



Determinación del talud de una presa de enrocado con pantalla de concreto a partir de análisis de estabilidad. Distrito de Cairani, Candarave, Tacna

Determination of the slope of a rockfill dam with a concrete wall based on stability analysis. Cairani district, Candarave, Tacna

Aro-Aro, Robert (Corresponding author)

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Geográfica

Unidad de Posgrado, Lima, Perú

E-mail: robert.aro@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0007-7749-9371>

Pino-Vargas, Edwin

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Departamento de Ingeniería Civil, Tacna, Perú

E-mail: epinov@unjbg.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo realizar análisis de estabilidad del talud con la finalidad de determinar el valor idóneo aguas abajo y arriba de una presa de enrocado con pantalla de concreto, considerando una ocurrencia de desembalse rápido producto de un periodo de sequías, infiltración de agua (estacionario), condiciones estáticas y pseudoestáticas. El diseño de la investigación es experimental, el tipo de investigación es aplicativa, la unidad de análisis es el talud de presa Turunturun. Se realizaron estudios de geología, geomorfología, geodinámica, geología estructural, sísmica, geofísica, hidrogeología, mecánica de rocas y suelos, con la finalidad de caracterizar el terreno de fundación y material de préstamo. Se ha realizado análisis de estabilidad para las siguientes relaciones de talud: 1(H):1(V), 1.25(H):1(V), 1.5(H):1(V), 1.75(H):1(V), 2(H):1(V) y 3(H):1(V). El talud óptimo para la presa Turunturun presenta esta relación 1.5(H):1(V), con los siguientes resultados: Condición estático, tiene como resultado el factor 1.351, que indica estable; en condición pseudoestático se tiene un factor de seguridad 1.164, indicando un factor de seguridad dentro de límite; en condición estacionario se tiene como resultado un factor 1.519, lo cual indica estable, y para condiciones de descenso rápido se tiene un factor de seguridad 1.526, que está dentro de los límites establecidos por CDA (2019). La presa Turunturun está conformada por material enrocado con pantalla impermeable de concreto en el talud aguas arriba y protección con rip rap en el talud aguas abajo, debido principalmente a la falta de una cantera de arcilla para el núcleo impermeable. La importancia de determinar un talud adecuado es garantizar la estabilidad de taludes, reducir el movimiento de material de préstamo y los costos que esto acarrea. El talud optimo aguas abajo y aguas arriba es de 1.5(H):1(V), lo cual ofrece factores de seguridad estables, fue analizado por el método de Morgenstern-Price.

Descriptores: Desembalse rápido, material de préstamo, enrocado, óptimo, condiciones.

Abstract

The objective of this study is to perform slope stability analysis in order to determine the ideal value downstream and upstream of a rockfill dam with a concrete screen, considering the occurrence of a rapid outflow due to a period of drought, water infiltration (stationary), static and pseudo-static conditions. The research design is experimental, the type of research is applicative, the unit of analysis is the Turunturun dam slope. Studies of geology, geomorphology, geodynamics, structural geology, seismic, geophysics, hydrogeology, rock and soil mechanics were carried out in order to characterize the foundation soil and borrow material. Stability analyses have been carried out for the following slope ratios: 1(H):1(V), 1.25(H):1(V), 1.5(H):1(V), 1.75(H):1(V), 2(H):1(V) and 3(H):1(V). The optimal slope for the Turunturun dam is the one that presents this ratio 1.5(H):1(V), with the following results: Static condition results in factor 1.351 which indicates stable, in pseudo-static condition results in safety factor 1.164 which indicates a safety factor within limit, in stationary condition results in factor 1.519 which indicates stable and for rapid descent conditions results in safety factor 1.526, which is within the limits established by CDA (2019). The Turunturun dam is made up of rockfill material with concrete impermeable screen on the upstream slope and rip rap protection on the downstream slope, mainly due to the lack of a clay quarry for the impermeable core. The importance of determining an adequate slope is to ensure slope stability, reduce the movement of borrow material and the costs involved. The optimum downstream and upstream slope is 1.5(H):1(V), which offers stable safety factors analyzed by the Morgenstern-Price method.

Keywords: Quick unloading, loan material, castelcasting, optimal, conditions.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio está ubicada en el sur del Perú, distrito de Cairani, provincia de Candarave-región Tacna, en los sectores regantes de Calacala y la presa Turunturun. La siguiente investigación permitirá definir la pendiente adecuada para la construcción de una Presa de 1.14 MMC de volumen total aproximado para el beneficio de 386.06 ha de terrenos de cultivo perteneciente al Comité de Riego Calacala. Para su elaboración se realizaron estudios especializados a de detalle de ingeniería, como topografía, geología, hidrología, estudios de suelos, canteras y geofísica.

