

Recibido: 16 mayo de 2022
Aceptado: 23 agosto de 2022**DESAFÍOS EN LA DEFINICIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD EN EL
DISEÑO DE ESTRUCTURAS GEOTÉCNICAS****CHALLENGES IN THE DEFINITION OF SECURITY FACTORS IN THE
DESIGN OF GEOTECHNICAL STRUCTURES**

PhD. Juan Carlos Ruge*^{ID}, MSc. Óscar Hernán Vargas Villamizar**^{ID},
M.Sc. July Estefany Carmona Álvarez***^{ID}.

* **Universidad Militar Nueva Granada**, Facultad de Ingeniería.

Carrera 11 #101-80, Bogotá, Colombia.

+ 57 601 650 0000, extensión 1261.

E-mail: juan.ruge@unimilitar.edu.co

Orcid: 0000-0002-9100-6058

** **Universidad El Bosque**, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas.

Carrera 9 #131A-02, Bogotá, Colombia.

+57 601 648 9000, extensión 1363.

E-mail: ovargasvi@unbosque.edu.co

Orcid: 0000-0002-2704-5722

*** **Universidad Antonio Nariño**, Programa de Ingeniería Civil.

Calle 22 Sur #12D-81, Bogotá, Colombia.

+57 601 315 2980, extensión 1524.

E-mail: jcarmona55@uan.edu.co

Orcid: 0000-0003-2212-3901

Resumen: en este artículo, se analiza y discute la información de una encuesta realizada a un grupo de estudiantes de posgrado en ingeniería civil acerca de cómo el concepto de factor de seguridad es interpretado y empleado en el diseño de estructuras geotécnicas. Los resultados obtenidos aportan a la comprensión de las variables asociadas al cálculo de un factor de seguridad, visto como un ejercicio que trasciende el uso de fórmulas matemáticas e involucra al criterio ingenieril, siendo un aspecto clave al momento de su aplicación en contextos reales.

Palabras clave: Factor de seguridad, estructuras geotécnicas, criterio ingenieril.

Abstract: in this article is analyzed and discussed the information from a survey made to a group of Civil engineering postgraduate students about how the concept of security factor is interpreted and employed in geotechnical structures design. The obtained results contribute to the understanding of variables related to the calculation of a security factor, seen as an exercise that transcends the use of mathematical formulas and involves the engineering judgment, becoming a key aspect at the moment of its application in real contexts.

Keywords: Security factor, geotechnical structures, engineering judgment.

1. INTRODUCCIÓN

El ejercicio de la ingeniería civil es entendido como la toma de decisiones con base en un cuerpo de conocimiento respaldado en ciencias exactas como la matemática, la física y la química. Sin embargo, esta interpretación puede verse limitada en la aplicación en contextos reales, en los cuales hay que considerar aspectos que no se limitan al paradigma de la aplicación de fórmulas. Por ejemplo, el concepto de *factor de seguridad (FS)* merece un tratamiento especial debido a su complejidad *per se* y a su relación con el concepto de subjetividad. Desde el punto de vista académico, el FS puede definirse como el cociente entre la resistencia última y la resistencia admisible en el material en que se actúa (Duncan, 2000). La anterior relación implica una alta subjetividad e incertidumbre debido a que las estructuras deben diseñarse y construirse para que los valores de falla de los materiales constitutivos permanezcan constantes, lo que exige que el cálculo del FS sea preciso (Matsuo y Asaoka, 1976; Fellin, 2005).

A través de los años, el FS ha sido considerado como una variable establecida por el diseñador como parte de su esfera de toma de decisiones. Por tanto, un FS es definido por el proyectista acudiendo a su experiencia laboral, al asumirlo como un factor escalar enfocado en reducir cuantitativamente el valor de la resistencia última para un material. La aplicación del modelo de Mohr-Coulomb, que es el más empleado tanto en la academia como en consultoría, ofrece resultados con fluctuaciones significativas, de acuerdo con la ecuación de aproximación que sea usada en un contexto dado (Nieto Leal *et al.*, 2009).

