

TALUDES EN ROCA: ¿ CONTEO DE POLOS O ANALISIS DE CUÑAS TOTALES?

ROCK SLOPES: POLE COUNTING OR ALL-WEDGE ANALYSIS?

Alvaro J. González G.

Profesor Asociado- Universidad Nacional de Colombia

Resumen

Los análisis por falla en cuña de taludes en roca se basan normalmente en orientaciones predominantes de las discontinuidades para analizar los taludes que se desee. Aunque el conteo de polos es muy útil y debe hacerse siempre, este conteo no asegura que se identifiquen el plano o los planos de falla reales, es decir, no necesariamente las discontinuidades más frecuentes son las más débiles. Para obviar esta dificultad, el Autor ha desarrollado un programa sencillo en FORTRAN y sistema DOS: CUNTOT (50kB), que identifica todas las cuñas cinemáticamente posibles en un talud rocoso y las analiza, con parámetros de resistencia Mohr-Coulomb (c' y ϕ') y con el método completo de análisis de cuña de Hoek y Bray (1977), sin grieta de tracción. El programa permite procesar hasta 400 discontinuidades (teóricamente 79,800 cuñas para cada talud) y 30 taludes. Se presenta un ejemplo tanto con el método tradicional como con el sistema de total de cuñas y se derivan conclusiones.

Abstract

Rock slope wedge stability analyses are normally based on predominant discontinuity orientation to carry on failure analyses for the slopes involved. Although pole counting analyses are very useful and they always should be done, they do not insure that the actual failure plane or planes are identified, i.e. the plane in a predominant direction is not necessarily the weakest plane. To overcome this difficulty, the Author has developed a simple DOS based FORTRAN program: ALLWEDGE (50kB), which identifies all kinematically possible wedges for a rock slope and analyzes them with Mohr-Coulomb strength parameters (c' and ϕ') and the Hoek and Bray (1977) complete method of wedge analysis without a tension crack. The program allows to process up to 400 discontinuities (theoretically 79,800 wedges for each slope) and 30 slopes. An example is presented for both the traditional method and the all-wedge method and conclusions are derived.

1 PROCEDIMIENTO USUAL PARA LOS ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCA Y DIFICULTADES

El procedimiento usual para análisis de estabilidad de taludes en roca es el siguiente:

- a) realizar conteo de polos de las discontinuidades de la masa rocosa para identificar las direcciones predominantes .
- b) con datos de resistencia efectiva de las discontinuidades, llevar a cabo análisis de falla planar, en cuña y por volteo.

Aunque los análisis de conteo de polos son muy útiles y siempre deben hacerse, ellos no aseguran que se identifiquen el o los planos reales de falla: i.e. el plano de dirección predominante no es necesariamente el plano más débil.

El Autor ha analizado fallas planares y en cuña reales de taludes en roca, en los cuales los planos de falla reales no fueron los de dirección predominante, quizás debido a que el levantamiento de campo no había sido lo suficientemente completo o que las discontinuidades críticas no fueron fácilmente detectables en estos levantamientos de campo.

2 PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA ANALISIS DE FALLA PLANAR O POR CUÑA EN TALUDES EN ROCA

Dadas estas dificultades, el Autor propone el siguiente procedimiento para análisis de falla planar y en cuña de taludes en roca:

- a) identificar las discontinuidades que no se deben intersectar (las cuales se pueden denominar “genéticas”), por ejemplo, la estratificación en rocas sedimentarias.
- b) con todas las discontinuidades, hacer análisis cinemáticos de falla en cuña para identificar todas las cuñas posibles en un talud.
- c) con todas las cuñas cinemáticamente posibles para el talud, hacer análisis de estabilidad y obtener factores de seguridad
- d) identificar las cuñas con factor de seguridad menor que un valor predeterminado F_s mín
- e) para estas cuñas críticas, hallar fuerzas de tensión u otras medidas estabilizadoras.

