



Valoración de la estructura y resistencia de la represa La Laguna

Assessment of La Laguna dam structure and strength

^aHenry de Jesús Gallardo-Pérez, ^bMawency Vergel-Ortega, ^cJhan Piero Rojas-Suárez

 aDoctor en Educación, henrygallardo@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4377-3903>

 bPosdoctora en Investigación en Ciencias Sociales, Niñez y Juventud, mawencyvergel@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8285-2968>

 cMagister en Ingeniería Civil, jhanpiorojas@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2682-9880>

Recibido: Julio 23 de 2019 Aceptado: Noviembre 12 de 2019.

Forma de citar: H.de Jesús Gallardo-Pérez, M. Vergel-Ortega, J.P. Rojas-Suárez, “Valoración de la estructura y resistencia de la represa La Laguna”, *Mundo Fesc* vol. 10, s1, pp. 254-263, 2020

Resumen

El embalse conocido como la Laguna de Zulalá, cuya ubicación geográfica N7 17.224 W72.38.220 en la vereda Mata de Lata del municipio de Cacota- Norte de Santander, región del páramo de Santurbán, se considera extraño por cuanto en esta zona montañosa casi toda el agua desciende instantáneamente debido a la verticalidad del terreno. La represa de la laguna tiene forma trapezoidal con medidas de 12 metros a lo largo de la parte superior de la laguna, 5 metros de alto y 8 metros en su base. Allí nace la quebrada La Laguna que desemboca en el río Cacota y de ella depende el recurso hídrico del municipio mediante una red hídrica que se forma en la Vereda Mata de Lata. Problema: actualmente se observa corrosión en la estructura del muro de la represa, lo cual conlleva a la determinación de la resistencia que posee la represa frente a esa presión hidrostática con el fin de proponer tipo y lineamientos para mantenimientos periódicos con el propósito de prevenir la formación de grietas y posibles filtraciones, así como demás deterioros que con el tiempo se puedan presentar en la represa. Metodología: la investigación, de tipo cuantitativo descriptivo, consistió en cálculo de la presión que ejerce el agua sobre la represa, su estado actual, para ello se realizaron inspecciones, toma de datos y simulaciones utilizando elementos finitos. Resultados: Se encuentra que la represa resiste una fuerza ejercida por la presión del agua de 116 mil kgf, presenta un deterioro del 8% en su capa superficial y aun cuando visualmente no hay evidencia de presencia de grietas, se evidencia filtración de agua que puede afectar su estabilidad, se encuentra deficiencia de resistencia, variabilidad aceptable de la estructura del suelo y una deformación máxima calculada del orden 7 cm en el centro de la corona que puede asociarse al agrietamiento superficial reportado.

Palabras clave: Presión hidrostática, elementos finitos, resistencia, análisis probabilístico.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: henrygallardo@ufps.edu.co



Abstract

The reservoir known as the Zulalá Lagoon, is one of the major tourist attractions of the municipality of Cacota, located in the department of Norte de Santander, in the region of the Santurbán paramo, it is considered strange because in this mountainous area almost all the water descends instantaneously due to the verticality of the terrain. The lagoon's dam is trapezoidal in shape and measures 12 meters along the top of the lagoon, 5 meters high and 8 meters at its base. This is the source of La Laguna Creek, which flows into the Cacota River, and the municipality's water resources depend on it through a water network formed in the Mata de Lata Village. Problem: Corrosion is currently observed in the structure of the dam wall, which leads to the determination of the dam's resistance to hydrostatic pressure in order to propose types and guidelines for periodic maintenance with the purpose of preventing the formation of cracks and possible leaks, as well as other deterioration that may occur in the dam over time. Methodology: the research, of a descriptive quantitative type, consisted of calculating the pressure exerted by the water on the dam, its current state, for which inspections, data collection and simulations using finite elements were carried out. Results: It is found that the dam resists a force exerted by water pressure of 116 thousand kgf, presents a deterioration of 8% in its surface layer and even though visually there is no evidence of cracks, there is evidence of water filtration that may affect its stability, there is a deficiency of resistance, acceptable variability of the soil structure and a maximum deformation calculated in the order of 7 cm in the center of the crown that may be associated to the surface cracking reported.

