

Caracterización geotécnica para determinar el modelo de estabilización del talud a escala reducida

Geotechnical characterization to determine the small-scale slope stabilization model

Jaime Walter Blas Cano¹, Elio Alejandro Milla Vergara²

Recibido: 01/01/2023 - Aprobado: 16/03/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

La investigación analiza el problema de inestabilidad del talud de un tramo crítico y desarrolla una estabilización en el talud del tramo vial Puente San Gerónimo – Puente Raymondí. La caracterización geotécnica se realizó a partir de una exploración in situ. Se obtuvieron muestras representativas y se realizaron ensayos de laboratorio para clasificar según SUCS y ASHTO; se obtuvo: $\phi = 32.31^\circ$ y $c=17.65 \text{ kN/m}^2$, peso específico $\gamma = 16.97 \text{ kN/m}^3$. Del análisis de estabilidad mediante el método de equilibrio límite, se determinaron los factores de seguridad: para el talud natural $FS=0.86$ y para el talud estabilizado $FS=1.20$.

El diseño de la investigación es experimental. El desarrollo del talud a escala reducida para el talud natural y el talud estabilizado se realizó para tres probetas, en las que se determinaron: fuerzas, deformaciones y esfuerzos aplicados; desarrollándose el análisis comparativo de los taludes, tales como la variación de los factores de seguridad, variación de la carga aplicada durante el ensayo, variación de las resistencias, definición de la participación de esfuerzos y similitudes. Finalmente, se obtuvo que el factor de seguridad aumentó en un 28.33%, debido a la estabilización propuesta; lo que permite contrastar la hipótesis de la investigación.

Keywords: caracterización geotécnica, escala reducida, estabilización de talud, factor de seguridad, modelo de talud, probeta de ensayo, talud crítico.

ABSTRACT

The research analyzes the problem of instability of the slope of a critical section and develops a value on the slope of the Puente San Gerónimo - Puente Raymondí road section. The geotechnical characterization was carried out from in situ exploration, obtaining representative samples and laboratory tests to classify according to SUCS and ASHTO and the following was obtained: $\phi = 32.31^\circ$ and $c=17.65 \text{ kN/m}^2$, specific weight $\gamma = 16.97 \text{ kN/m}^3$. From the stability analysis using the limit equilibrium method, the safety factors: for the natural slope $FS=0.86$ and for the stabilized slope $FS=1.20$.

The research design is experimental. The development of the slope on a reduced scale for the natural slope and the stabilized slope was carried out for three specimens, in which the following were determined: forces, deformations and applied stresses; developing the comparative analysis of the slopes, such as the variation of the safety factors, variation of the load applied during the test, variation of the resistances, define the participation of efforts and similarities. Finally, it was obtained that the safety factor increased by 28.33% due to the proposal; which allows to contrast the research hypothesis.

Palabras claves: geotechnical characterization, reduced scale, slope stabilization, safety factor, slope model, test specimen, critical slope.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado, Lima, Perú.

Exalumno de la Maestría en Geología, mención en Geotecnia. Docente auxiliar en la UNASAM-FIC. Autor para correspondencia: wblasc@unasam.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0919-9306>

2 Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Facultad de Ingeniería Civil. Huaraz, Perú.

Docente Principal. E-mail: emillav@unasam.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9931-0970>

I. INTRODUCCIÓN

La investigación plantea la estabilización del talud a escala reducida en el tramo crítico, por presentar problemas geotécnicos de inestabilidad de talud, que dificultan la transitabilidad vehicular de una vía de gran importancia; produciéndose en épocas de precipitaciones pluviales riesgos de colapsos de viviendas y pérdida de vidas humanas. El tramo en estudio es la vía nacional Casma-Huaraz.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones y Provias Nacional no desarrollan actividades de mantenimiento periódicos ni rutinarios, razón por la cual incurrir en mayores costos de operación y mantenimiento en el tiempo por deterioro de la vía, debido a los colapsos de taludes viales.

La metodología consiste en desarrollar un modelo de estabilización de talud a escala reducida, con la finalidad de verificar la relación de factor de seguridad, primero con la caracterización geotécnica obtenida del suelo natural existente, luego realizando la comparación de las condiciones más desfavorables, así como el caso saturado; modelo desarrollado con la ayuda del software Slide para la proposición final del estudio.