Si se desea hallar un talud estable por cinemática y por fricción, en una dirección dada, entonces:

- b) con todas las discontinuidades hacer análisis cinemáticos de falla en cuña para identificar todas las cuñas posibles para un talud con inclinación vertical (90°) en la dirección especificada.
- c) con todas las cuñas cinemáticamente posibles para este talud vertical y $c' = 0$, $\phi' = \phi'_{\text{mín}}$, hacer análisis de estabilidad y obtener factores de seguridad.
- d) identificar las cuñas con factor de seguridad menor que un valor predeterminado F_s mín
- e) en una red estereográfica, encontrar la inclinación del talud que no permita el afloramiento de ninguna cuña crítica.
- f) para verificar, hacer nuevos análisis de estabilidad para la dirección especificada y la inclinación obtenida y comprobar que se cumple $F_s > F_s \text{ mín}$.

Con este procedimiento se hace un escrutinio más detallado de todas las cuñas posibles y se minimiza la posibilidad de no identificar los planos críticos.

3 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS CON CUÑAS TOTALES

Como el procedimiento propuesto puede involucrar gran cantidad de datos, el Autor escribió el programa CUNTOT en Fortran-77, el cual puede manejar todas las tareas de una forma ordenada (González, 1996).

Para los análisis de estabilidad, el programa usa el Método Completo de Cuña de Hoek-Bray (pero sin grieta de tracción), el cual está publicado en el Apéndice 2 del libro Rock Slope Engineering (Hoek y Bray, 1977).

Las características principales del programa CUNTOT son:

- 1) Puede manejar hasta 400 discontinuidades y 30 taludes, lo cual significa teóricamente 79,800 cuñas para cada talud.
- 2) Usa valores comunes para todos los taludes de: peso unitario del agua (que define las unidades); presiones de agua y aceleraciones sísmicas vertical (+ hacia abajo) y horizontal (+ hacia afuera), dirigidas en dirección de la línea de intersección de los planos principales de la cuña.
- 3) Los datos para cada discontinuidad son: azimut de buzamiento ($^\circ$), buzamiento ($^\circ$), cohesión efectiva (c'), fricción efectiva (ϕ').
- 4) Para cada talud los datos son: azimut de buzamiento del talud ($^\circ$), buzamiento del talud ($^\circ$), azimut de buzamiento del terreno encima del talud ($^\circ$); buzamiento del terreno encima del talud ($^\circ$), peso unitario del macizo rocoso, altura del talud, ancho máximo del talud (lo que limita la altura de la cuña), factor de seguridad máximo $F_{\text{máx}}$ (para listar únicamente cuñas con $F_s < F_{\text{máx}}$), factor η ($\eta = 1.0$ para talud positivo, $\eta = -1.0$ para talud negativo)
- 5) Para cada talud, también admite datos adicionales de: fuerza externa, azimut de buzamiento de fuerza externa ($^\circ$), buzamiento de fuerza externa ($^\circ$).
- 6) También puede calcular tensión estabilizadora y su dirección, para obtener $F_s > F_{\text{máx}}$.

La salida del programa entrega: títulos; datos de discontinuidades (número, azimut de buzamiento, buzamiento, c' y ϕ'); datos de taludes (número; azimut de buzamiento y buzamiento de talud y de terreno encima del talud, peso unitario del macizo rocoso, altura y ancho máximo de talud, factor máximo de seguridad $F_{\text{máx}}$); datos de cuñas, si no se solicitan tensores (número, plano 1, plano 2, azimut de buzamiento, buzamiento, ángulo central, factor de seguridad de la cuña, planos de contacto - 101 si es en ambos planos); datos de cuña si se solicitan tensores (igual a la anterior pero adicionado de 3 tensiones opcionales y tensión mínima, todas con azimut de buzamiento de la fuerza de tensión, buzamiento de la fuerza de tensión y planos de contacto luego de aplicar la tensión).

Este archivo puede denominarse *.res y también, si se desea, otro archivo (p.ej. *.txt) suministra datos para importar a una hoja de cálculo. Los archivos de salida pueden ser muy grandes, según el número de datos iniciales.

4 DATOS PARA PROBLEMA DE EJEMPLO

Para aclarar el punto principal de este artículo, se presenta el ejemplo de estabilización de un corte de carretera.