Las metodologías empleadas para definir el FS exigen parámetros de resistencia del material que son recolectados mediante ensayos de laboratorio o en trabajo de campo, por lo que se enfrentan problemas tales como la alta variabilidad de los datos obtenidos de las muestras y los porcentajes de error atribuibles a los equipos de medición. Lo anterior afecta de modo directo a la *resistencia admisible* del material, puesto que su valor depende de la *resistencia última*, entendida como la admisibilidad de un valor cercano a la carga de trabajo experimentada por el material en condiciones reales. La definición de FS en geotécnica es una actividad desafiante, debido a que su objeto de estudio es el suelo de fundación (o la

interacción conjunta entre el suelo y otros elementos geotécnicos), que es un material impredecible y dependiente del contexto.

La elección de un FS trasciende la acción de variables técnicas, legales y situacionales, por lo que requiere el involucramiento del criterio ingenieril del proyectista. El criterio ingenieril, tal como lo expresa Phoon (2017, p. 7), tiene un rol crítico en todos los aspectos de la práctica geotécnica, puesto que no es prudente la toma de decisiones con base exclusivamente en cálculos, sin importar su nivel de sofisticación y precisión. En el caso de la escogencia de un FS, el criterio ingenieril cobra un rol clave, puesto un FS menor al mínimo requerido aumenta el riesgo de falla de la estructura, y un FS alto genera un sobredimensionamiento de la estructura, lo que conlleva problemas técnicos y económico.

En este artículo, se analiza la forma en que el FS es definido y empleado por parte de un grupo de estudiantes de posgrado en ingeniería civil. Los resultados obtenidos aportan a la comprensión de las variables asociadas al cálculo del FS en el diseño de estructuras geotécnicas, aspecto central a la hora de identificar propuestas pedagógicas para la aplicación del concepto en ámbitos reales.

2. MARCO TEÓRICO

En el proceso de diseño geotécnico usualmente se recurre a las recomendaciones incluidas en los códigos de sismo resistencia (AASHTO, 2007; ACI, 2002, AISC, 2001; ASCE, 2000, Eurocode, 2004), donde se tiene en cuenta la problemática asociada a los factores de seguridad, mediante el uso de métodos tradicionales como ASD (Allowable Stress Design) o a través del nuevas técnicas basadas en variaciones probabilistas de las cargas coligadas al proceso de diseño, como en el caso del LFRD (Load and Resistance Factor Design). El cálculo del FS por métodos tradicionales o nuevos, conlleva el desafío de establecer lo que se entiende como “resistencia”, puesto que esta se define con base en metodologías basadas en teorías determinísticas, probabilísticas o estadísticas; por lo que a menudo se obtiene un amplio rango de valores posibles como respuesta válida (Obergruppenberger, 2005).

El problema asociado a contar con múltiples posibles valores para el FS se acentúa en un área de la ingeniería civil como la geotecnia, debido al uso de geomateriales que son heterogéneos,

anisotrópicos, y tienden a responder en forma errática, no lineal y extrínseca (Herle, 2005). La complejidad de los geomateriales limita la efectividad en el uso de ecuaciones matemáticas que, en muchos casos, son incapaces de predecir el comportamiento natural de un material como el suelo (Olarte y Ruge, 2019). Por lo anterior, no es posible contar con una ecuación matemática generalizada, debido a que cada problema geotécnico tiene una aproximación particular y unas incertidumbres específicas (Meyerhof, 1970).

La escogencia del FS en un diseño geotécnico no depende exclusivamente de la información matemática o experimental, sino que entran en juego variables propias de la subjetividad del diseñador tales como su formación, su experiencia en el contexto espacial bajo análisis o la cultura de trabajo en los procesos de consultoría (Haurylkiewicz, 1979; Naylor, 1981; Smith, 1985; Oliphant, 1992). En este escenario, un proyectista inicia el proceso de diseño con alta incertidumbre, y esto exige un proceso de toma de decisiones sensato para que el FS se articule con los procesos involucrados en un proyecto de infraestructura: concepción, planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento.

Un proyectista no puede soslayar el impacto de los imprevistos propios de una obra geotécnica y debe tomar las medidas pertinentes para garantizar la seguridad necesaria a la construcción. Por ejemplo, ante la aparición del concepto del efecto de la succión en los suelos parcialmente saturados, algunos proyectistas de enfoque vanguardista tienden a usar FS menores, en especial para estructuras temporales (Ruge, 2014). No obstante, en estos casos no pueden ignorarse variables como el factor de estacionalidad: en época de estiaje en una determinada región donde una estructura temporal será construida, la tendencia a usar FS menores es alta, mientras que, en épocas de alta humedad, deben considerarse las condiciones críticas causantes de esta circunstancia (Ruge *et al.*, 2017).