La investigación consiste en determinar los parámetros geotécnicos del material de préstamo del cuerpo de la presa y del terreno de fundación para un mejor análisis de estabilidad de taludes, considerando una ocurrencia de desembalse rápido, producto de un periodo de sequías, infiltración de agua (estacionario), condiciones estáticas y pseudoestáticas.

La presa de enrocado consiste en una masa de roca que ocupa la totalidad del cuerpo de la estructura y puede construirse siempre que, mediante las medidas adecuadas, se produzca una impermeabilidad deseada en el plinto de la estructura; es decir, se realiza con una pantalla de inyecciones (Gandarillas & Gandarillas, 2010) y con pantalla de concreto, que consiste en una losa que le da estanqueidad al vaso de almacenamiento y debe diseñarse para adaptarse a las deformaciones del enrocamiento sin perder su impermeabilidad (Arreguin, 2021).

El análisis de la estabilidad de las masas de suelo es la seguridad de una masa de terreno frente a la rotura y movimiento (Oliva, 2015), los métodos más usados para el análisis estático de estabilidad de taludes son el análisis por equilibrio límite y el análisis esfuerzo-deformación (Sumi, 2018). Como primera medida, es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, la

inclinación apropiada en un corte o en una presa, ya que casi siempre la más apropiada será la más escarpada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse (Matteis, 2003).

Para el presente estudio se ha aplicado el criterio de Morgenstern-Price, este es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite, debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados fraccionando el suelo sobre la superficie terrestre y dividiendo planos (Morgenstern & Price, 1965).

La presa Turunturun está conformada por material enrocado con pantalla impermeable de concreto en el talud aguas arriba y protección con rip rap en el talud aguas abajo (Figura 1). La presa diseñada tiene un talud aguas arriba y un talud aguas abajo con pendiente variable, una pantalla impermeable de concreto armado en el talud aguas arriba de la presa es de 0.3 m de espesor y se extiende hasta el macizo rocoso, atravesando el estrato aluvial gravo-arenoso de aproximadamente 10 a 12 m de espesor.

MÉTODO Y PRUEBAS REALIZADAS

El diseño de investigación fue experimental, asimismo el tipo de investigación aplicativo, empleando como unidad de análisis el talud de presa Turunturun. Se realizaron estudios de geología, geomorfología, geodinámica, geología estructural, sísmica, geofísica, hidrogeología, mecánica de rocas y suelos, todo con la finalidad de caracterizar el terreno de fundación y material de préstamo.

La investigación geotécnica mediante la perforación diamantina, excavación de calicata, ensayos de geofísica y obtención de muestra *in situ*, permite estimar parámetros geotécnicos (ángulo de fricción, cohesión, densidad y permeabilidad), a partir de estos valores se realiza un análisis de estabilidad de talud para determi-

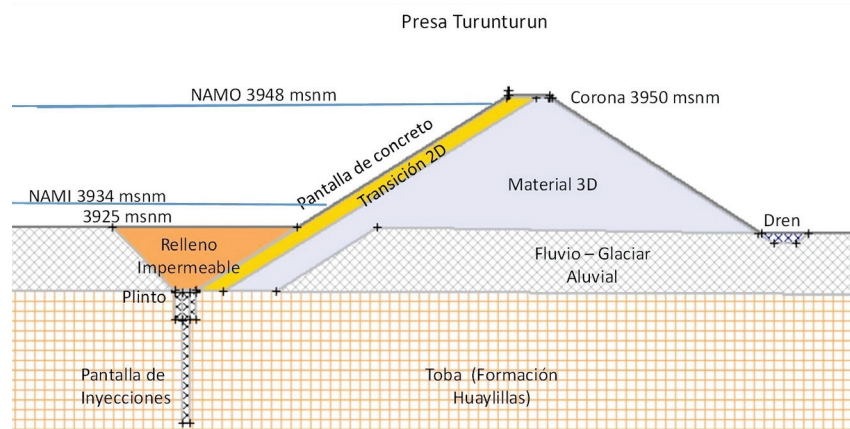


Figura 1. Sección transversal para presa de enrocado con pantalla de concreto.

nar el talud óptimo de la presa de enrocado con pantalla de concreto.