Existen métodos de soluciones para estabilización de talud desarrollados a nivel nacional e internacional. Colombia es el país que más ha desarrollado los métodos de estabilización específicamente para obras de infraestructura viales. Primero se desarrolla la caracterización geotécnica mediante los ensayos estándar y especiales; con las que se obtienen las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

Respecto a los antecedentes se describen a continuación las investigaciones más importantes:

Mendoza (2016). Realiza una descripción del suelo, de la estabilización de talud y del peligro sísmico; efectúa cálculos de factores de estabilización de talud a más de 100 m. de altura, hace énfasis en las condiciones pseudoestáticas, concluye que existe la necesidad de considerar el análisis de los estratos en taludes con proyección a estabilizar el talud en condiciones estáticas, obteniendo el $F.S=1.002$, que evidencia el riesgo de la existencia de colapso por licuefacción.

Sackschewski (2017). Desarrolla la solución de estabilización de talud en la carretera Canta-Huayllay, mediante los análisis de los métodos de equilibrio límite (Bishop simplificado y Spencer), y para rocas utilizó el criterio de Hooke, con la ayuda del software Slide 6.0., obtiene resultados sísmicos y estáticos aplicando medidas correctivas para lograr la estabilización de los taludes.

Breña (2019). Tesis de la UNMSM, de la carretera Cajamarca, determinó como problema principal la cohesión, evaluó la caracterización geotécnica de peso unitario, ángulo de fricción interna, límites de Atterberg, con la finalidad de analizar la interacción de suelo - roca, y obtuvo resultados de $F.S=1.0$ con la ayuda del software Slide, considerando el mapa de isoaceleraciones de valor

0.30g., el estudio pretende alcanzar un F.S. mínimo de 1.5 (estáticamente).

Suarez (1998). Menciona que el comportamiento de los taludes es reflejado mediante modelos matemáticos que tienen en cuenta los factores que aquejan la estabilidad de los taludes; considera los factores sísmicos, fluidificación del suelo, cargas estáticas y dinámicas, caracterización geotécnica y geológica, presencia de grietas internas debido a esfuerzos; indica la gran importancia de la geometría del talud. Menciona que los cálculos matemáticos no son óptimos para todos los casos y enfatiza el por qué no se obtendrá resultados reales, por tanto, queda en manos del proyectista.

En la presente investigación se ha desarrollado la caracterización geotécnica y se obtuvo la clasificación SUCS, los parámetros mecánicos: cohesión del suelo $c = 17.65 \text{ kN/m}^2$ y el ángulo de fricción $\phi = 32.31^\circ$, determinadas con el ensayo de corte directo.

Para la determinación del factor de seguridad de la geometría proporcionada, considerando la caracterización geotécnica del talud natural y talud estabilizado, se ensayaron ambos modelos a escala reducida, obteniéndose resistencias diferentes para los casos de talud natural y estabilizada, se identificaron las formas de fallas del talud que se presentan durante el ensayo y el inicio de la falla hasta la falla final con relación a su máxima resistencia a la sobrecarga. Las tres maquetas fueron ensayadas según la geometría considerada del talud más crítico; para los ensayos se adecuó el uso de la prensa de CBR. Se verificó la estabilidad del talud a escala reducida con el software Slide para ambos casos de talud natural y talud estabilizada. Finalmente, se determinó la relación del factor que aumentó en un 28.33% debido a que la estabilización propuesta fue efectivamente funcional.

II. MÉTODOS

El tipo de investigación, de acuerdo al fin que persigue, es aplicada, con el diseño de investigación descriptiva, longitudinal y experimental. La unidad de análisis poblacional se encuentra entre las provincias de Casma y Huaraz; entre sus obras de arte tales como: taludes, cortes, rellenos y calzada. El tramo específico de la investigación para la estabilización de talud es el barrio de Los Olivos, tramo: puente San Gerónimo-Puente Raymondi. La población de estudio son las obras relacionadas de estabilización de talud de la pista asfaltada del tramo Casma-Huaraz: Km. 0+000 – 0+292 del departamento de Ancash. Para el tamaño de muestra se empleó el método no probabilístico (no aleatoria), el muestreo es por conveniencia del tramo Puente San Gerónimo-Puente Raymondi (Km. 0+000 – 0+292). Se utilizaron las siguientes técnicas de recolección de datos: en primer lugar, las fuentes secundarias como tesis sustentadas y aprobadas y en segundo lugar, las fuentes primarias, que nos sirven para contrastar los análisis y cálculos de la investigación.

III. RESULTADOS

Se desarrolló el plan operativo para la ejecución de la investigación, luego se obtuvieron los resultados de ensayos de laboratorio y procesos de la información.

3.1. Determinación de la caracterización geotécnica

En las tablas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, se muestran los resultados de la caracterización geotécnica que se obtuvo de los ensayos estándar y especiales.