Cualquier cambio significativo en un proyecto requiere de una reevaluación del diseño y, posiblemente, la adopción de un nuevo FS (Meyerhof, 1970). Asimismo, la incertidumbre reflejada en el FS puede deberse a problemas asociados al proceso de construcción (Uniandes, 2014) que pueden mitigarse mediante la promulgación de normativas nacionales para el control de la calidad de los materiales. Sin embargo, un ingeniero civil con poca experiencia profesional, o con poco conocimiento empírico en un contexto

específico de aplicación, tendrá una comprensión limitada de la condición cuantitativa de la variable, lo que podría producir dos resultados extremos no deseables: un diseño no apropiado para resistir las exigencias de un entorno puntual, o un elemento geotécnico sobreestimado y de alto costo (Hinze y Gambatese, 2003).

Desde un análisis más determinístico, dentro de un proceso de diseño existen valores de FS conocidos como *globales*. Estos valores, que son recomendados en las normativas, están contenidos en rangos: el máximo valor escogido, es decir, el de más incertidumbre, se elige cuando la estructura trabaja en condiciones normales de serviciabilidad (es decir, que la estructura actúa en situaciones reales de carga). Por otra parte, se opta por el menor valor en el rango si el diseño estará sometido a condiciones de carga extrema, ensayos de carga real, pruebas de carga en pilotes y zapatas, o cuando se involucran enfoques novedosos, como el antes nombrado del efecto de succión en suelos parcialmente saturados (ver tabla 1).

Tabla 1. Rangos de factores de seguridad globales
Fuente: modificado de Terzaghi y Peck (1967).

Tipo de falla	Estructura / Elemento	FS
Falla por cortante	Obras de tierra	1,3 - 1,5
	Estructuras de contención	1,5 - 2,0
	Fundaciones	2,0 - 3,0
Infiltración	Levantamientos	1,5 - 2,5
	Gradiente de salida, <i>pipng</i>	3,0 - 5,0

Entrando en un análisis más detallado, la resistencia del suelo y las cargas aplicadas suelen ser variables independientes dentro de un proceso más exhaustivo de diseño, por lo que un FS, en teoría más generalizado, puede ser determinado mediante el uso de factores de seguridad aislados entre la resistencia del suelo y las solicitaciones de carga. Estos FS, denominados *parciales*, buscan integrar la certeza de un mínimo margen de seguridad con la experiencia y criterio ingenieril suministrado por los FS globales propuestos en la tabla 1. En este caso, la resistencia del suelo tradicionalmente está enmarcada en el concepto de *resistencia al corte*, definido por parámetros físicos conocidos como cohesión y ángulo de fricción interna, es decir, cada parámetro de resistencia será asignado con un FS diferente (ver tabla 2).

De igual forma, el suelo presenta una alta dependencia de factores provenientes de predicciones fisicomatemáticas como el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi que aún hoy, un siglo después, sigue empleándose (Freudenthaal, 1956; Freudenthaal, 1968; Pugsley, 1955; Pugsley, 1966; Taylor, 1948; Hansen, 1956; Hansen, 1965; Hueckel, 1964; Janbu *et al.*, 1956).

Tabla 2. Rangos de factores de seguridad parciales
Fuente: modificados de Meyerhof (1970)

Estructura / Ítem	Parámetros de resistencia al corte	FS
Obras de tierra y estructuras de contención	Cohesión	1,5
	Ángulo de fricción interna	1,2
	Cohesión y ángulo de fricción interna	1,3 - 1,5
Fundaciones	Cohesión	2,0 - 2,5
	Ángulo de fricción interna	1,2 - 1,3
Carga muerta	-----	1,0
Presión hidrostática	-----	1,0 - 1,2
Carga viva	-----	1,2 - 1,5