Se trata de un corte vial en roca, de 52m de altura en areniscas y arcillolitas arenosas terciarias, con un ángulo de 57.5° (Figuras 1 y 2), que presentaba algunas fallas en bloque.

Debido a su altura e inclinación y también a que la vía estaba en uso, fué muy difícil tratar de estabilizarlo con pernos y/o concreto lanzado, debido a problemas de accesibilidad y de seguridad para el personal. En consecuencia, luego de cálculos preliminares, se decidió estabilizarlo con excavación..

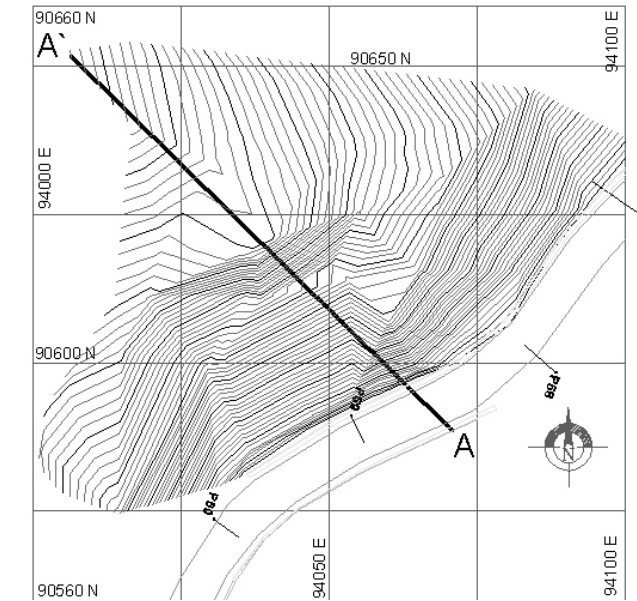


Fig 1. Corte vial - Planta

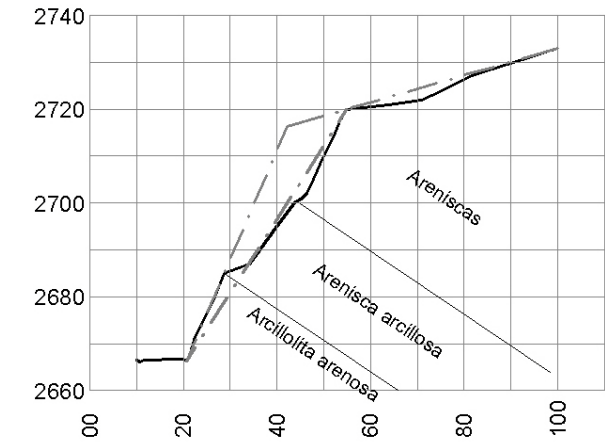


Fig. 2. Corte Vial - Sección AA´

Las dimensiones en las Figuras 1 y 2 son en metros, el azimuth de buzamiento del talud es 134.38° (igual al de la sección AA´) y para algunos análisis se adoptaron los perfiles punteados de la Figura 2 .

Los datos geológicos también fueron difíciles de obtener y se empleó una grúa para colocar al geólogo enfrente de la cara del talud para medir discontinuidades. Los datos obtenidos fueron: 10 datos de estratificación y 40 de discontinuidades, los cuales están en el Apéndice A.

5 ANÁLISIS DE CUÑAS CON CONTEO DE POLOS

5.1 Conteo de polos

El conteo de polos se hizo por varios métodos pero sólo tres de ellos se resumen en la Tabla 1: el geólogo hizo su propio conteo y el Autor hizo el conteo con DIPS (Rocscience, 1995) (Figura 3) y con promedio vectorial, el cual el Autor considera el mejor y cuyos datos se usaron en los análisis.

