

Análisis probabilístico de estabilidad de taludes en roca: aplicación de métodos de confiabilidad y ecuaciones de estados límite para falla plana

Probabilistic stability analysis of rock slopes: application of reliability methods and limit state equations for plane failure

Rubén Medinaceli Tórrez

Facultad Nacional de Ingeniería – Universidad Técnica de Oruro, Profesor, Bolivia, ruben.medinaceli@usp.br

Escola de Engenharia São Carlos – Universidade de São Paulo, Candidato a Doctor, Brasil, ruben.medinaceli@usp.br

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolla una metodología probabilística utilizando los métodos de confiabilidad FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second Order Reliability Method) y SMC (Simulación Monte Carlo) para evaluar la estabilidad de un talud en roca con probabilidad de ocurrencia de una falla plana. Se proponen dos ecuaciones de estado límite, una con sollicitación igual a 1,0 y otra con sollicitación de 1,4 según la NBR 11682/91. El diseño determinístico del talud arroja un factor de seguridad de 1,4, indicando estabilidad. Se realizaron combinaciones de alturas y ángulos de inclinación obteniendo los factores de seguridad correspondientes. El diseño probabilístico muestra una probabilidad de falla del 3,45% para la ecuación de estado límite 1 y del 58,98% para la ecuación de estado límite 2, relacionados con los factores de seguridad. Se proponen medidas para reducir la probabilidad de falla, como reducir la altura e inclinación del talud, drenar completamente el talud y considerar sostenimiento. Se muestra que a partir de un análisis probabilístico se pueden crear cartillas de función de distribución acumulada para calcular la probabilidad de falla a partir del factor de seguridad obtenido, lo que es práctico para los ingenieros encargados del diseño de taludes, quienes tienen a su disposición una herramienta para mejorar sus diseños ingresando al diseño probabilístico. Las conclusiones obtenidas destacan la efectividad del análisis probabilístico para proporcionar una evaluación más completa de la estabilidad del talud, ofreciendo una herramienta valiosa para la toma de decisiones en el diseño geotécnico.

PALABRAS CLAVE: Probabilidad, Estabilidad, Talud, Falla, Factor de seguridad.

ABSTRACT: In the present study, a probabilistic methodology is developed using first-order methods (FORM), second-order methods (SORM), and Monte Carlo simulation (SMC) to evaluate the stability of a rock slope with a probability of planar failure occurrence. Two limit state equations are proposed, one with a sollicitation equal to 1 and another with a sollicitation of 1.4 according to NBR 11682/91. The deterministic design of the slope yields a safety factor of 1.4, indicating stability. Combinations of heights and inclinations were made to obtain the corresponding safety factors. The probabilistic design shows a failure probability of 3.45% for limit state equation 1 and 58.98% for limit state equation 2, related to the safety factors. Measures are proposed to reduce the probability of failure, such as reducing the height and inclination of the slope, completely draining the slope, and considering support. It is shown that through a probabilistic analysis, cumulative distribution function charts can be created to calculate the probability of failure based on the safety factor obtained, which is practical for engineers responsible for slope design, who have a tool to improve their designs by entering the probabilistic design. The conclusions obtained highlight the effectiveness of probabilistic analysis in providing a more comprehensive assessment of slope stability, offering a valuable tool for decision-making in geotechnical design.

KEYWORDS: Probability, Stability, Slope, Failure, Safety factor.

1 INTRODUCCIÓN

En una disciplina como la geotecnia, en la que la incertidumbre juega un papel importante, el ingeniero está obligado a buscar soluciones viables y fiables. Así, uno de los aspectos fundamentales en el campo de la ingeniería de taludes es la evaluación de la estabilidad de un talud. En la mayoría de los casos, esta evaluación se basa exclusivamente en la experiencia y capacidad de cálculo del ingeniero responsable; lamentablemente, este tipo de evaluación puede dar lugar a proyectos poco fiables.

Ante esto, el uso de técnicas probabilísticas en el diseño geotécnico es apropiado para gestionar la incertidumbre y estimar el riesgo asociado a un proyecto.

En el presente trabajo se desarrolla una metodología probabilística, utilizando diferentes métodos de confiabilidad como FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second

Order Reliability Method) y SMC (Simulación Monte Carlo), para evaluar la estabilidad de un talud de roca en el que el modo de falla predecible es la falla plana.

Los taludes en suelo o roca están presentes en muchas obras civiles como excavaciones para la construcción de carreteras o vías férreas; excavaciones para la instalación de plantas industriales, construcción de edificios o construcción de represas; y muchos otros. Mucho más común es la presencia de taludes rocosos en canteras o minas a cielo abierto.

En todos los casos mencionados, es muy importante evaluar la estabilidad de los taludes ante posibles fallas. La falla de un talud, caracterizada por el deslizamiento de grandes volúmenes de suelo y/o roca, puede causar enormes dificultades operativas, pérdida de infraestructura, materiales, equipos y, lamentablemente, en muchos casos, la pérdida de vidas humanas.