Respecto al abordaje del concepto de factor de seguridad en la enseñanza de la ingeniería, Musto (2010) señala que el aprendizaje de la noción de FS por parte de un estudiante evoluciona a lo largo de su formación como ingeniero: en las primeras etapas del abordaje, el estudiante tiene un imaginario basado en una sobreestimación o sobre-diseño de la capacidad de trabajo del material; mientras que en las signaturas de los últimos semestres, fundamentadas en diseño de materiales, el estudiante es consciente de la importancia del concepto y empieza a considerar factores tales como la resistencia al corte del suelo, las dimensiones de la cimentación y las solicitaciones de carga, entre otras. De acuerdo con este último aspecto, es fundamental que se propongan actividades que involucren este tipo de problemáticas, para que el estudiante comprenda la información de una mejor manera (Edmondson y Sherratt, 2022).

3. MÉTODO

El estudio se desarrolló mediante un análisis mixto de los resultados de una encuesta realizada a 30 estudiantes matriculados en programas de posgrado en ingeniería civil de cuatro universidades de Colombia y México, entre septiembre de 2020 y febrero de 2021. Dichos programas incluyen cursos avanzados en infraestructura de vías, geotecnia, auditoría, gerencia o supervisión de construcción en su plan de estudios.

La encuesta se realizó mediante un formulario de Google, compartido vía correo electrónico y mensajería instantánea y, en su parte inicial, se solicitó el consentimiento explícito a los participantes para el uso y análisis de sus respuestas. La encuesta fue diligenciada en su totalidad por 33 destinatarios, aunque 3 de ellos no autorizaron el manejo de sus datos personales. Según lo anterior, la muestra final estuvo compuesta por 30 participantes de cuatro universidades, tres de Colombia (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad Santo Tomás) y una de México (Universidad Nacional Autónoma de México). El cuestionario consta de 11 preguntas (nueve cerradas y dos abiertas) relacionadas con dos categorías (ver tabla 3 y anexo 1): las seis primeras buscan conocer cómo describen los encuestados el concepto de FS, y las cinco restantes proponen un ejercicio de determinación del FS en una estructura geotécnica.

Tabla 3. Estructura del cuestionario

Categorías	Aspectos indagados
Descripción del concepto de FS.	• Años de experiencia en el campo de la geotecnia. • Definición de FS y razones que justifican el uso de un FS. • Conocimientos teóricos requeridos para definir un FS • Forma en que el concepto se enseña en el aula.
Determinación de un FS en un ejercicio de estructura geotécnica.	• Respuestas dadas a un ejercicio práctico de determinación de un FS en una estructura geotécnica. • Justificación de los criterios usados en el ejercicio para determinar el FS. • Opiniones acerca de las razones ante el posible colapso de la estructura geotécnica analizada.

La información obtenida del cuestionario fue analizada con base la interpretación de las percepciones de los participantes acerca del FS desde la percepción adquirida en su formación académica, y desde la experiencia al enfrentarse a

un proceso de diseño y elección de un factor de seguridad idóneo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan a continuación, organizados de acuerdo con las dos categorías expuestas en el apartado de Método. En el Anexo 1 puede consultarse el enunciado de cada pregunta.

4.1. Descripción del concepto de factor de seguridad

El 40% de los encuestados afirmó que tenía una experiencia en geotecnia entre 1 y 5 años, un 50% no contaba con experiencia o era inferior a un año, y el 10% reportó una experiencia mayor a 10 años. Según lo anterior, los conocimientos geotécnicos de la muestra se sustentan más en su formación académica que en la experiencia en campo. Por otra parte, al elegir una palabra para definir al FS, el 43,3% eligió *confianza*, un 36,7% se inclinó por *incertidumbre*, mientras que un 13,3% optó por *probabilidad* y el 6,7% por *riesgo*. Al respecto, podría interpretarse que, ante la reducida experiencia práctica en geotecnia, el uso de conceptos teóricos es visto por los participantes como una forma de aumentar la confianza en la toma de decisiones, al no poder acudir al criterio ingenieril.