Tabla 1. Resumen del análisis granulométrico

Gradación	C - 01	C - 02	C - 03
Grava (%): $[N^{\circ}4 < \phi < 3^{\circ}]$	51.53	28.79	21.39
Arena (%): $[N^{\circ}200 < \phi < N^{\circ}4]$	35.47	51.92	56.08
Finos (%): $[\phi < N^{\circ}200]$	13.00	19.29	22.52

Leyenda: desarrollada según norma ASTM D-422 y NTP 339.128.

Tabla 2. Resumen de ensayos límites de consistencia

	C - 01	C - 02	C - 03
Límite líquido (LL), (%)	0.00	34.72	37.59
Límite plástico (LP), (%)	0.00	23.17	26.99
Índice de plasticidad (IP), (%)	0.00	11.55	10.60
Contenido humedad Promedio, (%)	4.49%	3.30%	4.15%

Leyenda: desarrollada según norma ASTM D-4318 y NTP 339.129.

Tabla 3. Resumen de clasificación según AASTHO

	C - 01	C - 02	C - 03
Tipo de suelo	Material Granular	Material Granular	Material Granular
Suelo	A - 1 - a (0)	A - 2 - 6 (0)	A - 2 - 6 (0)

Leyenda: resultados tipo de suelo material granular para las tres calicatas.

Tabla 4. Resumen de clasificación según SUCS

	C - 01	C - 02	C - 03
Tipo de suelo	Grava	Arena	Grava
Suelo	GM	SM	GM

Leyenda: resultados de tipo de suelos para las tres calicatas.

Tabla 5. Resumen de proctor modificado

	A-1-a (0)	A-2-6 (0)	A-2-6 (0)
Densidad seca máxima (T/m^3)	-	2.04	2.05
Contenido de humedad óptima (%)	-	8.41	8.53

Leyenda: se observa que la primera calicata no tiene representatividad de densidad.

Tabla 6. Resumen de resultados de corte directo y peso específico

Caracterización	Resultado
Cohesión (c)	$0.18 \text{ kg/cm}^2 = 17.65 \text{ kN/m}^2$
Ángulo de fricción interna (ϕ)	32.31°
Peso específico (gr/cm^3)	$1.71 \text{ gr/cm}^3 = 16.97 \text{ kN/m}^3$

Leyenda: ensayo especial según norma D-3080 y NTP 339-171.

Resultado del análisis de talud según la caracterización geotécnica determinada, mediante el método de Equilibrio Límite

En la Tabla 7, se presentan los resultados obtenidos mediante el programa Slide del talud menos crítico Km. 0+150.

En la Tabla 8, se muestran los resultados obtenidos para el talud más crítico, tanto para el talud natural y el talud estabilizado.

Resultado del proceso de ensayo del talud a escala reducida

Se consideraron tres prototipos a escala reducida, para material en suelo inalterado (óptima compactación) y

alterada (con humedad saturada) que es el caso más desfavorable.

3.1.1. Obtención de la densidad natural in situ versus la densidad a escala reducida

Ver Tabla 9.

3.1.2. Resultados de ensayo de talud natural a escala reducida

Ver Tabla 10.

Tabla 7. Resumen de los factores de seguridad determinados a escala natural con el programa Slide del talud menos crítico

Método analizado	Talud natural
	F.S.
Bishop simplificado	1.094
Janbu simplificado	1.048
Spencer	1.091

Leyenda: talud natural equivale a decir talud similar al existente en el tramo crítico.

Tabla 8. Resumen de los factores de seguridad determinados a escala natural con el programa Slide del talud más crítico

Método análisis	Talud natural	Talud estabilizado
	F.S.	F.S.
Bishop Simplificado	0.869	1.229
Janbu Simplificado	0.844	1.151
Spencer	0.862	1.223

Leyenda: talud estabilizado equivale a decir propuesta de talud de la investigación.

Tabla 9. Determinación del peso específico del talud estabilizado

Probeta	Vp (cm³)	Pp+Stn (gr)	Pp (gr)	ω (%)	Wm (gr)	T _s (gr/cm³)
P-1	13930.06	37252.5	9100	8.50%	28152.50	2.02
P-2	13856.35	34322.0	9106	12.00%	25216.00	1.82
P-3	13918.77	29840.0	9128	16.00%	20712.00	1.49

Leyenda: P-i: probeta; Vp: volumen de probeta; Pp: peso de probeta; Stn: peso suelo talud natural ó estabilizado; ω: contenido de humedad, vs: peso específico.