En la ingeniería de taludes rocosos se utilizan plenamente métodos de naturaleza determinista y hay poca preocupación por gestionar la incertidumbre y el riesgo asociados.

Sin embargo, ya en los años 80 del siglo anterior surgió una importante corriente de opinión que indica que es un razonamiento muy sencillo pensar que a través de un factor de seguridad se tiene en cuenta toda la incertidumbre asociada a la evaluación de la estabilidad de taludes.

En respuesta a esta preocupación, se han desarrollado varios métodos probabilísticos para asociar los factores de seguridad de un método determinista con niveles de confiabilidad en términos de probabilidad.

Entre las metodologías probabilísticas desarrolladas incorporando incertidumbres en el análisis de estabilidad de taludes se encuentran el FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second Order Reliability Method) y SMC (Simulación Monte Carlo).

El presente trabajo surge de la preocupación del autor por medir la incertidumbre asociada a las variables que intervienen en la evaluación de la estabilidad de un talud.

Desde principios de la década de 1980, se han desarrollado varios métodos estadísticos probabilísticos complementarios al método determinista para evaluar la estabilidad de taludes.

Se han desarrollado varias metodologías probabilísticas incorporando las incertidumbres asociadas con algunas variables en el análisis de estabilidad de taludes.

Baecher y Christian (2005) presentan el primer libro centrado exclusivamente en la aplicación de la confiabilidad y la estadística en la ingeniería geotécnica. Hasta la publicación de este libro, la confiabilidad en ingeniería era dominio exclusivo de los libros de texto de ingeniería estructural e ingeniería mecánica. Gracias a este aporte se logró un avance importante en la aplicación de métodos probabilísticos y estadísticos, ya que los conceptos fueron presentados en un lenguaje familiar, con ejemplos de la vida geotécnica cotidiana. Este tipo de aportes confirma la necesidad de analizar problemas geotécnicos basados en la confiabilidad, donde se incluyen aplicaciones en problemas prácticos de Hoek y Bray (1981).

Entre estas metodologías cabe destacar el método de primer orden (FORM), el método de segundo momento de primer orden (FOSM), el método de superficie de respuesta (RSM) y la simulación de Monte Carlo (SMC), entre otras (Baecher & Christian, 2005). Este último método ha ganado popularidad debido a su robustez y simplicidad conceptual, que genera una gran cantidad de valores aleatorios, según un modelo probabilístico, para variables con alta incertidumbre en el análisis de estabilidad de taludes; y posteriormente evalúa la estabilidad de un talud en términos de probabilidad de falla (Reale et al., 2015).

Los estudios de Wu y Kraft (1970), Alonso (1976), Tang et al. (1976) y Vanmarcke (1977), Ceryan et al. (2018), Naghadehi et al. (2011), Park et al. (2005), Scavia et al. (1990), Nguyen et al. (2024), Zheng et al. (2014), Johari & Lari (2017) coinciden en establecer que el análisis probabilístico de la estabilidad de taludes proporciona un mejor conocimiento de la seguridad, ya que ofrece la posibilidad de comprender, en términos de probabilidad, el grado de confianza en el cálculo del factor de seguridad considerando la incertidumbre asociada.

En Fernández et al. (2018) se presenta un análisis probabilístico de la estabilidad de taludes utilizando un modelo de variables aleatorias para caracterizar los parámetros resistentes; para generar

los valores de las variables aleatorias se utiliza la simulación de Montecarlo.

Sin embargo, mayoría de las metodologías desarrolladas se refieren a taludes en suelos o taludes en rocas altamente fracturadas y descompuestas (que se comportan como suelos) a los que se les puede aplicar una falla predecible. El modo es el llamado falla circular. Hay muy pocas referencias a métodos probabilísticos para taludes rocosos donde el modo de falla esperado es una falla plana.

2 DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La investigación ha sido desarrollada en un talud que se encuentra en la ciudad de Oruro en Bolivia, donde a partir de un levantamiento geológico de datos se ha establecido que existe una potencial falla plana las características del talud se muestran en la

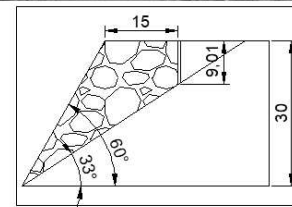


Figura 1. Inclinações:

$$\begin{aligned}\psi_f &= 60^\circ \\ \psi_p &= 33^\circ \\ \psi_s &= 0^\circ\end{aligned}$$

Alturas:

$$\begin{aligned}H &= 30,00 \text{ m} \\ z &= 9,01 \text{ m} \\ z_w &= 5,41 \text{ m (60\% de } z) \\ b &= 15,00 \text{ m}\end{aligned}$$

Figura 1. Características del talud – Caso de estudio.