Keywords: hydrostatic pressure, finite elements, strength, probabilistic analysis.

Introducción

El municipio de Cécota - Norte de Santander-Colombia, forma parte del páramo de Santurbán [1], tiene una extensión de 139 Mm², altitud 2500 msnm, temperatura promedio 3 a 8 grados centígrados. Cuenta con una población de 2513 habitantes y basa su economía en la agricultura [2].

Un atractivo natural del municipio es la laguna del Cacique, también conocida como Laguna de Zulalá, se encuentra ubicada a 2900 metros sobre el nivel del mar, está rodeada por terrenos inclinados bastante húmedos que poseen vegetación propia de paramo, resalta la presencia de frailejones. Con el fin de incrementar el embalse de la laguna y favorecer el turismo, se construyó un dique de canal con sección rectangular en concreto reforzado que regula el caudal, represa el agua y la deja pasar a través de un vertedero de rebose.

La investigación se centra en describir la presión que soporta el dique y realizar una valoración del muro puesto que la presencia de filtraciones de agua compromete su estabilidad y por ende la seguridad el municipio, toda vez que de ella se desprende

la quebrada La Laguna, fuente hídrica de la población, además de bordear los límites del casco urbano.

En esta área se encuentran trabajos realizados con referencia a optimización numérica [3,4] y la aplicación de elementos finitos en el análisis estructural y dinámico de embalses considerando que la deformación del muro de la represa es directamente proporcional a las cargas aplicadas [5] y la aplicación del método de Tanteos bidimensional (coeficiente de seguridad) para el diseño de la presa [6]; ello conlleva a que la presente investigación pueda considerarse como pilar y de gran aporte a la aplicación de conceptos propios de la matemática y la física en el campo de la utilización de elementos finitos para la valoración de resistencia y estado estructural de presas y embalses.

Para hacer un acercamiento al estado actual del muro de la presa se ha hecho una simulación con elementos finitos [7] usando el programa SAP2000 (CSI, Computers and Structures Inc.).

Método

Descripción del proceso

El proceso se realiza de la siguiente manera: Con base en la información preliminar obtenida del dique de la Laguna del Cacique, se realiza simulación utilizando elementos finitos [8,9]. Las fases incluyeron: (a) Ubicar área y seleccionar secciones, se incluye muro de contención de la represa y el sector aledaño, (b) Caracterizar el suelo, con valoración dentro de la laguna y posterior a la represa, (c) Exploración de suelos y muestreo, (d) Ensayos (e) Valoración del contenido de humedad y (f) analizar granulometría [10,11]. El proceso implica seleccionar recolección de muestra para ensayo con especímenes representativos (>100 g), se determina el peso de cada uno con el contenedor, el contenedor se lleva al horno a 110 °C durante doce horas, posteriormente se retira del horno, dejar enfriar y se pesa de nuevo. El contenido de humedad se establece mediante la relación entre el peso con agua y el peso seco de cada espécimen. Los equipos se ajustan de forma tal que la tolerancia sea inferior al 5% en temperatura y a ,05% en peso, se utilizaron contenedores metálicos que resisten la corrosión y son tolerantes a cambios en temperatura.

Juego de tamices

Ensayos de humedad: se separan aproximadamente 300 gr de suelo de cada calicata, en ensayos de granulometría por tamizado se emplearon 3 kilogramos en dos bandejas. Se realiza lavado de muestras con mezcla de detergente y agua, se realiza secado colocando en horno a 110°C por 24h. finalmente, calculado contenido de humedad de ambas muestras, se tamiza. [12,13]

Clasificación del suelo

Para la clasificación del suelo, se realizó ensayo de Límites de Atterberg [14,15] definido según norma ASTM D4318 [16]. donde límites de consistencia líquido

(LL o cantidad de agua en el suelo entre estados semilíquido y plástico) y, plástico (LP o contenido de agua que hay entre los estados plástico y semisólido), muestran la probabilidad de deformación del suelo. El límite se determina mediante la Copa de Casagrande [17]. El valor LP por moldeo de muestra en bastones se realizó según norma ASTM D4318 [16]. Una vez procesada la muestra en el tamiz, la muestra se divide en dos y se moldea en la Copa de Casagrande, ejecutando tres ensayos y al rodar en un cilindro de diámetro 3.2 mm, una porción de suelo [17].