Tabla 10. Ensayo fuerza versus deformación del talud natural

Probeta P-1		Probeta P-2		Probeta P-3	
Def. mm	Fuerza (Kg)	Def. mm	Fuerza (Kg)	Def. mm	Fuerza (Kg)
0	0	0	0	0	0
0.25	65	0.64	77	0.18	15
0.61	230	1.27	153.9	0.58	47.5
0.89	450	2.03	277.9	1.7	123
1.91	929.1	2.54	367.6	2.67	205
2.16	1154	3.05	480	3.05	238
2.54	1578.2	3.56	570	3.81	270
2.62	1767.6	5.08	860	5.05	298
2.72	1985.3	5.84	990	5.59	312

Leyenda: Def.: es deformación (mm), la fuerza es puntual sobre una superficie de apoyo.

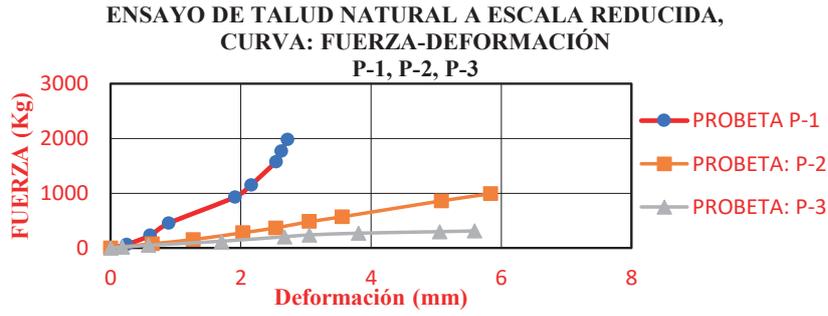


Figura 1. Gráfica fuerza deformación de talud natural (P-1, P-2, P-3) a escala reducida.

3.1.3. Resultados de ensayo de talud estabilizado a escala reducida

Ver Tabla 11 y Figura 2.

3.1.4. Registros de agrietamientos de los taludes a escala reducida ensayada

3.1.4.1. Registro de grietas del talud natural ensayado: P-1, P-2, P-3

Según la verificación de las grietas luego del ensayo en laboratorio, se observó que los tres prototipos a escala

reducida tuvieron similares grietas en cuanto a su ubicación y forma, las cuales se detallan en las figuras 3 y 4.

3.1.4.2. Registro de grietas del talud estabilizado ensayado: P-1, P-2, P-3

En las tablas 12 y 13, se detallan los desplazamientos o penetración de la carga vertical sobre cada talud estabilizado a escala reducida y en las figuras 5 y 6 los agrietamientos en cada probeta.

Tabla 11. Ensayo fuerza determinación del talud estabilizado

Probeta P-1		Probeta P-2		Probeta P-3	
Def. mm	Fuerza (Kg)	Def. mm	Fuerza (Kg)	Def. mm	Fuerza (Kg)
0	0	0	0	0	0
0.64	127	0.64	40	0.64	7.5
1.27	693	1.27	64.2	1.27	16.8
1.91	1353	1.91	88.2	1.91	25.3
2.54	1679	2.54	114.1	2.54	33.6
3.05	1950	5.08	254	5.08	74.3
3.56	2100	7.62	413.6	7.62	123.7
5.08	2365	10.16	589	10.16	179.6
5.84	2420	12.7	723	12.7	233.1
6.35	2500	13.97	780	15.24	280
7.62	2665	0	0	17.78	370

Leyenda: Def.: es deformación (mm), la fuerza es puntual sobre una superficie de apoyo.

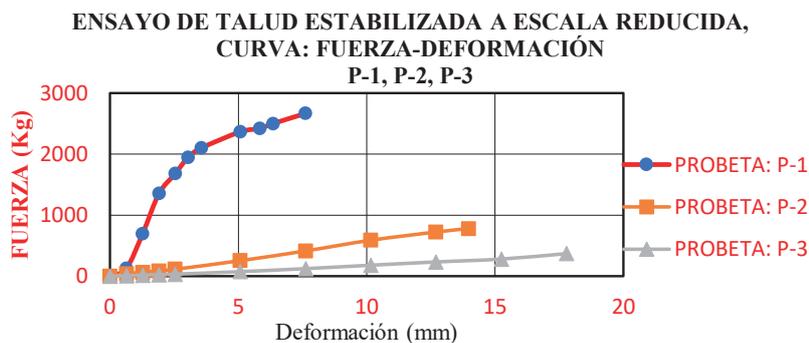


Figura 2. Gráfica fuerza deformación de talud estabilizado (P-1, P-2, P-3) a escala reducida.