GEOLOGÍA

La geología a detalle del eje de la presa está compuesta de la siguiente manera: El cauce del río se encuentra cubierto por un depósito de material fluvio-glacial y aluvial del cuaternario que, conformado por limos arenosos a limos arcillosos con gravas medianas a gruesas, estos depósitos sobreyacen directamente sobre la formación volcánico Huaylillas (Ts-vhu). El macizo rocoso, al igual que los estribos, está compuesto por toba riolítica color blanco con fenocristales (Figura 2). Los ensayos de permeabilidad realizados (Lugeon) indican que las permeabilidades de la roca están alrededor de 10-4 cm/s. Los índices de calidad de roca (RMR) están entre 35 y 70, lo que indica que es una roca de regular a buena calidad, semi-permeable.

COEFICIENTE SÍSMICO

El coeficiente de aceleración se determinó realizando un análisis de peligro sísmico, aplicando metodologías probabilísticas desarrolladas por Cornell (1968), las aceleraciones de respuesta espectral del Sismo Base de Operación (OBE) por el método probabilístico, representadas en un espectro de respuesta con 5 % de amortiguamiento crítico determinado para un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años de período de exposición o vida útil, es decir, para un período de retorno de 475 años. De esta forma, la estimación de la aceleración horizontal máxima en el terreno (PGA) para el OBE correspondería al valor de la ordenada espectral con período $T = 0.00$ s, $PGA = 0.38$ (g) para un periodo de retorno de 475 años. Para el diseño de presas se han considerado coeficientes sísmicos 1/2 de la acele-

ración horizontal máxima de diseño (PGA), teniendo como resultado $PGA/2 = 0.19$ (SENCICO, 2016).

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Las propiedades geotécnicas de los materiales del suelo de fundación, corona, cuerpo de la presa y enrocado han sido obtenidas mediante ensayos de laboratorio tales como: Ensayos de análisis granulométrico, límite de consistencia, contenido de humedad, triaxial (CD), compresión uniaxial, densidad máxima y mínima. Bajo ensayo de campo se han realizado: Ensayo densidad in situ, ensayo de lugeon y ensayo de lefranc.

Los materiales de la presa presentan las siguientes características: El material de relleno común (Zona 3D) está conformado por grava mal gradada (GP) con tamaño máximo de 12" forma sub angulosa a angulosa, el material de transición 2D está conformado por arena limosa (SM) con tamaño máximo 3", el material de relleno impermeable está integrado por arena limosa (SM) con tamaño máximo 1", el material de enrocado (Rip Rap) para la protección que proviene de la cantera roca con forma angulosa y resistente, el material de Dren está compuesto por grava mal gradada (GP) y el material fluvio glacial mezclado por arenas limosas (SM) con presencia de material piro clástico compuesta con tobas volcánicas (Tabla 1), material toba (formación Huaylillas) es macizo rocoso (Tabla 2).

La resistencia del concreto es de 280 kg/cm^2 , con un peso específico de 24 kN/m^3 . La permeabilidad es de orden de 10-11 m/s (Villalaz, 2004), que significa que es un material impermeable.

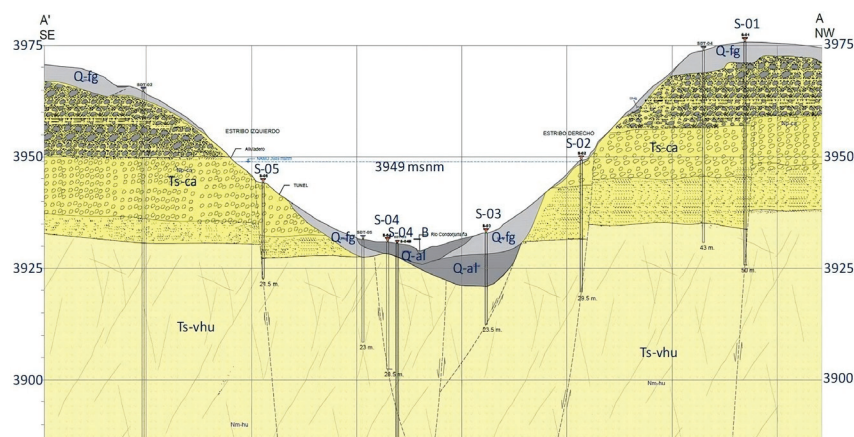


Figura 2. Geología de la sección del eje de la presa.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos del material de la presa.

Descripción	Densidad Kn/m ³	Cohesión Mpa	Ángulo de fricción	Permeabilidad m/s
Material Relleno Común (zona 3D)	20.8	0	42	0.017407
Material de Transición (zona 2D)	17.69	0	30.8	0.0000652
Material de Relleno Impermeable	13.033	0	29.6	0.0000163
Material de enrocado de protección (Rip Rap)	25.89	0	44.5	1
Material de Fluvio-Glaciario (Aluvial)	13.09	0	27.51	0.0000269
Material Dren	19.96	0	31.7	0.0001

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de macizo rocoso.