Muestras representativas de roca del talud fueron llevadas al laboratorio de mecánica de rocas para realizar ensayos de corte directo y peso específico. Los valores estadísticos obtenidos son:

- Angulo de fricción interna: Promedio 39° - Desviación estándar $4,75^\circ$.
- Peso específico de la roca: Promedio $20,62 \text{ kN/m}^3$ - Desviación estándar $1,89 \text{ kN/m}^3$.

2.1 Definición del problema de confiabilidad

Un problema de confiabilidad está definido por la resistencia y la sollicitación. En el presente caso de estudio la resistencia será definida por el factor de seguridad que será calculado mediante la ecuación 5.

Resistencia.

$$A = (H + b \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H + b \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 \quad (3)$$

$$W = \gamma_r \left[(1 - \cot \psi_f \tan \psi_p) \left(bH + \frac{1}{2} H^2 \cot \psi_f \right) + \frac{1}{2} b^2 (\tan \psi_s - \tan \psi_p) \right] \quad (4)$$

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (5)$$

En el caso de la sollicitación se pueden hacer los siguientes análisis:

- Sabemos que, si el factor de seguridad es menor a 1, el talud falla, es decir la falla plana ocurre, el bloque de roca se desprende del talud, entonces la resistencia será igual a 1.
- En los proyectos de ingeniería nunca se diseña un talud con el factor de seguridad igual a 1, porque este es un estado inminente de falla, cualquier mínimo cambio en las condiciones del talud puede hacer que el factor de seguridad sea menor que 1, haciendo que el talud falle, por este motivo existen diferentes normativas en cada país en las cuales se establece el valor mínimo del factor de seguridad para el diseño del talud.

La asociación Brasileira de Normas Técnicas, por la Norma NBR 11682/91 – Estabilidad de Taludes, presenta los valores mínimos de Factores de seguridad en función del potencial riesgos contra daños materiales, ambientales y pérdida de vidas humanas.

Para el presente proyecto se decidió utilizar un valor mínimo de Factor de seguridad igual a 1,4, para niveles de seguridad medio contra pérdida de vidas humanas y nivel de seguridad contra daños materiales y ambientales medio.

En base a estos dos análisis la sollicitación tendrá los siguientes valores:

Solicitación.

Solicitación 1 = 1,0 (Mínimo factor de seguridad)

Solicitación 2 = 1,4 (Mínimo factor de seguridad) ABNT NBR 11682/91

Entonces las ecuaciones de estado límites son:

Ecuación Estado Límite 1:
 $R - S = 0 \quad (6)$

$FS - 1,0 = 0 \quad (7)$

Ecuación Estado Límite 2:
 $R - S = 0 \quad (8)$

$FS - 1,4 = 0 \quad (9)$

2.2 Definición de las variables aleatorias

Las variables que serán tomadas como variables aleatorias son el ángulo de fricción interna y el peso específico de la roca.

Es necesario poder caracterizar estas variables para conocer que distribución probabilística siguen, para esto se realizó un test de Kolgomorv - Smirnov los resultados son mostrados a continuación.

- Ángulo de fricción interna: $\phi \sim N(39,075; 4,748)^\circ$
- Peso específico de la roca: $\gamma_r \sim N(20,620; 3,575) \text{ kN/m}^3$

2.3 Definición de las variables determinísticas

En las ecuaciones de estado límite en la resistencia existen variables que serán tomadas como determinísticas, estas son:

- Inclinación del plano de discontinuidad, $\Psi_p = 33^\circ$

- Altura de la grieta de tracción, z
- Altura del agua dentro de la grieta de tracción es el 60% de z , z_w
- Distancia de la cresta del talud a la grieta de tracción, $b = 15 \text{ m}$
- Peso específico de agua, $\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$

2.4 Parámetros

Para realizar el análisis se va a variar los siguientes parámetros en la ecuación del factor de seguridad que forma parte de la resistencia en la ecuación del estado límite.

- Altura del talud, H
- Inclinación del talud, Ψ_f

Para cada altura e inclinación del talud los valores de la profundidad de la grieta de tracción (z) y la altura del agua dentro de la grieta de tracción (z_w) van a modificarse, por la geometría de la falla plana, es necesario aclarar que el porcentaje de agua dentro de la grieta de tracción permanecerá constante en todos los análisis y es igual al 60% de la altura de la grieta de tracción.

Los siguientes valores de altura e inclinación del talud serán evaluados:

$H = 25\text{m}, 30\text{m}, 40\text{m}, 50\text{m}, 60\text{m}, 70\text{m}$

$\Psi_f = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$

Un resumen de los datos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los datos analizados.