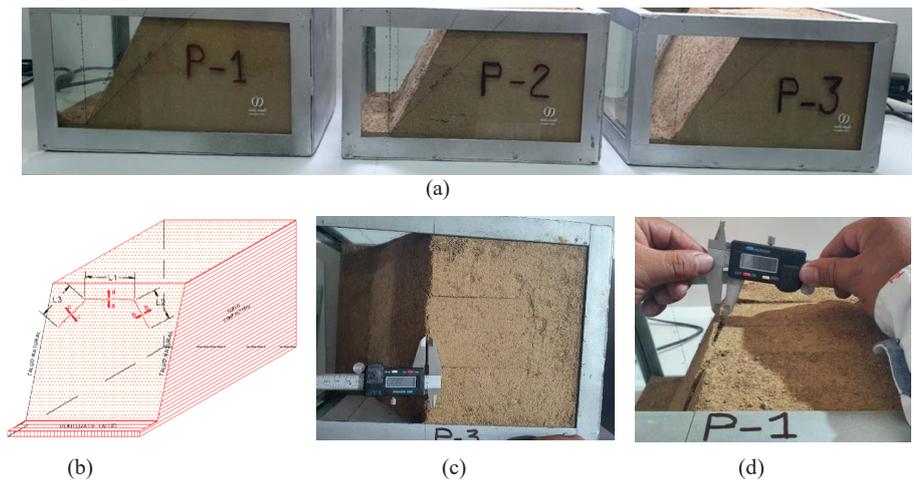


Figura 3. (a) Prototipos de maquetas ensayadas de talud natural a escala reducida, (b) Vista isométrica del modelo de falla típica luego del ensayo, (c) y (d) Medición de las fisuras producto de la sobrecarga y deformación.

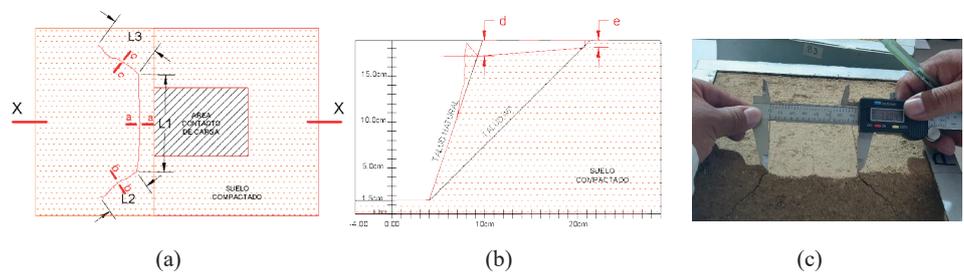


Figura 4. (a) Vista en planta típica del prototipo ensayada a escala reducida talud natural, (b) Vista de perfil típico ó corte X-X, (c) Medición de fisuras producto de la sobrecarga y deformación.

Tabla 12. Resumen de registro de desplazamiento vertical total o penetración de la carga en cada probeta de ensayo

Probeta	Espesor de grietas	
	d (mm)	e (mm)
P-1	6.50	3.50
P-2	13.50	8.10
P-3	19.50	18.00

Leyenda: “d” y “e”: deformación vertical, según la Figura 4. (b).

Tabla 13. Resumen del registro de grietas de los modelos estabilizados luego del ensayo

Grietas	Probetas ensayadas					
	P-1		P-2		P-3	
	ancho	long.	ancho	long.	ancho	long.
f1	3.2	137.44	2.53	250.47	2	193.62
f2	0.62	33.45	0.34	92.08	0.56	41.59
f3	0.44	80.71	0.33	100.94	0.38	31.41
f4	0.23	43.11	0.39	78.62	0.4	48.08
f5	0.56	55.23	0.35	28.34	0.28	50.9
f6	0.62	37.03	0.55	133.24	0.31	29.66
f7	0.72	55.15	0.29	21.78	0.96	77.03
f8	0.35	32.5	0.46	68.42	1.62	90.76
f9	0.5	112.49	0.33	38.4	0.73	83.78
f10	0.42	27.97	--	--	0.42	33.87
f11	0.36	32.83	--	--	0.39	54.39
f12	0.43	51.54	--	--	0.29	36.45

Leyenda: fi: número de fisura, ancho: espesor de la fisura, long.: longitud de fisura.