Material	Modelo	γ (Kn/m ³)	UCS (Mpa)	GSI	mi	D
Ignimbrita	Hok-Brown Generalizado	23.270	27.15	53	13	0.7

RESULTADOS

Se realizó un análisis de estabilidad de talud, aguas abajo y aguas arriba de la presa Turunturun con las siguientes condiciones: Estático, pseudoestático, estático con filtración de agua y descenso rápido (Figura 3), empleando software Slide 6.0. La Tabla 3 muestra los resultados de factor de seguridad obtenidos a partir de análisis de estabilidad de talud para las siguientes relaciones: 1(H):1(V), 1.25(H):1(V), 1.5(H):1(V), 1.75(H):1(V), 2(H):1(V), 3(H):1(V).

El talud óptimo para la presa Turunturun es de 1.5(H):1(V) debido a que los valores obtenidos a partir del análisis de estabilidad talud son estables de acuerdo con el criterio establecido en CDA (2019) (Tabla 4), con los siguientes resultados: En la condición estático se tiene como resultado el factor 1.351; en condición pseudoestático se tiene el factor de seguridad 1.164; la condición estacionarios tiene como resultado el factor 1.519 y para condiciones de descenso rápido un factor de seguridad de 1.526.

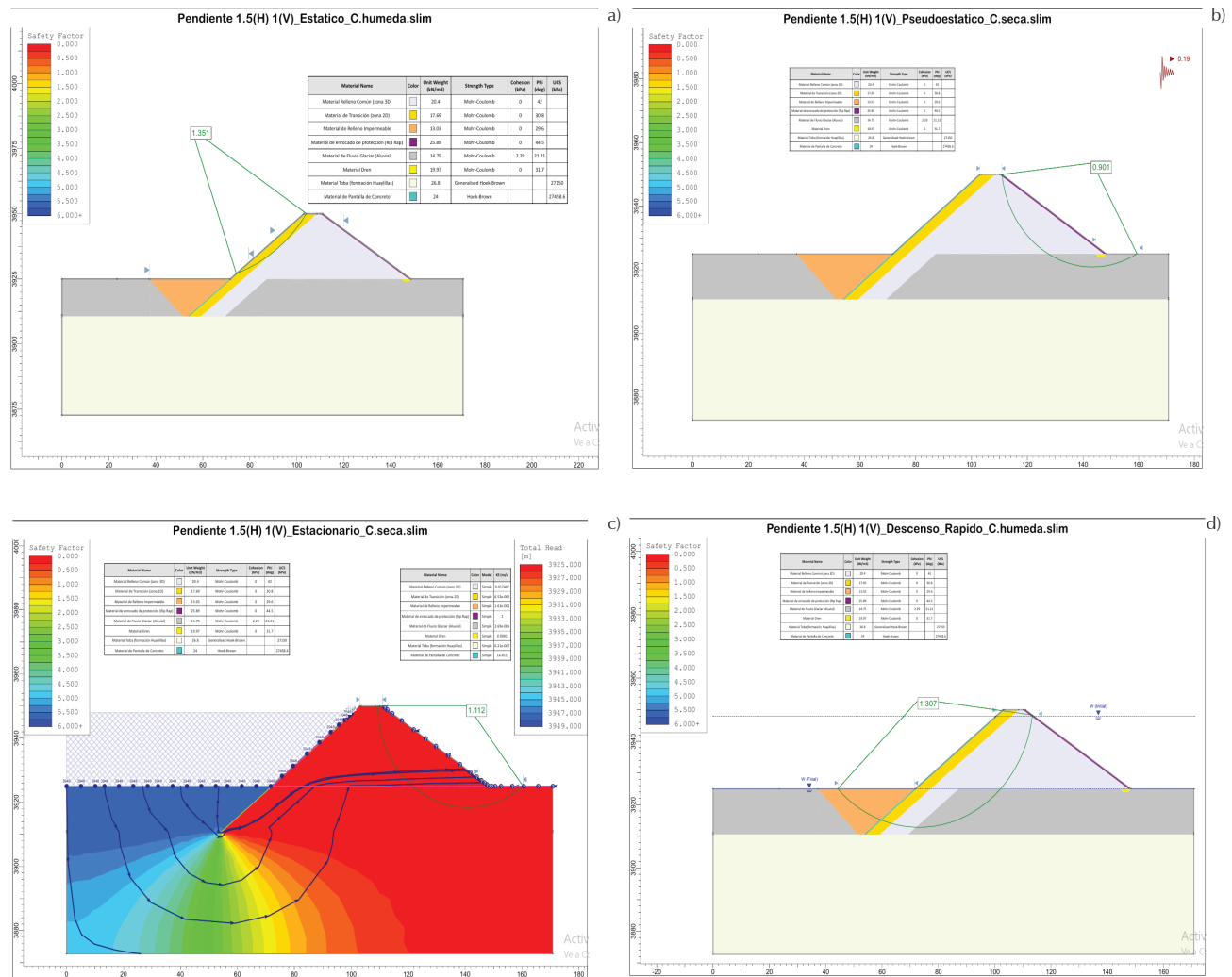


Figura 3. Análisis de estabilidad de talud (1.5:1) en siguientes condiciones: a) Estáticas, b) Pseudostático, c) Estacionario y d) Descenso rápido de embalse.

Tabla 3. Resultados de análisis de estabilidad de talud de la presa.

Relación de Talud	Condición	Cara	FS min	FS	Talud
Talud 1 (H): 1 (V)	Estático	Cara seca	1.3	1.349	Estable
		Cara húmeda	1.3	1.126	Inestable
	Pseudoestático	Cara seca	1	1.031	Estable
		Cara húmeda	1	0.862	Inestable
	Estacionario	Cara seca	1.5	1.328	Inestable
	Descenso rápido	Cara húmeda	1.3	1.164	Inestable
Talud 1.25 (H): 1 (V)	Estático	Cara seca	1.3	1.486	Inestable
		Cara húmeda	1.3	1.344	Estable
	Pseudoestático	Cara seca	1	1.075	Estable
		Cara húmeda	1	1.065	Estable
	Estacionario	Cara seca	1.5	1.406	Inestable
	Descenso rápido	Cara húmeda	1.3	1.492	Estable
Talud 1.5 (H): 1 (V)	Estático	Cara seca	1.3	1.679	Estable
		Cara húmeda	1.3	1.351	Estable
	Pseudoestático	Cara seca	1	1.197	Estable