Por otra parte, ante la fijación de una escala o valor de FS de una obra civil, el 66,7% considera que el conocimiento adquirido en la academia no es suficiente para realizar un diseño confiable. Al justificar su respuesta, los encuestados expusieron, desde su punto de vista, las limitaciones de la academia para formar en FS:

- Alta dependencia del criterio ingenieril y de la información sobre el contexto.
- La cantidad de variables involucradas complica la enseñanza teórica.
- Es posible establecer intervalos, pero hay variabilidad en estos.
- Es un tema poco discutido, y se requieren más cursos enfocados en elementos de diseño.
- La experiencia laboral es indispensable para apropiarse el concepto.
- La academia se enfoca en la enseñanza de la normatividad, que es cambiante según el lugar.

Respecto a la forma en que se expone el FS en el aula, el 73,3% indicó que este se explica como un

valor cuantitativo que determina la confiabilidad del diseño, mientras que un grupo minoritario afirmó que se expone como una herramienta subjetiva de diseño (13,3%), como un valor proporcional al tamaño de la estructura (10,0%) o como un concepto intrínsecamente vinculado a la experiencia profesional (3,3%). Frente a la pregunta sobre las implicaciones hipotéticas si no fuera usado un FS, los encuestados identificaron la probabilidad de falla en la estructura soportada por fundaciones (50,0%), la reducción de la capacidad de resistencia en elementos geotécnicos o estructurales expuestos a cargas de servicio (26,7%), el incremento de los costos de construcción de fundaciones (10,0%), el sobredimensionamiento de las fundaciones (13,3%).

4.2. Determinación de un FS en un ejercicio de estructura geotécnica

A continuación, se presenta el enunciado del ejercicio propuesto a cada participante en la encuesta:

Una cimentación cuadrada en planta tiene dimensiones de 2 m X 2 m. El suelo en el que se soporta la cimentación tiene los valores que se muestran adjuntos. Si la capacidad última de carga calculada para el suelo es de 1078.29 kN/m², ¿qué factor de seguridad (FS) recomienda usted para hallar la carga admisible de la cimentación (sin rangos, usando solo un decimal).



Parámetro / Característica	Valor
Ángulo de Fricción ϕ°	25°
Cohesión C'	20 kN/m
Peso Unitario γ	16,5 kN/m ³

Fig. 1. Condiciones de la cimentación.

Para un ingeniero civil graduado, este es un ejercicio de complejidad media puesto que los cuatro parámetros de entrada asociados a la cimentación son conceptos básicos estudiados en la formación de pregrado, y la dificultad de la actividad radica en la articulación de estos conceptos para interpretar el FS mediante un análisis teórico, sin una interacción

directa con un contexto real. En lo referente a los FS propuestos por los participantes como respuesta al ejercicio, el 63,3% escogió un valor entre 2 y 3 (véase tabla 4).

Tabla 4. FS propuestos por los participantes

Factor de seguridad propuesto	Porcentaje de elección
1	6,7
1,5	16,7
2	13,3
2,5	10,0
3	43,3
3,5	6,7
4	3,3

n=30

Al analizar las respuestas al ejercicio de cálculo de carga admisible en una cimentación, es importante notar que, a pesar de ser un ejercicio de complejidad media, hay una amplia dispersión de los valores propuestos, lo que está alineado con la concepción de Matsuo y Asaoka (1976) sobre la alta incertidumbre y subjetividad asociada con la escogencia del FS. Respecto a las respuestas, los FS propuestos no pueden considerarse acertados o erróneos, sino que deben analizarse con base en la formación y experiencia de los encuestados. Ante esto, la elección FS altos (el 53,4% supera el valor de 3) puede asociarse a que la muestra cuenta con menor experiencia práctica en campo.

Como pregunta asociada a la definición del FS para la estructura geotécnica dada, se indagó por el criterio principal que emplearon los participantes en la escogencia del factor a partir de cinco opciones dadas. En lo referente a esto, un 40,0% de los participantes dio prelación al uso de normas y regulaciones técnicas en lugar de acudir al conocimiento proveniente de teorías matemáticas, del ejercicio profesional o del aprendizaje en aula (véase tabla 5).