Se separan cuatro muestras tomadas del suelo de Laguna, previo molido de ensayo de contenido de humedad, y se saturan para obtener el conteo de golpes de 15, 24, 36 y 45 [13]. Una vez mezclado suelo con agua, se moldea [13]. La muestra se divide en dos con ayuda del ranurador metálico. Se continúa hasta que la ranura se cierre en 13 mm. La muestra obtenida con esta abertura es lleva para secado al horno con temperatura de 110° durante 12 horas y así determinar la humedad del ensayo [13,18].

Ensayo de corte

Realizado según norma ASTM D3080 [16] con el objeto de conocer los parámetros de resistencia al corte [14,19]. El proceso implica: a) rellenar el picnómetro con capacidad de 250 ml con 100 g de suelo y agua, b) se hierve el picnómetro en una hornilla hasta el punto de ebullición para eliminar los vacíos, c) verter el contenido del picnómetro y se expone al horno durante la noche, d) se determina el peso seco.

Ensayo de densidad

Acorde a norma ASTM D3080 [16], aplicada al ensayo de densidad [17]: se separa una parte de la muestra de suelo, se rellena el cono, se aprisiona en tres capas con 25 golpes verticalmente para compactar. A través de análisis de densidad relativa utilizando

la mesa vibratoria se determina tipología de la falla del suelo. Consideraciones generales incluyen sin inclinación (talud por encima de muro horizontal), aceleración sísmica de 4.2 m/s², componente Horizontal de 0.5, componente vertical de 0.5, sobrecarga mínima 20 kPa, se desprecia el empuje pasivo del suelo, se considera valores iguales para ángulo de fricción interno, cohesión y peso específico [17]. Las series de Taylor y modelo de Duncan son utilizadas para analizar acorde a cada parámetro de suelo [11,20-22].

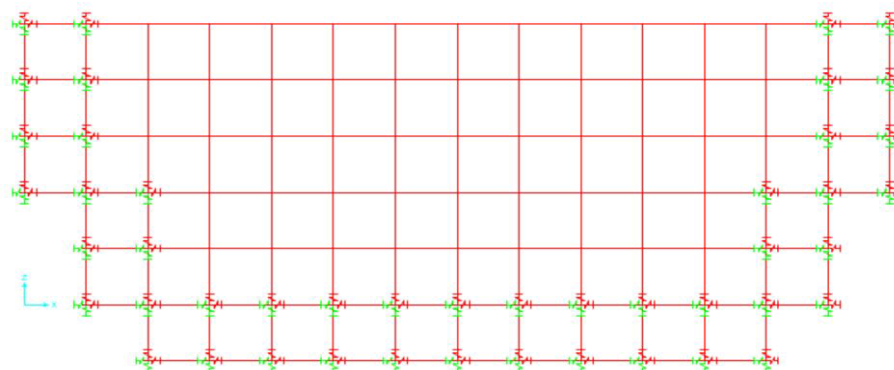


Figura 1. Vista principal mostrando cascarones básicos de 1.00mx1.00m y resortes asignados en bordes simulando suelo y roca

Aplicación de elementos finitos

Aproximaciones sucesivas definidas por el método numérico y análisis de puntos nodales permiten resolver ecuaciones o alcanzar buena precisión, la malla se construye mostrando cascarones básicos de un metro cuadrado de precisión (se pueden apreciar en la Figura 1) así se tiene más precisión en los resultados del análisis. Se discretizó el dominio, se obtuvieron áreas conectadas entre sí, generando matrices de relaciones y sistema de ecuaciones.