Tabla 1. Conteo de polos- Discontinuidades

Familia	Geólogo		DIPS		Prom.Vector.	
	AzB	Buz	AzB	Buz	AzB	Buz
Estratif.	285	40	285.80	37.05	286.22	37.36
1	180	75	179.66	70.53	182.92	74.43
2	135	90	134.99	89.43	135.00	90.00
3	55	90	55.00	90.00	55.00	90.00
4	85	65	85.33	65.81	85.43	66.10
5	110	55	106.33	56.50	106.48	58.87
6	-o-	-o-	180.00	89.71	184.99	90.00

AzB= azimuth de buzamiento (°); Buz= buzamiento (°)

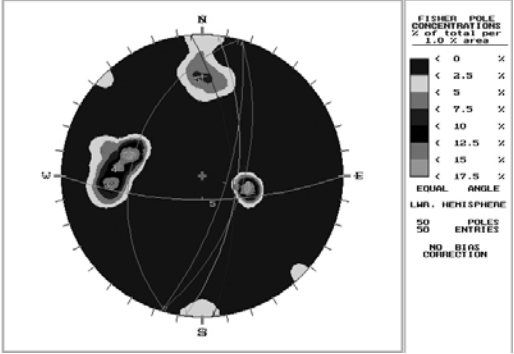


Fig. 3. Corte vial – Conteo de polos- DIPS

5.2 Parámetros- densidad y resistencia

El peso unitario de la roca, de ensayos, se adoptó como 25 kN/m³. De ensayos de plano inclinado, descripciones de rugosidad y algunos cortes directos en superficies precortadas, se adoptaron los siguientes datos de resistencia para las discontinuidades .(Table 2):

Table 2. Parámetros de resistencia adoptados

Familia	Cohesión efectiva c´ (kPa)	Ángulo efectivo de fricción ϕ' (°)
Estratif.	3.73	28.3
1, 2, 5, 6	3.71	20.4
3	2.93	31.0
4	3.98	32.6

Para los análisis cinemáticos y de fricción se adoptó un ángulo de fricción mínimo de 15° para la estratificación y de 20° para discontinuidades.

5.3 Análisis de cuñas

El análisis de cuñas se hizo con los ángulos mínimos de fricción, un talud de 90° y el programa CUNTOT. En el momento del levantamiento de discontinuidades el ángulo de declinación magnética era de -5.33° , y ésto se tuvo en cuenta. Se obtuvieron los siguientes resultados (diagramas vectoriales):

a) 10 cuñas cinemáticamente posibles (Fig.4)

CORTE VIAL- DIAGRAMA VECTORIAL- FAMILIAS- CUÑAS CINEMÁTICAS

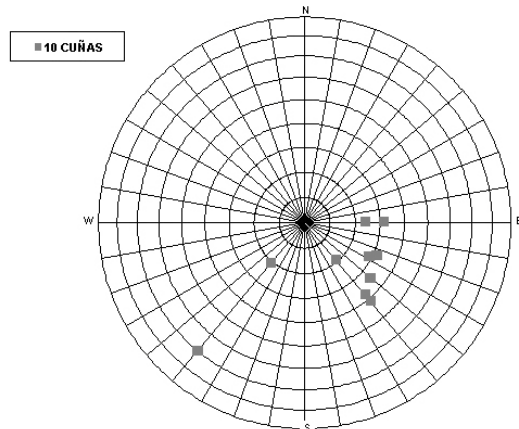


Fig. 4. Corte vial – Conteo de polos- 10 cuñas cinemáticamente posibles

b) 9 cuñas cuñas cinemáticamente posibles con $F_s < 1$ (Figura 5)

c) Con estas cuñas es posible un talud de 50° de inclinación. (Figura 5)

CORTE VIAL- DIAGRAMA VECTORIAL- FAMILIAS- FALLA EN CUÑA- DISEÑO

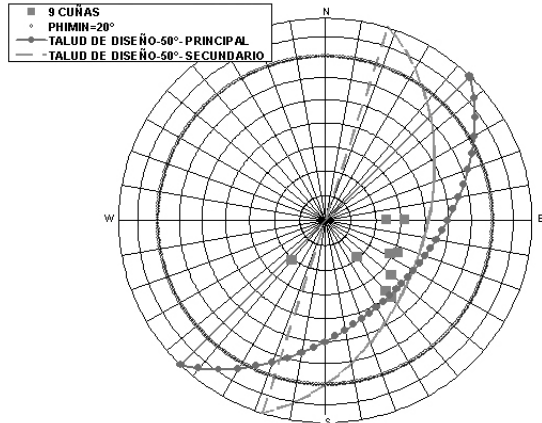


Fig. 5. Corte vial– Conteo polos- Talud de diseño

d) Un análisis con los parámetros de resistencia adoptados (Tabla 2) indica que para el talud inclinado 50° no existen cuñas con $F_s < 1.6$ y que $F_{smin} = 2.724$