$H \text{ (m)}$	$\Psi_p \text{ (}^\circ\text{)}$	$\Psi_f \text{ (}^\circ\text{)}$	$b \text{ (m)}$	$z \text{ (m)}$	$z_w \text{ (m)}$
		50,00	15,00	1,64	0,98
		60,00	15,00	5,89	3,53
25,00	33,00	70,00	15,00	9,35	5,61
		80,00	15,00	12,40	7,44
		90,00	15,00	15,26	9,16
$H \text{ (m)}$	$\Psi_p \text{ (}^\circ\text{)}$	$\Psi_f \text{ (}^\circ\text{)}$	$b \text{ (m)}$	$z \text{ (m)}$	$z_w \text{ (m)}$
		50,00	15,00	3,91	2,35
		60,00	15,00	9,01	5,41
30,00	33,00	70,00	15,00	13,17	7,90
		80,00	15,00	16,82	10,09
		90,00	15,00	20,26	12,16
$H \text{ (m)}$	$\Psi_p \text{ (}^\circ\text{)}$	$\Psi_f \text{ (}^\circ\text{)}$	$b \text{ (m)}$	$z \text{ (m)}$	$z_w \text{ (m)}$
		50,00	15,00	8,46	5,08
		60,00	15,00	15,26	9,16
40,00	33,00	70,00	15,00	20,80	12,48
		80,00	15,00	25,68	15,41
		90,00	15,00	30,26	18,16

H (m)	Ψ_p (°)	Ψ_f (°)	b (m)	z (m)	z_w (m)
		50,00	15,00	13,01	7,81
		60,00	15,00	21,51	12,91
50,00	33,00	70,00	15,00	28,44	17,06
		80,00	15,00	34,53	20,72
		90,00	15,00	40,26	24,16

H (m)	Ψ_p (°)	Ψ_f (°)	b (m)	z (m)	z_w (m)
		50,00	15,00	17,56	10,54
		60,00	15,00	27,76	16,66
60,00	33,00	70,00	15,00	36,08	21,65
		80,00	15,00	43,27	25,96
		90,00	15,00	50,26	30,16

H (m)	Ψ_p (°)	Ψ_f (°)	b (m)	z (m)	z_w (m)
		50,00	15,00	22,11	13,27
		60,00	15,00	34,01	20,41
70,00	33,00	70,00	15,00	43,71	26,23
		80,00	15,00	52,24	31,34
		90,00	15,00	60,26	36,16

3 DISEÑO DETERMINÍSTICO

Se realizó el diseño determinístico para el talud del caso de estudio para obtener el valor del factor de seguridad, el cuál más adelante será comparado con la probabilidad de falla.

El factor de seguridad fue calculado con los siguientes datos:

- $\psi_f = 60^\circ$
- $\psi_p = 33^\circ$
- $\psi_s = 0^\circ$
- $H = 30$ m
- $z = 9,01$ m
- $z_w = 5,41$ m
- $b = 15$ m
- $\phi = 39,86^\circ$
- $\gamma_w = 9,81$ kN/m³
- $\gamma_r = 20,62$ kN/m³

El valor obtenido fue: $FS = 1,4$ (Estable). La Tabla 2 muestra el valor del factor de seguridad para todos los escenarios propuestos en los parámetros.

Tabla 2. Factores de seguridad.

H/ψ_p	50°	60°	70°	80°	90°
25 m	1,9	1,5	1,3	1,2	1,1
30 m	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0
40 m	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9
50 m	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7
60 m	1,2	1,0	0,9	0,8	0,6
70 m	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6

4 DISEÑO PROBABILÍSTICO

Se ha realizado el diseño probabilístico en el presente proyecto con la intención de poder asociar al factor de seguridad un valor de probabilidad de falla, además de conocer el índice de confiabilidad del talud del caso de estudio, así como también de todos los demás taludes analizados. Las Tablas 3 a la 12 muestran los resultados obtenidos para los métodos FORM, SORM, Simulación de Montecarlo - Bruto y Simulación de Montecarlo - Muestreo de importancia para las dos ecuaciones de estado límite propuestas.

Tabla 3. Resultados $\psi_p = 50^\circ$ Ecuación de estado límite 1.

H/ψ_p	50°							
	FORM	β	SORM	β	MC - B	β	MC-I	β
25 m	0,13	3,01	0,12	3,02	0,13	3,01	0,12	3,03
30 m	0,39	2,66	0,38	2,67	0,36	2,69	0,36	2,69
40 m	2,29	2,00	2,25	2,01	2,03	2,05	2,25	2,00
50 m	7,91	1,41	7,90	1,41	8,10	1,40	7,49	1,44
60 m	18,30	0,90	15,97	0,90	19,25	0,87	17,29	0,94
70 m	31,81	0,47	32,73	0,46	30,10	0,52	33,77	0,42

Tabla 4. Resultados $\psi_p = 60^\circ$ Ecuación de estado límite 1.

H/ψ_p	60°							
	FOR M	β	SOR M	β	MC - B	β	MC-I	β
25 m	1,06	2,30	1,03	2,31	1,00	2,32	1,05	2,31
30 m	3,45	1,819	3,38	1,826	3,44	1,820	3,58	1,802
40 m	16,77	0,96	16,99	0,96	18,05	0,91	17,54	0,93
50 m	39,57	0,26	40,81	0,26	40,50	0,24	39,91	0,26
60 m	61,23	-0,29	-	-	63,70	-0,38	64,73	-0,38
70 m	76,22	-0,71	-	-	78,10	-0,78	78,19	-0,78

Tabla 5. Resultados $\psi_p = 70^\circ$ Ecuación de estado límite 1.