Tabla 5. Criterios de escogencia del FS

Criterio principal de escogencia	Porcentaje de elección
Normas y regulaciones técnicas	40,0%
Teorías científicas y matemáticas	26,7%
Experiencia profesional	20,0%
Discusión o consulta profesional	6,7%
Conocimiento aprendido en aula	3,3%
Otro	3,3%

n=30

La necesidad de tomar decisiones con base en aspectos más allá de los cálculos matemáticos, como

lo plantea Phoon (2017), aumenta la incertidumbre del proyectista ante el uso de modelos matemáticos eficientes pero inexactos. Por lo anterior, la dispersión mostrada en la tabla 5 en la escogencia del criterio principal coincide con la definición de FS planteada por Oberguggenberger (2005), que no limita su cálculo al uso de ecuaciones matemáticas. Asimismo, es necesario considerar que los participantes no contaron con acceso a resultados de ensayos o al reconocimiento del contexto específico donde se ubica la fundación, por lo que es previsible que se acuda a las normas técnicas como principal criterio de escogencia, es decir, a documentos que recomiendan valores cuantitativos, como medio para mitigar los posibles sesgos del proyectista.

En la pregunta final del cuestionario se informó que la estructura soportada por la cimentación colapsó. Ante ello, un consultor contratado para evaluar el daño concluyó que el colapso se debió a una falla del suelo de fundación porque, durante el análisis del diseño para la cimentación, la capacidad de carga admisible se calculó con un FS inferior a 1,5. Se pidió a los encuestados que realizaran una conjetura con base en el dictamen del experto. Ante esto, el 46,7% consideró que el dictamen no fue objetivo porque el comportamiento geotécnico es determinado tanto por la capacidad de carga como por los asentamientos experimentados por la estructura; mientras que el 36,6% seleccionó que el dictamen fue acertado porque la capacidad de carga admisible depende de la capacidad de carga última que debe soportar la cimentación. Por otra parte, el 10,0% eligió que el dictamen fue acertado porque la resistencia de los elementos estructurales de la edificación depende de la capacidad de carga admisible de la cimentación, y un 6,7% consideró que los FS, por ser valores subjetivos y determinados por el criterio del ingeniero, no tienen importancia al realizar el análisis de falla de las cimentaciones.

En lo referente a las opiniones sobre el dictamen, al evaluar el colapso de una estructura no solo debe analizarse la capacidad de carga del material de fundación (suministrada en su mayoría por la resistencia al corte del suelo) sino que debe estudiarse los efectos de los asentamientos observados en la estructura, porque un asentamiento diferencial puede generar el colapso de la estructura. Por lo anterior, la primera respuesta es la acertada, como lo manifestó el 46,7% de los encuestados.

4. CONCLUSIONES

Desde el abordaje teórico propuesto en este artículo y con base en el análisis de los resultados, se identifica la dificultad intrínseca en la elección de FS debido a su naturaleza contextual (depende de las condiciones físicas de cada locación, que son difíciles de replicar mediante muestreos y ensayos de laboratorio), ambigua (hay alta divergencia entre las interpretaciones de los proyectivas en su definición, según su formación, experiencia y criterio ingenieril), y compleja (su cálculo implica la consideración de múltiples factores, trascendiendo al uso de teorías matemáticas).