		Cara húmeda	1	1.164	Estable
	Estacionario	Cara seca	1.5	1.519	Estable
	Descenso rápido	Cara húmeda	1.3	1.526	Estable
Talud 1.75 (H): 1 (V)	Estático	Cara seca	1.3	1.81	Estable
		Cara húmeda	1.3	1.891	Estable
	Pseudoestático	Cara seca	1	1.269	Estable
		Cara húmeda	1	1.308	Estable
	Estacionario	Cara seca	1.5	1.575	Estable
	Descenso rápido	Cara húmeda	1.3	1.674	Estable
Talud 2 (H): 1 (V)	Estático	Cara seca	1.3	1.93	Estable
		Cara húmeda	1.3	2.114	Estable
	Pseudoestático	Cara seca	1	1.316	Estable
		Cara húmeda	1	1.414	Estable
	Estacionario	Cara seca	1.5	1.692	Estable
	Descenso rápido	Cara húmeda	1.3	1.763	Estable
Talud 3 (H): 1 (V)	Estático	Cara seca	1.3	2.409	Estable
		Cara húmeda	1.3	2.523	Estable
	Pseudoestático	Cara seca	1	1.505	Estable
		Cara húmeda	1	1.558	Estable
	Estacionario	Cara seca	1.5	1.841	Estable
	Descenso rápido	Cara húmeda	1.3	1.975	Estable

ANÁLISIS Y DISCUSIONES

En el análisis de estabilidad de la presa Turunturun se han definido algunas probables superficies de deslizamiento con los materiales próximos al equilibrio límite, siguiendo el comportamiento de resistencia al corte basado en la envolvente de falla de Mohr-Coulomb. No se han considerado las superficies próximas al talud, por no ser reales y por no involucrar la estabilidad integral del cuerpo de la presa.

En el análisis de estabilidad se realizó el método Morgenstern-Price, que asume superficies de falla circulares. Los materiales que intervienen directamente en la estabilidad de la presa son: Relleno común (zona 3D), zona de transición (2D), pantalla de concreto, rip rap, depósito fluvio-glaciar y una cimentación rocosa volcánica muy compacta.

Se analizaron las condiciones de la presa de enrocado al final de la construcción para ambos taludes (cara seca y cara húmeda) considerando esfuerzos totales en los taludes del enrocado. En el diseño se trata de seleccionar la mejor pendiente de talud y material de préstamo para el cuerpo de la presa, el cual cumpla con las condiciones básicas de la mecánica de suelos: Resistencia, permeabilidad y compresibilidad.