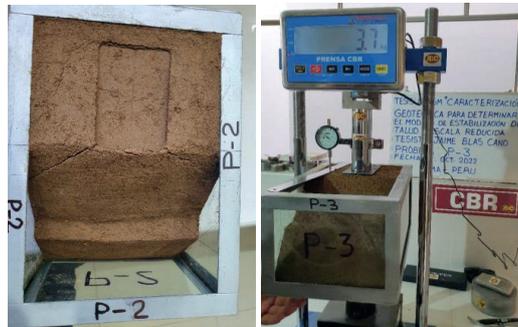


(a)



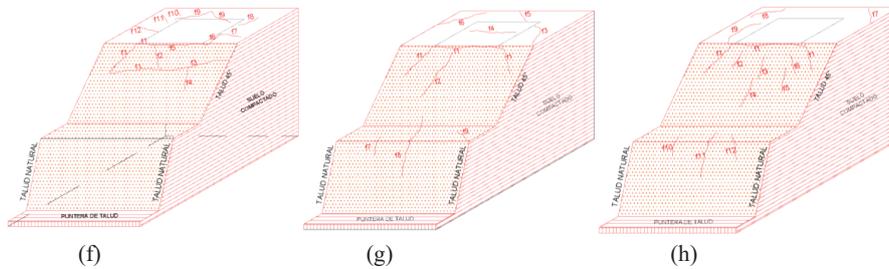
(b)

(c)



(d)

(e)

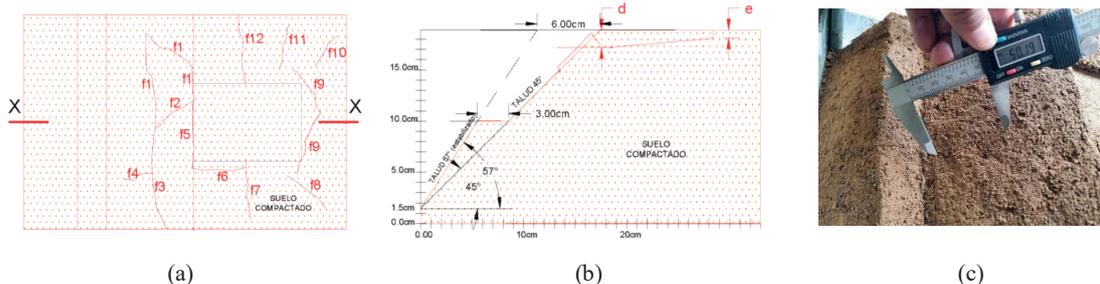


(f)

(g)

(h)

Figura 5. (a) Prototipo de maquetas ensayadas de talud estabilizado a escala reducida, (b) y (c) Agrietamiento del talud P-1 luego del ensayo, (d) Vista de probeta P-2 agrietada, (e) Vista del ensayo de la probeta P-3 en el equipo CBR, (f), (g) y (h) Simulación isométrica del modelo de fallas del talud estabilizado (P-1, P-2, P-3).



(a)

(b)

(c)

Figura 6. (a) Vista en planta del agrietamiento del prototipo P-1 del modelo de talud estabilizado ensayada a escala reducida, (b) Perfil ó corte X-X, (c) Medición de las fisuras.

3.1.4.3. Resumen de grietas, deformación, carga máxima de ensayo

Tabla 14. Resultados de grietas, deformación versus carga máxima de ensayo del talud natural

PROBETA	#Fi	Qf (kg)	e max. (mm)	δp (mm)	Lmax (mm)
P-1	3	1985.3	4.00	5.50	250.00
P-2	3	990	7.31	11.50	259.24
P-3	3	312	2.82	8.00	205.70

Leyenda: #F_i: cantidad de fisuras de cada probeta; Q_f: carga final máxima del ensayo producido en laboratorio (kg); e_{max}: espesor máximo alcanzado en cada grieta luego del ensayo de carga máxima (mm); δ_p: deformación vertical máxima promedio alcanzada (mm); L_{max}: longitud máxima de las fisuras de cada probeta (mm).

Tabla 15. Resultados de grietas, deformación versus carga máxima de ensayo talud estabilizado

PROBETA	#F _i	Q _f (kg)	e _{max} (mm)	δ _p (mm)	L _{max} (mm)
P-1	12	2665	3.20	6.50	137.44
P-2	9	780	2.53	13.50	250.47
P-3	12	370	2.00	19.50	193.62

Leyenda: se considera la leyenda de la Tabla 14.

3.1.4.4. Variación de factor de seguridad del talud natural y estabilizado

Tabla 16. Análisis de la variación de los taludes natural y estabilizado

Método analizado	Talud natural	Talud estabilizada	% Variación TN & TE	% Variación promedio
	F.S.	F.S.		
Bishop simplificado	0.869	1.229	141.00%	
Janbu simplificado	0.844	1.151	136.00%	140.00%
Spencer	0.862	1.223	142.00%	
Promedio	0.860	1.200		

Leyenda: F.S.: factor de seguridad; TN: talud natural; TE: talud estabilizado.