Resultados

Análisis por secciones en lado izquierdo en alturas de 4.66m, 4 m con el fin de realizar un modelado preliminar del muro, se incluyen los siguientes datos de entrada:

- Peso unitario del agua: 10 a 10.30 KN/m³ dependiendo de la profundidad por materia sólida suspendida en capas cercanas al fondo
- Muro de concreto reforzado incrustado parcialmente en tierra (zona superior) y parcialmente en roca (zona inferior)
- Dimensiones del muro: Largo de corona

expuesto = 7 m, altura libre visible = 5 m, ancho de base visible = 5 m, forma general aproximada a un trapecio

- Geometría de secciones del muro estimadas: Inicia con espesor de 50 cm en la base y decrece el espesor uniformemente en la corona
- Material del muro: Concreto reforzado
- Vida útil de diseño ideal = 50 años
- Grado de deterioro superficial visible = Incipiente, por verificar con ensayos de patología y estudio formal de vulnerabilidad estructural
- Modelado del sistema: Cascarón con peso propio en el plano y fuerzas de empuje hidrostático perpendiculares al plano. Plano vertical con espesor variable según descripción previa. Restricciones en bordes verticales y horizontal inferior modeladas por resortes de rigidez asociada a la calidad del suelo y la roca de soporte.

Los resultados de las pruebas realizadas se describen a continuación:

Curva Granulométrica, en la muestra se encontró contenido de humedad de 10.75, porcentaje de finos: 42%, porcentaje de gruesos: 58%. Clasificación SUCS: SP-SM, para calicata 2 se encontró contenido de humedad: 6.75, porcentaje de finos: 17.06, porcentaje de gruesos: 82.94%(Tabla 1).

Tabla 1, parámetros de resistencia

Parámetros	Laboratorio	EDI
Ángulo de fricción interno	34,52°	35,03°
Cohesión	0 kPa	0 kPa
Módulo - Elasticidad	643,207 kgf/cm ²	643,207 kgf/cm ²
Módulo - Poisson	0,328	
Peso Específico	16,91 kN/m ³	18,95 kN/m ³
Densidad Relativa	89,50%	

La calicata presenta mayor cantidad de agregado grueso conformado por arenas con un 80% del total En calicata 2 el porcentaje de arena es 60%; cantidad de finos respecto a la C-2, es mayor, indicando estrato del suelo no uniforme. La tabla 2, resume las estadísticas del muro de contención, resultados obtenidos con muestras tomadas a diferentes alturas y en diferentes condiciones geológicas.

Tabla 2. Estadísticas muro

	H=4m	H=4m ante el volteo	H=6.66m	H=4.66 ante el deslizami ento	H=4.66 ante el volteo	H=4.66 ante la capacidad portante
S estática	0,275	0,3687	5,357	0,387	0,288	5,98
CV estático	10%	11%	70%	11%	7%	45%
S dinámica	0,5416	0,1436	2,02	0,13	0,35	2,13
CV dinámico	9%	7%	85%	8%	22%	50%
Probabilidad falla estática	0,0%	0,0%	1,2%	0,0%	0,0%	1,0%
Probabilidad falla dinámica	4%	0,02%	2,7%	0,02%	5%	3,0%
Confiabilidad estática	100%	100%	97%	100%	100%	98%
Confiabilidad dinámica	95%	99,98%	95%	99,98%	95%	95%

El Análisis de estabilidad para altura de 4m muestra un factor de seguridad de deslizamiento con 3.4 para análisis estático y 1.4 para análisis dinámico; y un factor de seguridad de volteo de 4 para análisis estático y 1.8 para análisis dinámico, obteniendo un factor de seguridad de capacidad de carga de 7.4 para análisis estático y 3.2 para análisis dinámico. En la tabla 3 se presenta el análisis estadístico según el método de Duncan.