Se analizó la estabilidad de talud de la presa Turunturun con diferentes relaciones de talud: 1(H):1(V), 1.25(H):1(V), 1.5(H):1(V), 1.75(H):1(V), 2(H):1(V), 3(H):1(V).

Se evaluó la estabilidad de la presa para las condiciones estáticas, pseudo-estáticas, infiltración constante durante la operación con el nivel máximo de aguas ordinarias NAMO y descenso rápido de embalse. Al ser una presa de enrocado, las propiedades de los materiales estarán representadas por esfuerzos efectivos (drenados).

Todos los resultados del análisis de estabilidad de talud de la presa se reducen a que el factor de seguri-

dad debe ser mayor que un factor mínimo recomendable de diseño. Se entiende que el factor de seguridad está definido como la relación existente entre el momento resistente de las fuerzas que se oponen al deslizamiento y el momento actuante de las fuerzas que propician el movimiento. Los factores de seguridad mínimos recomendados por el Boletín Técnico Aplicación de las Directrices de Seguridad de Represas CDA (2019) se presentan en la Tabla 4. Para la condición estática el factor de seguridad debe ser mayor de 1.3, para la condición pseudo-estática (sismo) debe ser mayor que 1, para las condiciones de filtraciones constantes (estaciones) debe ser mayor de 1.5 y descenso rápido debe ser mayor que 1.3.

Tabla 4. Valores mínimos de factor de seguridad.

Núm.	Condición de análisis	Factor de seguridad mínimo	Talud
1	Estático	1.3	Cara húmeda y seca
2	Pseudoestático	1	Cara húmeda y seca
3	Filtraciones en estado estacionario (Estático)	1.5	Cara seca
4	Descenso repentino (Estático)	1.3	Cara húmeda

Fuente: CDA (2019).

En la Figura 4 y Tabla 3 se muestra el resultado obtenido de análisis de estabilidad de talud de la presa en condiciones estáticas para cara húmeda (C.H.) y cara seca (C.S.). Se considera un talud estable por los resultados de factor de seguridad superiores a 1.3, la relación de pendiente inicial (1:1) en cara húmeda se considera inestable debido que los resultados de facto-

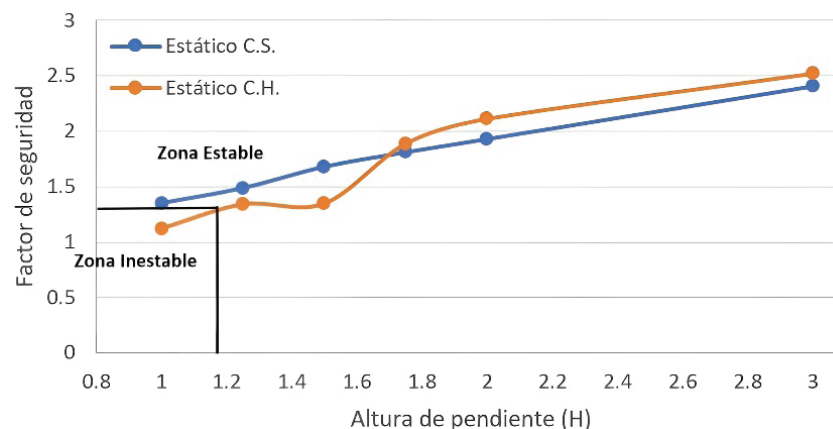


Figura 4. Factor de seguridad respecto a la relación de talud de presa Turunturun en condiciones estáticas.

res de seguridad son menores a los estándares y pendiente fuerte, el factor de seguridad estático aumenta gradualmente a medida que la relación de talud aumenta. Para condiciones estáticas, la estabilidad talud cara húmeda y seca oscila entre 1.25:1 a 3:1 (H:V).

El análisis dinámico (condiciones Pseudoestático) se ha realizado en cara seca (C.S.) y cara humedad (C.H.), considerando varias relaciones de talud (pendiente), considerando coeficiente sísmico horizontal (k_h) de 0.19. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

El resultado obtenido del análisis de estabilidad de talud en condiciones pseudoestático se observa en la Figura 5, se consideran estables aquellos resultados donde el factor de seguridad sea mayor a 1 (Tabla 4), la primera relación de talud (1:1) de cara húmeda es la más desfavorable, debido a que el factor de seguridad dinámico es menor que 1, este resultado se esperaba, debido a que en condición estática no resultaban estables.

No obstante, para un mismo valor de coeficiente sísmico horizontal, a medida que aumenta la relación de los taludes en cara seca y húmeda, aumentan los factores de seguridad. Los taludes de la presa son estables a partir de esta relación de talud: 1.25 (H): 1(V).