e) En consecuencia, con base en conteo de polos, se adopta un talud de 57.7m de altura con dirección $134.38^\circ / 50^\circ$

6 ANALISIS CON CUÑAS TOTALES

6.1 Discontinuidades y Resistencia

Eliminando valores repetidos del levantamiento original de discontinuidades, resultan 5 planos de estratificación y 32 de discontinuidades. El peso unitario usado es 25 kN/m^3 y los parámetros de resistencia de la Tabla 2 se asignaron a cada discontinuidad dependiendo de la familia en el análisis de promedios vectoriales (Apéndice A).

6.2 Análisis de cuñas

El análisis de cuñas se hizo con ángulos mínimos de fricción, talud de 90° y el programa CUNTOT teniendo en cuenta la declinación. Los resultados fueron (diagramas vectoriales):

a) 389 cuñas cinemáticamente posibles (Fig.6)

CORTE VIAL- DIAGRAMA VECTORIAL- CUÑAS CINEMÁTICAS POSIBLES

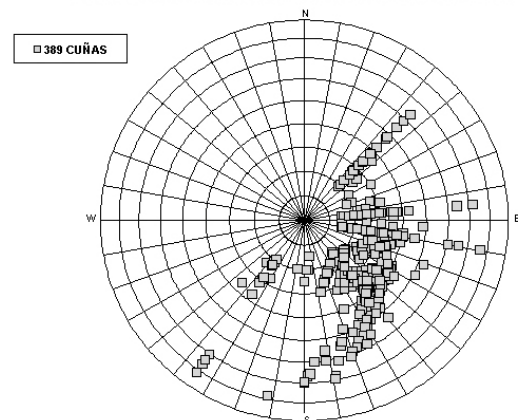


Fig. 6. . Corte vial – Cuñas totales- 389 cuñas cinemáticamente posibles.

b) 303 cuñas cuñas cinemáticamente posibles con $F_s < 1$ (Figura 7)

c) Con estas cuñas es posible un talud de 45° de inclinación. (Figura 7)

CORTE VIAL- DIAGRAMA VECTORIAL- CUÑAS TOTALES - DISEÑO

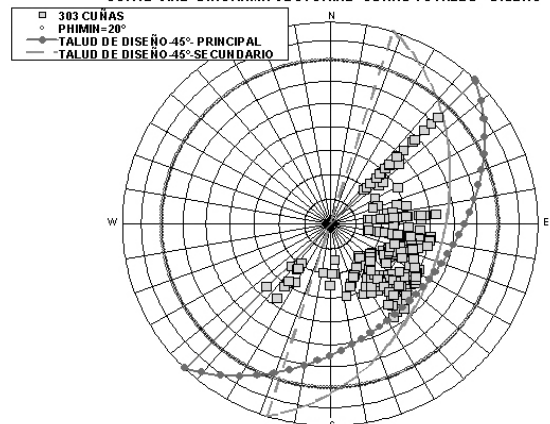


Fig. 7. Corte vial– Cuñas totales- Talud de diseño

- (b) Un análisis con los parámetros de resistencia adoptados (Tabla 2) indica que para el talud inclinado 45° no hay cuñas con $F_s < 1.6$ y que $F_{smin} = 1.986$.
- (c) En consecuencia, con base en el análisis de cuñas totales, se adopta un talud de 61.5m de altura con dirección $134.38^\circ / 45^\circ$.