Tabla 3. Análisis Probabilístico de Duncan

	H=4m	H=4m para volteo	H=4,66 para deslizamiento	H=4,66m para volteo
S estática	0,2105	0,07	0,315	0,3
Coefficiente V estático	5%	1%	7%	5%
S dinámica	0.13	0,13	0,13	0,03
Coefficiente varia- ción dinámico	5%	2%	7%	2%
Probabilidad falla estática	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Probabilidad falla dinámica	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Confiabilidad estática	100%	100%	100%	100%
Confiabilidad dinámica	100%	100%	100%	100%

La confiabilidad de la capacidad portante para la capacidad de carga en 4 m y 4,66m se presenta en la tabla 4

Tabla 4. Confiabilidad de la Capacidad Portante

	H=4m	H=4.66m
S estática	3,2	4
CV estático	4%	5%
S dinámica	1,15	1,75
Coefficiente dinámico	4%	4%
Probabilidad falla estática	0,0%	0,0%
Probabilidad falla dinámica	0,0%	0,0%
Confiabilidad estática	100%	100%
Confiabilidad dinámica	100%	100%

El índice de confianza estático para muro a alturas de H=4m y 4,66m en deslizamiento se presenta en la tabla 5

Tabla 5. Índice de Confianza

	IC Estático		IC Dinámico	
	H=4m	H=4.66m	H=4m	H=4.66m
Deslizamiento	10,3	1,5	6,5	7,9
Volteo	30,2	4,2	28,5	5,5
Capacidad portante	2,7	2,8	1,95	1,75

En condición estática, a una altura de 4m, la confiabilidad con mayor criticidad fue de 94% (Capacidad de Carga según Weibull), en condiciones dinámicas, el punto crítico se da al 93%.

En condición dinámica, la confiabilidad decrece y la probabilidad de falla es mayor con respecto a las condiciones estáticas decreciendo el factor de seguridad. A una altura de 4.66 m confiabilidad crítica, en condiciones estáticas, equivale al 95%, mientras que, en condiciones dinámicas, el valor crítico es de 93% (Deslizamiento). Se observa que, a medida que la altura del muro incrementa, la confiabilidad disminuye tanto para condiciones estáticas como para condiciones dinámicas, así mismo a medida que avanza el Factor de Seguridad Estático es mayor que el Dinámico.

En la figura 2 se presenta la vista tridimensional de la simulación del muro realizado con SAP2000 (CSI, Computers and Structures Inc.). Modelado del sistema: Cascarón con peso propio en el plano y fuerzas de empuje hidrostático perpendiculares al plano. Plano vertical con espesor variable según descripción previa. Restricciones en bordes verticales y horizontal inferior modeladas por resortes de rigidez asociada a la calidad del suelo y la roca de soporte.

