella, R.G., 1983. "Interpretation of cone penetration tests: sands". *Canadian Geotechnical Journal*, 20: 719–733.
- Shibata, T., 1970. "Relations between transverse wave velocity in ground and N value of penetration test". Read before the 5th soil engineering studies anno uncement meeting.
- Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C., Hoek, E., Deere, D.V., Hendron A.J., Morgenstern, N.R., Rogerts, A., 1970. *Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica*. John Wiley y Sons, London 1968. Ed. Blume, Madrid, 398 pp.
- Tezcan, S. S., Keceli, A., & Ozdemir, Z., 2006. Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(1), 203-218.