7 ANÁLISIS DE FALLA PLANAR

La falla planar, la cual de alguna forma es tenida en cuenta en el programa CUNTOT (cuando el contacto de la cuña es en un solo plano), no es crítica en el corte vial, ni para el método con conteo de polos (Figura 8) ni para el método de cuñas totales (Figura 9)

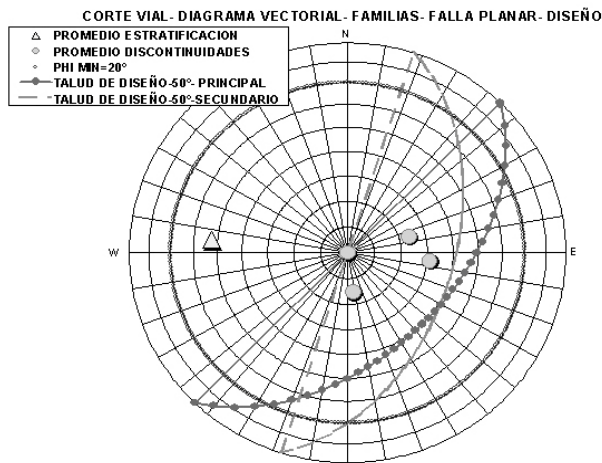


Fig. 8. Corte vial- Conteo de polos- Falla planar

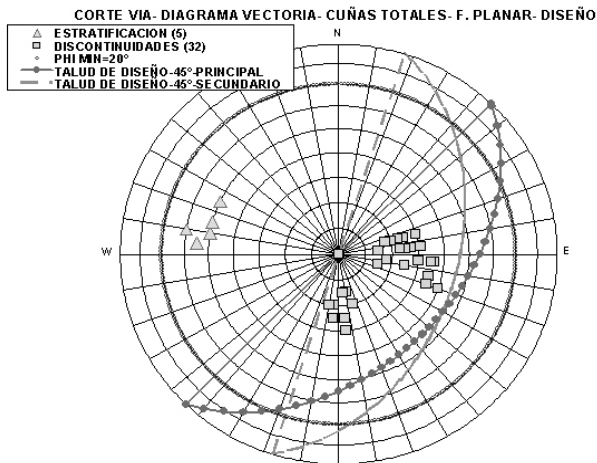


Fig. 9. Corte vial- Cuñas totales- Falla planar

8 DISEÑO FINAL

Con el análisis de cuñas totales, el talud adoptado de diseño fue de 45° (Figuras 10 y 11), que resultó en aproximadamente $20,000 \text{ m}^3$ de

excavación, mientras que el talud de 50° requiere del orden de $15,000 \text{ m}^3$.

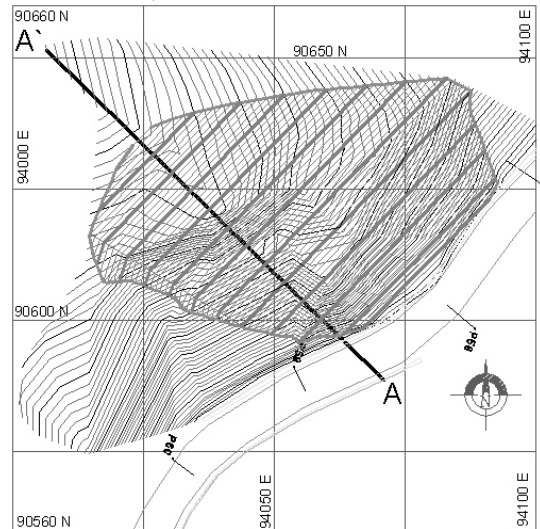


Fig. 10. Corte vial- Diseño final- Planta

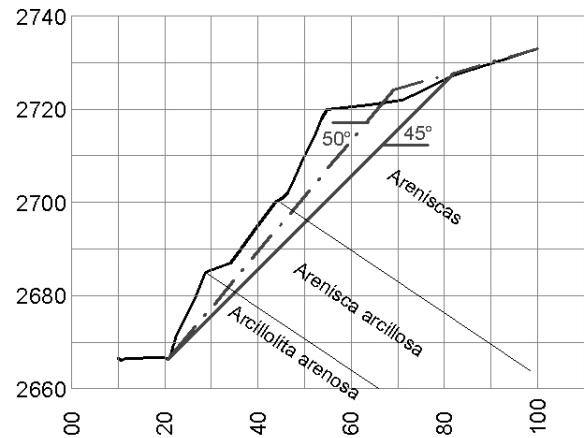


Fig. 11. Corte vial - Diseño final- Sección AA'