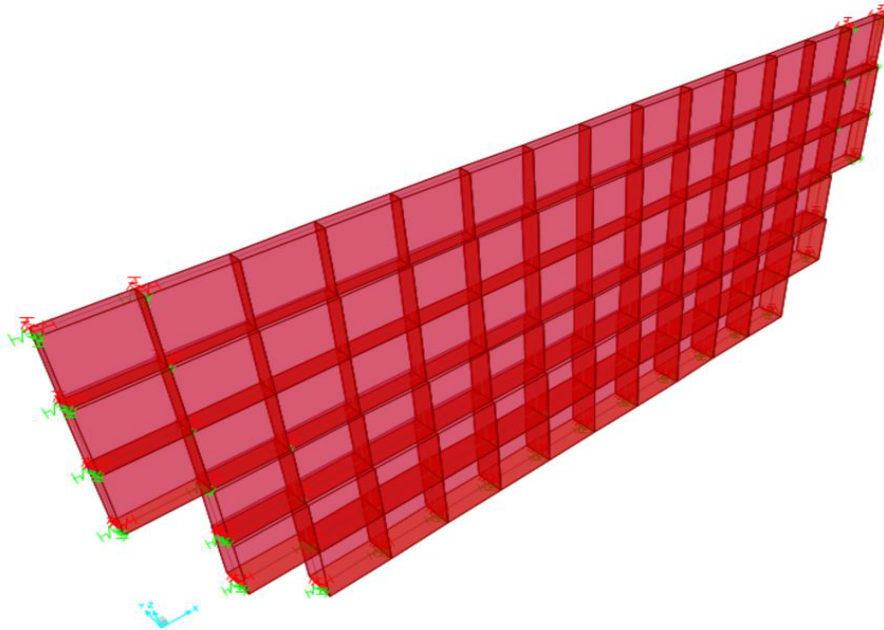


Figura 2. Vista tridimensional del muro

La figura 3 es resultado de la simulación de la deformación del muro por las cargas de empuje debidas al volumen de agua de la represa que además genera variaciones del momento flector en la superficie del muro.

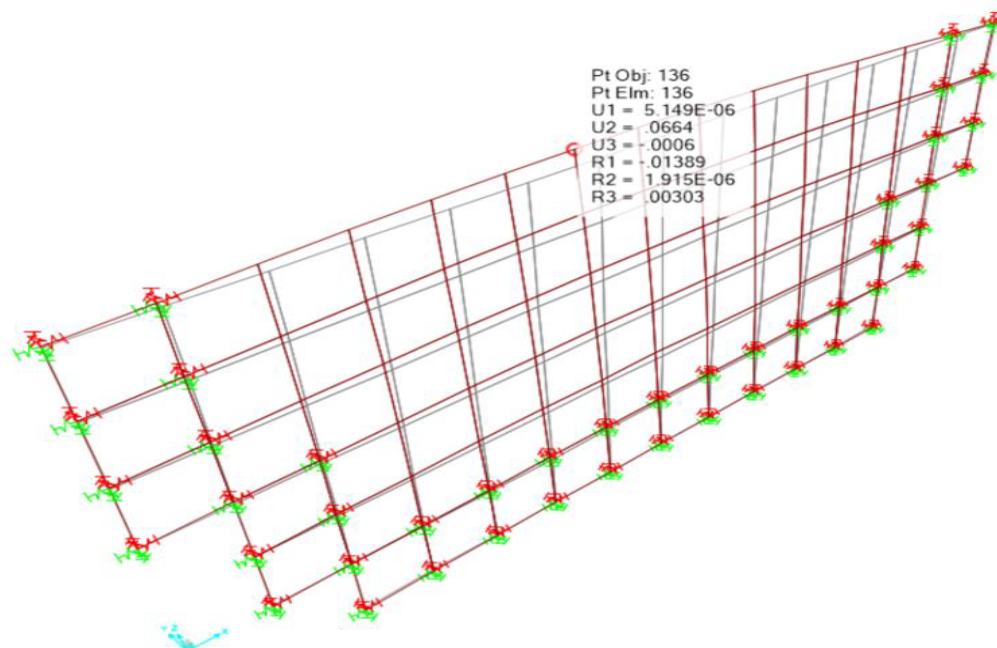


Figura 3. Deformación del muro por cargas de empuje de agua

Conclusión

En altura de 4m, se obtiene una confiabilidad mínima de 91%, y crítica en 94%, en condiciones estáticas; en condiciones dinámicas, valor crítico 93%, la confiabilidad decrece y la probabilidad de falla es mayor respecto a las condiciones estáticas, dado que entonces el factor de seguridad decrece. En altura 4.66 m la confiabilidad más crítica, en condiciones estáticas, equivale al 95%, mientras que, en condiciones dinámicas, el valor crítico es de 93%. Características del suelo no uniforme es aceptable.

La deformación máxima calculada es del orden 7 cm en el centro de la corona que puede asociarse al agrietamiento superficial reportado

Los valores obtenidos para momento flector exigen que las cuantías de acero de refuerzo deban ser medianamente altas lo que debe verificarse por medio de ensayos o leyendo planos de construcción si existen

Los cálculos preliminares de fuerza cortante indican que parece haber una deficiencia de

resistencia que debe comprobarse por medio de ensayos

Las aproximaciones hechas están basadas en la disponibilidad de medidas actuales. Se requiere más datos para refinar el modelo.