H/ψ_p	70°							
	FORM	β	SORM	β	MC - B	β	MC-I	β
25 m	4,78	1,67	4,72	1,67	5,21	1,62	4,46	1,70
30 m	14,03	1,08	14,15	1,08	13,96	1,02	14,45	1,06
40 m	46,60	0,09	48,09	0,08	49,60	0,01	47,86	0,05
50 m	74,99	-0,66	-	-	76,70	-0,73	82,04	-0,92
60 m	89,07	-1,23	-	-	89,80	-1,27	87,41	-1,15
70 m	95,24	-1,67	-	-	96,70	-1,84	95,16	-1,66

Tabla 6. Resultados $\psi_p = 80^\circ$ Ecuación de estado límite 1.

80°								
H/ψ_p	FOR M	β	SOR M	β	MC - B	β	MC-I	β
25 m	14,80	1,05	14,44	1,05	12,36	1,13	15,37	1,02
30 m	35,87	0,36	36,91	0,35	35,30	0,38	38,50	0,31
40 m	77,04	-0,74	-	-	78,30	-0,78	74,38	-0,66
50 m	93,91	-1,55	-	-	94,90	-0,64	85,17	-1,04
60 m	93,85	-2,16	-	-	99,00	-2,33	100,00	0,00
70 m	99,63	-2,68	-	-	99,80	-2,88	98,59	-2,20

 Tabla 7. Resultados $\psi_p = 90^\circ$ Ecuación de estado límite 1.

90°								
H/ψ_p	FOR M	β	SOR M	β	MC - B	β	MC-I	β
25 m	34,99	0,39	35,99	0,38	36,70	0,34	34,61	0,40
30 m	65,18	-0,39	-	-	65,30	-0,39	68,65	-0,49
40 m	94,63	-1,61	-	-	95,50	-1,70	86,82	-1,12
50 m	99,47	-2,56	-	-	99,90	-3,09	91,34	-1,36
60 m	99,96	-3,35	-	-	100,00	0,00	100,00	0,00
70 m	99,99	-4,05	-	-	100,00	0,00	100,00	0,00

 Tabla 8. Resultados $\psi_p = 50^\circ$ Ecuación de estado límite 2.

50°								
H/ψ_p	FORM	β	SORM	β	MC -B	β	MC-I	β
25 m	5,67	1,58	5,37	1,61	5,94	1,56	5,31	1,62
30 m	15,76	1,00	15,04	1,03	16,13	0,99	15,52	1,01
40 m	48,62	0,03	47,64	0,06	49,80	0,01	47,28	0,07
50 m	77,09	-0,74	-	-	75,20	-0,68	83,11	-0,96
60 m	90,83	-1,33	-	-	92,20	-1,42	85,48	-1,06
70 m	96,17	-1,77	-	-	96,50	-1,81	92,47	-1,44

 Tabla 9. Resultados $\psi_p = 60^\circ$ Ecuación de estado límite 2.

60°								
H/ψ_p	FOR M	β	SOR M	β	MC - B	β	MC-I	β
25 m	32,76	0,45	31,59	0,45	32,80	0,45	32,53	0,45
30 m	58,98	-0,227	-	-	56,30	-0,159	59,43	-0,239
40 m	89,73	-1,27	-	-	89,20	-1,24	84,25	-1,01
50 m	97,55	-1,97	-	-	97,80	-2,01	98,30	-2,12
60 m	99,30	-2,46	-	-	99,50	-2,58	93,39	-1,51

70 m	99,76	-2,81	-	-	100,00	0,00	100,00	0,00
------	-------	-------	---	---	--------	------	--------	------

 Tabla 10. Resultados $\psi_p = 70^\circ$ Ecuación de estado límite 2.

70°								
H/ψ_p	FORM	β	SORM	β	MC -B	β	MC-I	β
25 m	66,81	-0,43	-	-	65,70	-0,40	61,13	-0,28
30 m	87,27	-1,14	-	-	87,50	-1,15	92,58	-1,45
40 m	98,34	-2,13	-	-	98,40	-2,14	93,19	-1,49
50 m	99,73	-2,78	-	-	99,80	-2,88	88,03	-1,18
60 m	99,94	-3,25	-	-	99,90	-3,09	100,00	0,00
70 m	99,98	-3,61	-	-	99,90	-3,09	79,86	-0,84

 Tabla 11. Resultados $\psi_p = 80^\circ$ Ecuación de estado límite 2.