El análisis de filtración se utiliza para la determinación de la infiltración generada sobre el talud de presa Turunturun, considerando un modelo con una carga hidráulica vinculada con el Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO).

Los procesos de infiltración incontrolados pueden dar lugar a una serie de problemas, entre los que se incluyen las eyecciones de arena y las altas presiones de agua bajo (cara seca). En particular, cada uno de los fenómenos mencionados altera el equilibrio interno de los componentes de la presa (altas presiones hidráulicas), lo que da lugar a canales o grietas (eyecciones de arena), que pueden convertirse en posibles planos de fallas, el arrastre de materiales internos y la aparición

de espacios vacíos (tubos), lo cual podría provocar el colapso de la presa. Este fenómeno es poco probable debido a que la presa está conformada por material de gran tamaño, sin embargo, si presentara presiones hidráulicas debido a la carga hidráulica, dependiendo de la inclinación de talud podría fallar.

Los análisis de estabilidad de los taludes en cara seca y en condiciones estacionarias (infiltración de agua) en la presa de Turunturun es estable para los resultados de factor de seguridad mayores a 1.5 (Tablas 3 y 4). Las relaciones iniciales de los taludes, 1:1 y 1.25:1, presentan factores de seguridad inferior a 1.5, por lo que se considera inestable debido a presiones de carga hidráulica y pendiente de talud. En cambio, las relaciones de talud 1.5:1 a 3:1 demuestran estabilidad en condiciones estacionarias, donde el factor de seguridad estacionario aumenta gradualmente a medida que aumenta la relación de talud (Figura 6).

En condiciones de descenso rápido cae el nivel del agua fuera de una pendiente, de esa manera se pierde la influencia estabilizadora de la presión del agua en dicha pendiente, donde si el nivel del agua baja rápidamente, las presiones intersticiales dentro del talud no tienen tiempo a cambio en el equilibrio con la caída del nivel del agua exterior, la pendiente se hace menos estable (Duncan *et al.*, 1991).

En la Figura 7 se ilustra el análisis de estabilidad de talud en condiciones de descenso rápido para cara húmeda de la presa, los resultados de factores de seguridad mayores a 1.3 son estables (Tabla 3), la primera relación de talud (1:1) se considera inestable debido a que no cumple con los estándares de factor de seguridad. A partir de la relación de talud (1.25:1) el factor de seguridad aumenta gradualmente.

Para el análisis de estabilidad de talud en condiciones descenso rápido de la presa Turunturun, la estabilidad se manifiesta a partir de la relación de talud 1.25:1 hasta 3:1 (H:V).

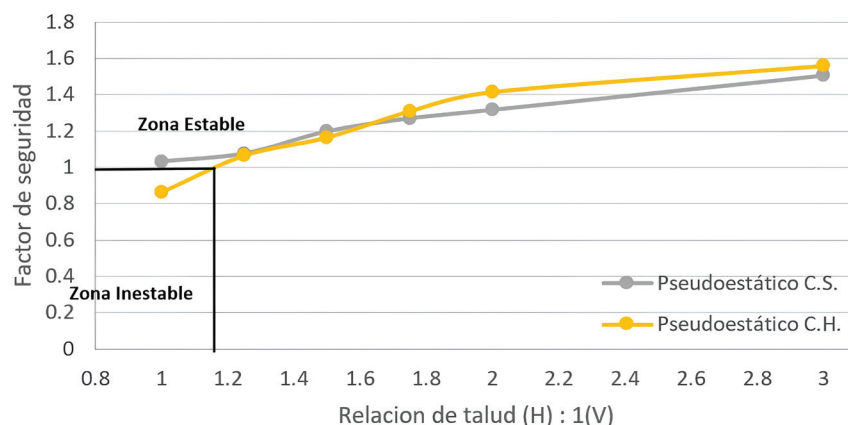


Figura 5. Factor de seguridad respecto a la pendiente de talud de presa Turunturun en condiciones Pseudoestáticas.

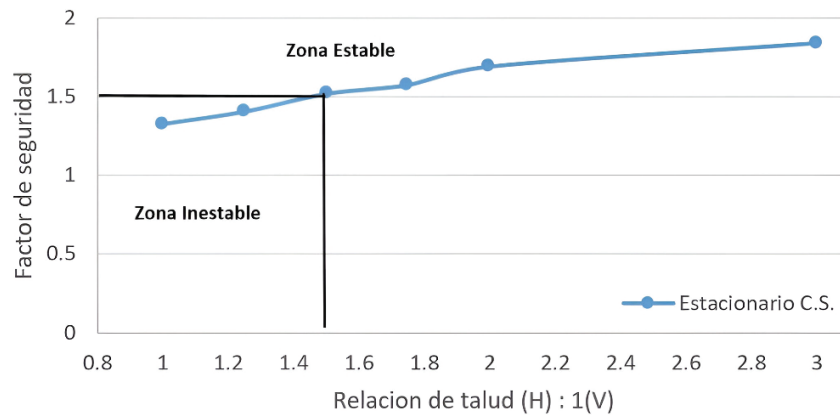


Figura 6. Factor de seguridad respecto a la pendiente de talud de presa Turunturun en condiciones estacionarias.