3.1.4.5. De la participación de cargas, resistencias y esfuerzos del talud natural versus talud estabilizado

Tabla 17. Participación de cargas, resistencias y esfuerzos del talud natural versus talud estabilizado

Probeta	% Participación de las cargas finales (TN & TE)	% variación de resistencia	% Participación de los esfuerzos finales (TN & TE)
P-1	134.24%	161.54%	268.47%
P-2	78.79%	221.05%	78.79%
P-3	118.59%	147.83%	118.59%

Leyenda: TN&TE: talud natural versus talud estabilizado.

IV. DISCUSIÓN

Del tramo analizado más crítico km. 0+220, con talud 1:3 (H:V), altura de 29 m.

Del talud natural

Los factores de seguridad obtenidos y analizados por el método de equilibrio límite en el tramo más crítico del talud natural, con los varios métodos desarrollados, el más conservador es el método de Jambu Simplificado F.S

= 0.844; sin embargo, el promedio de los tres métodos es 0.86.

De la Figura 1, se puede concluir que la deformación mínima ocurre para la probeta P-1, porque tiene la máxima densidad $\gamma = 2.02\text{gr/cm}^3$, con un contenido de humedad óptimo del 8.50%. En el caso de las probetas P-2 y P-3, las densidades son de 1.82gr/cm^3 y 1.48gr/cm^3 , respectivamente, por tener mayores contenidos de humedad, como el 12% y el 16%, respectivamente.

Del talud estabilizado

Se eligió el perfil de análisis luego de una interacción de cortes de talud con las consideraciones de ángulos diferentes respecto a la horizontal. La primera banqueta a 57° con tres metros de banqueta a una altura intermedia del talud total, que representa la altura para el caso real y ajustada al tipo de probeta utilizada, que sirvió para ensayar según las condiciones de espacio y aplicación de la carga por el equipo de CBR. La conformación de los taludes se desarrolló manualmente. La segunda banqueta a 45° , para la banqueta natural del nivel del terreno natural (nivel superior de las probetas). (ver Figura 6., corte X-X).

De los factores de seguridad obtenidos y analizados por el método de Equilibrio Límite en el tramo más crítico del talud estabilizado, según la Tabla 8, el más conservador es el obtenido por el método Janbu Simplificado. El promedio entre los tres métodos es $F.S.=1.20$, este valor es aceptable según la experiencia y lo anotado por los autores citados en la presente investigación.

Comparación de los taludes natural y estabilizado

Al haberse sometido a la aplicación progresiva de cargas durante el ensayo con equipo CBR en laboratorio, en el caso del talud natural, se obtuvo una carga máxima aplicada de 1985.30kg, y en el caso del talud estabilizado, se registró una carga máxima de 2665 kg, como se puede observar en las tablas 10 y 11, respectivamente.

Según el resumen de resultados de grietas (Tabla 14), en el talud natural, luego del ensayo de carga, se observa que la grieta de longitud máxima se obtiene en la probeta P-2, con 259.24 mm; y con espesor máximo de 7.31 mm; con una deformación vertical máxima de 11.50 mm.

Del resumen de resultados de grietas (Tabla 15). En el talud estabilizado, luego del ensayo de carga, se observa que la grieta de longitud máxima se da en la probeta P-2, con 250.47 mm; el espesor máximo de grieta de 3.20 mm en P-1 y una deformación vertical máxima de 19.50mm para P-3. En comparación con los valores obtenidos para el talud natural, los valores máximos para el estabilizado se dan en diferentes probetas.

De los resultados mostrados en la Tabla 16, se puede observar la variación del factor de seguridad del talud natural y talud estabilizado para los diferentes métodos. Para el talud natural, se obtiene como promedio de factor de seguridad $F.S.=0.86$ y para el talud estabilizado, un factor de seguridad $F.S.=1.20$, un valor que se encuentra en el límite; por tanto, según las teorías citadas y las experiencias; con porcentaje de variación promedio del 40% entre el talud natural y el talud estabilizado, el talud propuesto se considera estable.

En la Tabla 17, se puede observar que existe una mayoritaria participación de las cargas finales en relación del talud natural versus talud estabilizada. La mayor participación es para la probeta P-1 en el 34.24%. La mínima variación de resistencia ocurre para la probeta P-2 en el 121.05% de más; y los esfuerzos son mayoritariamente en el 168.47% para la probeta P-1.