80°								
H/ψ_p	FORM	β	SORM	β	MC -B	β	MC-I	β
25 m	88,05	-1,18	-	-	86,10	-1,08	83,78	-0,99
30 m	96,92	-1,87	-	-	97,80	-2,01	94,57	-1,60
40 m	99,77	-2,84	-	-	99,90	-3,09	95,44	-1,69
50 m	99,98	-3,52	-	-	100,00	-	100,00	-
60 m	100,00	-4,03	-	-	100,00	-	100,00	-
70 m	100,00	-4,43	-	-	100,00	-	100,00	-

 Tabla 12. Resultados $\psi_p = 90^\circ$ Ecuación de estado límite 2.

90°								
H/ψ_p	FORM	β	SORM	β	MC -B	β	MC-I	β
25 m	96,72	-1,84	-	-	97,30	-1,93	90,84	-1,33
30 m	99,44	-2,53	-	-	99,60	-2,65	95,60	-2,65
40 m	99,98	-3,56	-	-	100,00	-	100,00	-
50 m	100,00	-4,36	-	-	100,00	-	100,00	-
60 m	100,00	-5,04	-	-	100,00	-	100,00	-
70 m	100,00	-5,86	-	-	100,00	-	100,00	-

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se usarán los datos de la Tabla 2 y en el caso de las probabilidades de falla se usarán los resultados de la simulación del Montecarlo bruto, para ambas ecuaciones de estado límite, las Tablas 13 y 14 muestran estos valores.

Tabla 13. Probabilidades de falla en porcentaje para el método de Montecarlo Bruto para la ecuación de estado límite 1.

H/ψ_p	50°	60°	70°	80°	90°
25 m	0,13	1,00	5,21	12,36	36,70
30 m	0,36	3,44	13,96	35,30	65,30
40 m	2,03	18,05	49,60	78,30	95,50
50 m	8,10	40,50	76,70	94,90	99,90
60 m	19,25	63,70	89,80	99,00	100,00
70 m	30,10	78,10	96,70	99,80	100,00

Tabla 14. Probabilidades de falla en porcentaje para el método de Montecarlo Bruto para la ecuación de estado límite 2.

H/ψ_p	50°	60°	70°	80°	90°
25 m	5,94	32,80	65,70	86,10	97,30
30 m	16,13	56,30	87,50	97,80	99,60
40 m	49,80	89,20	98,40	99,90	100,00
50 m	75,20	97,80	99,80	100,00	100,00
60 m	92,20	99,50	99,90	100,00	100,00
70 m	96,50	100,00	99,90	100,00	100,00

5.1 Ecuación de estado límite 1

En las Tablas 2 y 13 se puede ver que a medida que la altura del talud aumenta el factor de seguridad disminuye al igual que la probabilidad de falla, esto muestra coherencia en el modelo de cálculo adoptado ya que se sabe que, en la ingeniería de taludes en roca, taludes altos con inclinaciones cercanas a los 90° son más inseguros que taludes de alturas menores con ángulos de inclinación bajos.

Para el talud del caso de estudio el factor de seguridad es 1,4 y la probabilidad de falla es 3,44%, una probabilidad baja, si este mismo talud tendría 25 m de altura con el mismo ángulo de inclinación la probabilidad de falla sería 1%, aún más baja, pero si el talud tendría 60 m de altura con el mismo ángulo de inclinación, la probabilidad de falla sería 63,70% está es una probabilidad de falla muy alta que viene de la mano con un factor de seguridad igual a 1, es decir igual al valor de la sollicitación en la ecuación del estado límite.

Para taludes encima de los 60 m con inclinaciones de 80° la probabilidad de falla es 100% y el factor de seguridad es menor a 1, es decir que la resistencia es menor a la sollicitación.

5.2 Ecuación de estado límite 2

En la ecuación de estado límite 2 la sollicitación es 1,4; 40% más que la ecuación de estado límite 1, por eso es que los las probabilidades de falla que se muestran en la tabla 23 son mayores. Para el talud del caso de estudio la probabilidad de falla es de 56,30% aproximadamente 50% más que para la ecuación de estado límite 1.

La menor probabilidad de falla es para un talud de 25 m con una inclinación de 50°, para taludes a partir de los 30 m y 70° de inclinación las probabilidades se acercan y en otros son iguales al

100%, los factores de seguridad en estos casos pueden ser mayores a 1 pero menores a 1,4, valor establecido por la norma.

Como se ha indicado anteriormente, no se diseñan taludes con FS iguales a la 1, siempre los diseños deben atender la norma, entonces en nuestro talud de caso de estudio se deben buscar algunas soluciones para poder reducir la probabilidad de falla, a continuación, se destacan algunas propuestas las cuales deberán ser evaluadas por quienes estén a cargo del diseño del talud.

5.2.2 Propuesta 1

Como se puede ver en la tabla 14 si al talud del caso de estudio le reducimos la inclinación en 10° ($H = 30\text{ m}; \psi_p = 50^\circ$); la probabilidad de falla reduce a 16,13%, es decir 40% menos.