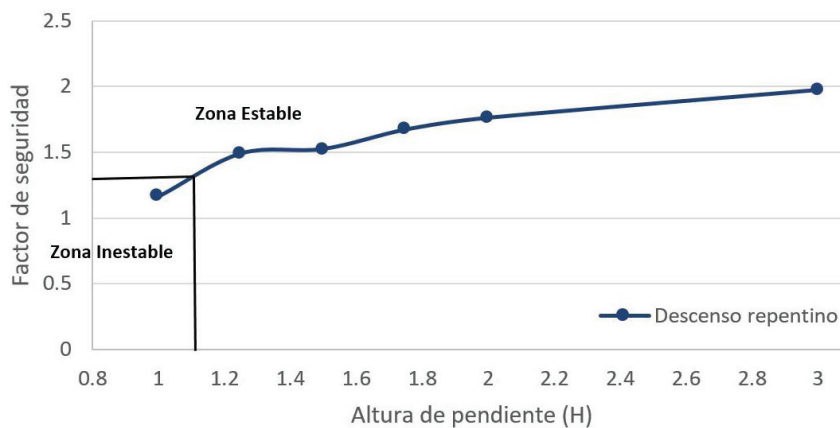


Figura 7. Factor de seguridad respecto a la pendiente de talud de presa Turunturun en condiciones estáticas, cuando ocurre descenso repentino.

El resultado del análisis de estabilidad de talud de la presa Turunturun para diferentes relaciones de taludes (pendiente), presentada en la Tabla 3, se compara con los factores de seguridad mínimos que se deben cumplir de acuerdo con el Boletín Técnico Aplicación de las Directrices de Seguridad de Represas CDA (Tabla 4). Como se observa, los factores de seguridad obtenidos están por encima de los mínimos recomendados a partir de la relación de talud 1.5(H):1.0(V).

CONCLUSIONES

1. Se realizó un análisis de estabilidad para las siguientes relaciones de talud: 1(H):1(V), 1.25(H):1(V), 1.5(H):1(V), 1.75(H):1(V), 2(H):1(V) y 3(H):1(V). El talud óptimo aguas abajo y aguas arriba es de 1.5(H):1(V), que ofrece factores de seguridad estables en condiciones estáticas, pseudoestático, estacionario y descenso rápido. Para este análisis se aplicó el método de Morgenstern-Price que asume superficies de falla circulares.
2. En condiciones de descenso rápido, cuando cae el nivel del agua fuera de una pendiente, se pierde la

influencia estabilizadora de la presión del agua en la pendiente.

3. Los procesos de filtración que no son controlados residen en altas presiones relaciones de talud: 1(H):1(V), 1.25(H), la permeabilidad de los materiales de préstamo influye en la estabilidad de talud en condiciones estacionarias.

REFERENCIAS

- Arreguin, F. (2021). *Obras Hidráulicas*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CDA. (2019). *Application of dam safety guidelines to mining dams*. Canada: Canadian Dam Association.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Duncan, J., Wright, S., & Wong, K. (1991). *Slope Stability During Rapid Drawdown*.
- Gandarillas, H., & Gandarillas, L. (2010). *Enfoque de diseño de presas de enrocado con membrana impermeable*. Bolivia: Universidad Privada Boliviana.
- Matteis, A. (2003). *Estabilidad de Taludes*. 4.

- Morgenstern, N., & Price, V. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
- SENCICO. (2016). *Actualización del Programa de Cómputo orientado a la Determinación del Peligro Sísmico en el País*. Lima, Perú.
- Sumi, E. (2018). *Análisis de estabilidad de una presa de enrocado de gran altura con pantalla de concreto*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Oliva, A. (2015). *Análisis de la estabilidad y laderas*. España: Grupo ITEICO Euroamericano.
- Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limosa Noriega Editores.

How to cite:

Aro-Aro, R., & Pino-Vargas, E. (2025). Determinación del talud de una presa de enrocado con pantalla de concreto a partir de análisis de estabilidad. Distrito de Cairani, Candarave, Tacna. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(04), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.4.027>