La represa resiste una fuerza ejercida por la presión del agua de 116000 kgf, presenta un deterioro del 8% en su capa superficial y aun cuando visualmente no hay evidencia de presencia de grietas, se evidencia filtración de agua que puede afectar su estabilidad, se encuentra deficiencia de resistencia, variabilidad aceptable de la estructura del suelo y deformación en el centro de la corona que puede asociarse al agrietamiento superficial.

Es recomendable iniciar intervención en el muro de contención de la represa, por cuanto su estabilidad en el mediano plazo puede verse comprometida y su deterioro progresivo afectará no solo el turismo y la economía de Cácuta, sino que también pone en riesgo de avalancha a la población que habita el casco urbano del municipio.

Referencias

- [1] G. Luna. Efectos físico-naturales y socio-económicos ley 1450/2011 Páramo de Santurbán, Bucaramanga: Universidad Santo Tomás, 2016.
- [2] UPME. Plan de encuestamiento municipio de Cúcota, Cúcota: UFPS, 2017.
- [3] J. Serrano. Análisis dinámico experimental y numérico de una presa bóveda: ajuste del modelo, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1015.
- [4] C. Meza. Optimización topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos, Cali: Universidad autónoma de occidente, 2012.
- [5] J. Camacho y M. Romero M. Análisis estructural con el método de elementos finitos, Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolívar, 2012.
- [6] Y. Bustamante. Optimización estructural de una presa a gravedad con elementos finitos, Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca, 2017.
- [7] J. Rojek and E. Oñate. “Multiscale analysis using a coupled discrete/finite element model” *Interaction and Multiscale Mechanics*, vol. 1, no. 1, pp. 1-31, 2007.
- [8] O. Zienkiewicz and R. Taylor. *The Finite Element Method: The Basis* 5 ed, Oxford: Butterworth, 2000.
- [9] R. Thornton and V. Colangelo. *Ciencia de materiales para ingeniería*, México: Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1997.
- [10] S. Smale, M. Hirsch and R. Devaney. *Differential Equations, Dynamical Systems, and an Introduction to Chaos*. Pure and applied mathematics, New York: Elsevier Science, 2003.
- [11] C. Hidalgo y A. Pacheco. “Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: La teoría” *Revista de Ingenierías*, vol. 10, no. 18, pp. 69-78, 2011.
- [12] M. Duncan. “Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 307-316, 2010.
- [13] A. Alvarado-Cornejo y A. Cornejo-Guardia. Estabilización de taludes en la Costa Verde – Callao, Lima: Universidad San Martín de Porres, 2014.
- [14] B. Das. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, México: Cengage Learning, 2016.
- [15] A. Montoya-Orozco. *Confiabilidad en Estabilidad de Taludes*, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [16] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, ASTM D3-080, United State of America: American Society for Testing and Materials, 2004.
- [17] T. Allen and R. Bathurst. *Prediction of Reinforcement Loads in Reinforced Soil Walls*, Washington: Federal Highway Administration, 2003.
- [18] J. Alva-Hurtado y M. Cañari-Sánchez. *Análisis de la Estabilidad de taludes de la Costa Verde*, Lima:

Universidad Nacional de Ingeniería,
2003.

- [19] C. Escobar y G. Duque-Escobar. Geotecnia para el trópico andino, Bogotá: Universidad Nacional, 2017.
- [20] S. Brizuela. “Análisis probabilístico de estructuras geotécnicas” *Boletín Técnico PITRA*, vol. 8, no. 5, pp. 1-7, 2017.
- [21] F. Prada, A. Ramos, D. Solaque y B. Caicedo. “Confiabilidad aplicada al diseño geotécnico de un muro de contención” *Obras y Proyectos*, vol. 9, pp. 49-58, 2011.
- [22] J. Duncan, S. Wright and T. Brandon. Soil strength and slope stability, New York: John Wiley & Sons, 2014.