Esta propuesta es interesante, hay que recordar que el análisis realizado es por 1 metro lineal, se debe tomar la totalidad de la longitud del talud para el cálculo del volumen de roca que tiene que retirarse del talud y para el cálculo de la perforación, voladura y transporte. El costo puede ser elevado y si el talud se encontrará en una carretera, hay que cortar la circulación de la misma en los horarios donde se hace la voladura de roca, para no causar accidentes.

5.2.2 Propuesta 2

Una manera de poder estabilizar el talud es drenando el agua que se encuentra en la grieta de tracción, en el talud del caso de estudio el agua alcanza el 60% de la altura de la grieta de tracción, haciendo el cálculo del factor de seguridad para el mismo talud con la grieta de tracción drenada, se tiene los siguientes resultados:

$$FS = 1,6$$

$$pf_{MC-B} = 18,6\%$$

Estos valores son muy cercanos a los valores de la propuesta 1, pero aquí no hay necesidad de hacer voladura en rocas, pero es necesario calcular el costo del drenaje del talud para comparar con la propuesta 1.

Si aparte de drenar el talud se decide rebajar 5 m la altura, los valores de FS y pf son:

$$FS = 1,7$$

$$pf_{MC-B} = 11,25\%$$

Rebaja aún más la probabilidad de falla, pero es necesario realizar voladura de rocas.

Es importante tomar en cuenta la altura del agua en la grieta de tracción en taludes donde la falla previsible es la falla plana, porque si el talud está saturado, es decir la altura del agua en la grieta de tracción es la misma que la grieta, la probabilidad de falla aumenta mucho, para el talud del caso de estudio se pueden observar los siguientes valores:

$$FS = 1,2$$

$$pf_{MC-B} = 93,00\%$$

Es decir que el talud falla en estas condiciones, por eso es mejor primero tomar en cuenta esta propuesta.

5.2.3 Propuesta 3

Esta propuesta tiene que ver con el uso de perno de anclaje que refuercen la estabilidad del bloque a deslizarse, este análisis esta fuera del alcance de esta investigación.

5.2.4 Aporte

Para finalizar, es posible definir las funciones de distribución acumulada del talud de caso de estudio, para tener una cartilla la cual pueda dar directamente la probabilidad de falla a partir del factor de seguridad, se ha creado esta cartilla para el talud del caso de estudio, la curvas muestra en la Figura 2.

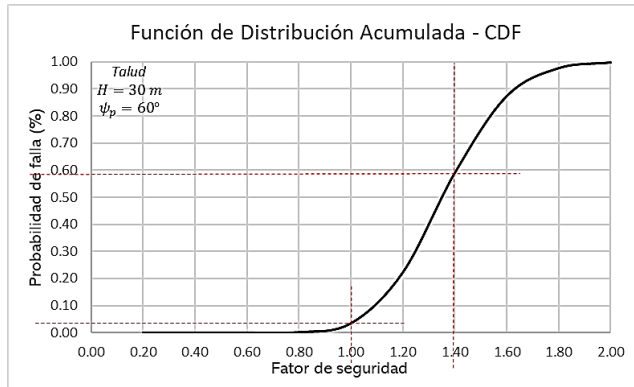


Figura 2. CDF talud caso de estudio.

Se trazaron unas líneas segmentadas sobre cada de las solicitaciones de las ecuaciones de estado límite (EEL 1 = 1,0; EEL 2 = 1,4) y para la solicitación 1 la probabilidad de falla es aproximadamente 4% y para la solicitación 2 es 58%, valores que son similares a los mostrados en las Tablas 13 y 14.

De esta manera se puede ofrecer a los ingenieros encargados del diseño de taludes estas cartillas para que ellos puedan tomar decisiones.

6 CONCLUSIONES

Se ha verificado que el análisis probabilístico de la estabilidad de taludes en roca en los que la modalidad previsible de fallamiento es la falla plana, permite enriquecer la información proporcionada por un factor de seguridad sobre la estabilidad de un talud con la probabilidad de falla del talud. Si el factor de seguridad de un talud es, por ejemplo, igual a 1,4; teóricamente, el talud es estable (factor de seguridad superior a la unidad); sin embargo, la pregunta inmediata del ingeniero encargado de evaluar la estabilidad del talud es ¿será realmente estable el talud? a sabiendas de la alta incertidumbre asociada a algunas de las variables que intervienen en el cálculo del factor de seguridad. Si el factor de seguridad viene acompañado de una probabilidad de falla del talud y el valor de esta probabilidad es, por ejemplo, igual a 3,5%, el ingeniero posiblemente considerará que el talud es efectivamente estable; por el contrario, si la probabilidad de falla del talud es igual a 56%, el ingeniero tendrá serias dudas sobre la estabilidad del talud. En definitiva, conocer la probabilidad de falla de un talud permite una mejor toma de decisiones.