V. CONCLUSIONES

Respecto a la caracterización geotécnica:

- La caracterización geotécnica obtenida según la clasificación AASTHO, para los tipos de suelos encontrados son: A-1 para la C-01 y A-2 para las calicatas C-02 y C-03, respectivamente. La densidad es 2.01 gr/cm^3 , cercano al calculado en el ensayo de Proctor modificado 2.04 gr/cm^3 .
- Según la clasificación SUCS se determina la simbología GM para la calicata C-01, y para las calicatas C-02 y C-03 se obtienen SM y GM. Con el corte directo se determinó el ángulo de fricción interna del suelo $\phi = 32.31^\circ$ y $c = 17.65 \text{ kN/m}^2$, peso específico $\gamma = 16.97 \text{ kN/m}^3$.

Respecto al análisis del talud natural:

- El factor de seguridad, en el tramo más crítico Km. 0+220, es $FS = 0.86$.
- La fuerza máxima alcanzada durante el ensayo en laboratorio para el talud natural fue para la probeta P-1, con un valor de 1,985.30 kg., obteniéndose una grieta en cada probeta en tres direcciones unidas entre sí, las grietas de máxima longitud son para la probeta P-2 de $L_{\text{max}} = 259.24 \text{ mm}$, y el ancho máximo de grieta se alcanzó en la probeta P-2, siendo $e_{\text{max}} = 7.31 \text{ mm}$, la deformación vertical máxima promedio fue alcanzada en la probeta P-2 con 11.50mm.

Respecto al análisis del talud estabilizado

- El factor de seguridad, para el tramo más crítico Km. 0+220, en promedio el $FS = 1.20$.
- Al igual que para el talud natural la fuerza máxima alcanzada durante el ensayo en laboratorio se obtuvo para la probeta P-1, siendo la carga final de 2,665 kg., al finalizar los ensayos se han obtenido doce grietas en cada probeta en diferentes direcciones; las grietas de máxima longitud son para la probeta P-2 de $L_{\text{max}} = 250.47 \text{ mm}$, y el espesor máximo de grieta alcanzada fue en la probeta P-1 siendo $e_{\text{max}} = 3.20 \text{ mm}$, la deformación vertical máxima promedio fue alcanzada en la probeta P-3 de 19.50mm.

Respecto al análisis comparativo para los taludes natural y estabilizada, ensayadas a escala reducida

- La variación del factor de seguridad del talud natural y talud estabilizada es del 141%, 136%, 142%, en promedio se tiene una variación del 140%, lo que significa que aumentó en un 40% al modificar el talud a uno estabilizado; variando los $F.S.$ promedio 0.86 a 1.20.
- Respecto a la variación de la carga aplicada de ensayo tanto para el talud natural y talud estabilizado, se obtuvieron un aumento de participación en 34.24% para P-1, 18.59% para P-3, y para P-2 hubo una reducción del 21.21%, lo que significa que en promedio hubo un aumento.

- De las variaciones de las resistencias se tiene un notable aumento entre el talud natural en relación con el talud estabilizado: 61.54%, 121.05%, 47.83%, respectivamente para las probetas P-1, P-2, P-3.
- Se ha obtenido directamente la relación del factor de seguridad requerida, siendo esta:
- Lo que significa que el factor de seguridad aumentó en un 28.33% debido a la estabilización propuesta en la presente investigación.

Contribución de autoría

Conceptualización: J.W.B.C.; Curación de datos: J.W.B.C; Análisis formal: J.W.B.C; Adquisición de fondos: J.W.B.C; Investigación: J.W.B.C; Metodología: J.W.B.C; Administración del proyecto: J.W.B.C; Software: J.W.B.C.; Recursos: E.A.M.V; Supervisión: E.A.M.V; Validación: E.A.M.V; Visualización: E.A.M.V; Redacción - borrador original: E.A.M.V; Redacción - revisión y edición: J.W.B.C y E.A.M.V- Jaime Walter Blas Cano y Elio Alejandro Milla Vergara.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

VI. REFERENCIAS

- Breña Vásquez C.H. (2019). Estabilidad de taludes de la carretera longitudinal de la sierra; tramo Cochabamba-Cutervo-Chiple, Cajamarca-Perú. [Tesis de maestría. Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/11386>
- Mendoza (2016). Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay. [Tesis de pregrado de la Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú.] <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7614>.
- Sackschewski C.(2017). Soluciones para la estabilidad de taludes de la carretera Canta –Huayllay entre las progresivas del km 102 al km 110. [Tesis de pregrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5743>.
- Suarez D. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Recuperado de: <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales/#:~:text=Deslizamientos%20y%20Estabilidad%20de%20Taludes%20en%20Zonas%20Tropicales%2C%20pretende%20ser,problemas%20de%20deslizamientos%20de%20tierra>.