9 COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES

Para el ejemplo del corte vial, el método de conteo de polos resulta en un talud de 50° de inclinación y 57.7m de altura, mientras que el método de cuñas totales prevé un talud de 45° de inclinación y 61.5m de altura (Fig.11)

Aparentemente no existe una contradicción esencial entre los dos resultados, con sólo 5° de diferencia en inclinación y altura similar, pero el resultado con cuñas totales tiene un mayor volumen de excavación. Vale la pena adoptarlo?

Si se hace un análisis para el talud de 50° , con todas las discontinuidades y el programa CUNTOT, surge lo siguiente::

- Hay 87 cuñas cinemáticamente posibles.
- Hay 16 cuñas con $F_s < 1.6$, de las cuales 5 tienen $F_s < 1.0$.
- El factor de seguridad mínimo es $F_{smin}=0.792$

De estos resultados es fácil concluir que el método de conteo de polos puede llevar a resultados inseguros en el análisis de la estabilidad de taludes en roca.

Siempre habrá espacio para discusiones acerca de la persistencia de todas las discontinuidades en el volumen total del macizo rocoso o acerca de la presencia de variaciones locales en sus orientaciones, pero, con todas las incertidumbres asociadas a los levantamientos y análisis de discontinuidades, el Autor cree que el empleo de todas las discontinuidades levantadas en campo en los análisis de estabilidad de taludes en roca resulta en diseños más confiables y seguros.

REFERENCIAS

- Gonzalez, A.J. (1996). *"CUNTOT- Programa de Análisis de Estabilidad de Taludes en Roca"* – Notas y programa sin publicar- Bogotá, Colombia 1996-2008
- Hoek, E. and Bray, J.W. (1977). *"Rock Slope Engineering"* - Revised 2nd Ed. – The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1977
- Rocscience (1995). *"DIPS- Educational Version"*- University of Toronto, 1995.

APÉNDICE A

Tabla A1. Corte vial- Datos de discontinuidades.

No	Az. Buz. (°)	Buzamient (°)	Familia
1	280.0	35.0	Estratificación
2	280.0	35.0	Estratificación
3	280.0	35.0	Estratificación
4	285.0	30.0	Estratificación
5	285.0	40.0	Estratificación
6	285.0	40.0	Estratificación
7	285.0	40.0	Estratificación
8	290.0	40.0	Estratificación
9	290.0	40.0	Estratificación
10	300.0	40.0	Estratificación
11	180.0	75.0	1
12	180.0	90.0	1
13	180.0	90.0	1
14	195.0	90.0	1
15	195.0	70.0	1
16	190.0	65.0	1
17	190.0	70.0	1
18	180.0	65.0	1
19	170.0	70.0	1
20	175.0	75.0	1
21	180.0	60.0	1
22	180.0	75.0	1
23	140.0	90.0	2
24	130.0	90.0	2
25	55.0	90.0	3

Tabla A1. Corte vial- Datos de discontinuidades. (continuación)

No	Az. Buz. (°)	Buzamient (°)	Familia
26	90.0	65.0	4
27	90.0	67.0	4
28	90.0	65.0	4
29	90.0	59.0	4
30	90.0	75.0	4
31	90.0	63.0	4
32	80.0	65.0	4
33	80.0	60.0	4
34	80.0	67.0	4
35	80.0	70.0	4
36	80.0	72.0	4
37	105.0	65.0	5
38	105.0	65.0	5
39	110.0	55.0	5
40	115.0	55.0	5
41	115.0	50.0	5
42	100.0	54.0	5
43	100.0	55.0	5
44	100.0	60.0	6
45	100.0	55.0	6
46	110.0	55.0	6
47	102.0	72.0	6
48	110.0	55.0	6
49	110.0	75.0	6
50	110.0	55.0	6