Se ha demostrado que es posible construir un modelo para posibilitar el análisis probabilístico de la estabilidad de un talud en roca donde se prevé una falla plana, siguiendo la metodología que normalmente utiliza; dicha metodología ha sido desarrollada paso a paso en la presente investigación.

El modelo construido ha sido además validado; los resultados corroboran que cuanto mayor sea el buzamiento de la cara del talud, más inestable es el talud; también corroboran que cuanto mayor sea la altura del talud, más inestable se hace el talud.

Por otro lado, se ha podido ver que el diseño probabilístico de taludes en roca es una buena herramienta aplicable en la actualidad gracias al avance de la tecnología, y tiene la ventaja de tomar en cuenta la incertidumbre que la naturaleza impone sobre algunas de las variables utilizadas en el diseño determinístico. El uso simultáneo de ambas metodologías (determinística y probabilística) siempre será beneficioso para la ingeniería civil, la ingeniería de minas, la ingeniería geológica y la ingeniería geotécnica no solo para obtener factores de seguridad asociados a taludes en roca; sino también para ampliar la visión y aplicar el análisis probabilístico al diseño de fundaciones, presas, estructuras de contención y muchas otras estructuras.

El modelo de simulación construido, considera como variables aleatorias al ángulo de fricción interna y la cohesión de la roca del talud ya que son las variables que conllevan mayor incertidumbre pues su cuantificación está basada en resultados de pruebas de laboratorio; en estas pruebas difícilmente pueden reproducirse las condiciones reales del terreno por varios factores como errores en el muestreo, perturbaciones durante las pruebas de laboratorio, errores en el procesamiento de los datos obtenidos y otros. Sin embargo, posiblemente más variables presenten incertidumbres en su cuantificación; entre ellas se puede mencionar el peso específico de la roca, la distribución de la presión de agua en la cuña y otras. A partir de esto, se debe tener cuidado con las simplificaciones utilizadas en el análisis probabilístico, que puede llegar a subestimar la probabilidad de falla de un talud.

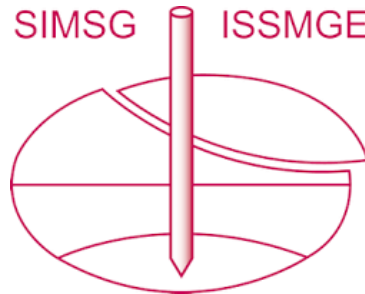
Un desafío en esta materia radica en la determinación del riesgo aceptable; vale decir, definir cuál es la probabilidad de falla que se puede tolerar para la estabilidad de un talud o estructura. De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada sobre el tema, actualmente no existe un consenso al respecto. Sin embargo, algunos autores señalan que la probabilidad tolerable para garantizar la estabilidad de un talud fluctúa entre 1% y 10% (Dell'Avanzi & Sayão, 1998).

7 REFERENCIAS

- Alonso, E. E. (1976). Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. *Geotechnique*, 26(3), 453–472.
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons.
- Ceryan, N., Kesimal, A., & Ceryan, S. (2018). Probabilistic analysis applied to rock slope stability: A case study from Northeast Turkey. In *Integrating Disaster Science and Management* (pp. 221–261). Elsevier.
- Dell'Avanzi, E., & Sayão, A. (1998). Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes. *Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 11(2), 1289–1295.
- Fernández, W., Villalobos, S., & King, R. (2018). Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelos residuales de granito completamente descompuesto. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 5–14.

- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). Rock slope engineering. CRC press.
- Johari, A., & Lari, A. M. (2017). System probabilistic model of rock slope stability considering correlated failure modes. *Computers and Geotechnics*, 81, 26–38.
- Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., & Jalali, S. M. E. (2011). A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes. *Engineering Geology*, 118(3–4), 82–92.
- Nguyen, T. S., Tanapalungkorn, W., & Likitlersuang, S. (2024). Probabilistic analysis of dual circular tunnels in rock masses considering rotated anisotropic random fields. *Computers and Geotechnics*, 170, 106319.
- Park, H.-J., West, T. R., & Woo, I. (2005). Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA. *Engineering Geology*, 79(3–4), 230–250.
- Reale, C., Xue, J., Pan, Z., & Gavin, K. (2015). Deterministic and probabilistic multi-modal analysis of slope stability. *Computers and Geotechnics*, 66, 172–179.
- Scavia, C., Barla, G., & Bernaudo, V. (1990). Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27(6), 465–478.
- Tang, W. H., Yucemen, M. S., & Ang, A.-S. (1976). Probability-based short term design of soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(3), 201–215.
- Vanmarcke, E. H. (1977). Reliability of earth slopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 1247–1265.
- Wu, T. H., & Kraft Jr, L. M. (1970). Safety analysis of slopes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(2), 609–630.
- Zheng, J., Kulatilake, P. H. S. W., Shu, B., Sherizadeh, T., & Deng, J. (2014). Probabilistic block theory analysis for a rock slope at an open pit mine in USA. *Computers and Geotechnics*, 61, 254–265.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.