Ante este escenario, la enseñanza en aula del FS debería estimular los ámbitos de discusión, más allá del aprendizaje de normas o la solución de ejercicios matemáticos. La inclusión de métodos pedagógicos alineados con discusiones con expertos invitados, debates basados en casos de estudio y visitas de campo ofrecen un contacto al estudiante con la aplicación del criterio ingenieril en contextos reales, lo que será de utilidad para incorporar una visión multidimensional del concepto de FS en el desarrollo de cursos de diseño geotécnico.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a Martha Moreno Igua, profesora del departamento de Humanidades de la Universidad El Bosque, por su valiosa orientación en la aplicación de estrategias discursivas en el proceso de escritura de este artículo.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Cuarta Edición. Washington, D.C.
- American Concrete Institute. (2002). *Building code requirements for structural concrete*. American Concrete Institute (ACI). Detroit.
- American Institute of Steel Construction. (2001). *Manual of steel construction: Load and resistance factor design*. American Institute of Steel Construction (AISC). Tercera Edición. Chicago.
- American Society of Civil Engineers. (2000). *Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE-7 2000*. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, Va.
- Duncan, J. M. (2000). "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126.
- Edmondson V. y Sherratt, F. (2022). "Engineering judgement in undergraduate structural design education: enhancing learning with failure case studies". *European Journal of Engineering Education*, Vol. 47, No 4. DOI: 10.1080/03043797.2022.2036704
- Eurocode (2004). EN 1997-1. *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*.
- Fellin, W. (2005). "Assessment of characteristic shear strength parameters of soil and its implication in geotechnical design". In *Analyzing Uncertainty in Civil Engineering*. Wolfgang Fellin, Heimo Lessmann, Michael Oberguggenberger, Robert Vieider (Eds.). Springer. Berlin.
- Freudenthaal, A. M. (1956). "Safety and the probability of structural failure". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 121, No. 1.
- Freudenthaal, A. M. (1968). *Critical appraisal of safety criteria and their basic concepts*. IABSE Congress Report, Nueva York. <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bse-cr-001:1968:8::8>
- Hansen, J. B. (1956). "Limit design and partial safety factors in soil mechanics". *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, Vol. 1.
- Hansen, J. B. (1965). "The philosophy of foundation design: design criteria, safety factors and settlement limits". *Duke University Symposium on Foundations*.
- Haurykiewicz, J. (1979) "Critical analysis of the method of safety factors in geotechnics". *Proceedings of Third International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, ICASP-3, 2.
- Herle, I. (2005). Difficulties related to numerical predictions of deformations. In *Analyzing Uncertainty in Civil Engineering*. Wolfgang Fellin, Heimo Lessmann, Michael Oberguggenberger, Robert Vieider (Eds.). Springer. Berlin.
- Hinze, J. y Gambatese, J. (2003). "Factors That Influence Safety Performance of Specialty Contractors". *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 129, No. 2.
- Hueckel, S. (1964). "The Problem of Safety in Soil Mechanics and Foundation Engineering". *Proc. Sem. Sil Mech.*, Lodz, p. 137
- Janbu, N., Bjerrum, L. y Kjaernsli, B. (1956). "Soil mechanics applied to some engineering

- problems". Norwegian Geotechnical Institute, Vol. 16.
- Matsuo, M. y Asaoka, A. (1976). "A statistical study on a conventional "Safety Factor Method"". Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1.
- Meyerhof, G. G. (1970). "Safety factors in soil mechanics". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7.
- Musto, J. C. (2010). "The safety factor: case studies in engineering judgment". International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol. 38, No. 4.
- Naylor, D. (1981). "Quantifying safety". Ground Engineering, 14(7) 2 and 6.
- Nieto Leal, A. Camacho Tauta, J. F. Ruiz Blanco, E. F. (2009). "Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening soil en suelos arcillosos". Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 8, No. 15.
- Oberguggenberger, M. (2005). The mathematics of uncertainty: models, methods and interpretations. In *Analyzing Uncertainty in Civil Engineering*. Wolfgang Fellin, Heimo Lessmann, Michael Oberguggenberger, Robert Vielder (Eds.). Springer. Berlin.
- Olarte, M.C. y Ruge, J.C. (2019). Analysis of numerical simulations on triaxial compression tests using different constitutive models of the soil behavior. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1388.
- Oliphant, J. (1992). "Controlling the safety of geotechnical structures: a proposed approach". Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 10.
- Phoon, K. K. (2017). "Role of reliability calculations in geotechnical design". Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, Vol. 11, No. 1. DOI: 10.1080/17499518.2016.1265653
- Pugsley, A. (1955) Report on structural safety, Structural Engineer, 33 (5) 141–149.
- Pugsley, A. (1966). *The safety of structures*. Arnold, London.
- Ruge, J.C. (2014). *Analysis of the behaviour of pile curtain executed on porous metastable soil through the use of a hypoplastic constitutive model considering the unsaturated response*, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasilia, Brasil,
- Ruge, J.C., Cunha, R.P., Colmenares, J.E. y Mendoza, C.C. (2017). "Class A prediction of a retaining structure made by a pile curtain wall executed on a tropical soil". DYNA, Vol. 84, No. 202.
- Smith, G.N. (1985). "The use of probability theory to assess the safety of propped embedded cantilever retaining walls". Geotechnique, Vol. 35, No. 4.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons, New York.
- Terzaghi, K. y Peck, R.B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, New York.
- Uniandes (2014). *Concepto técnico en relación a las causas más probables del colapso del edificio Space, informe final - fase III*. Universidad de los Andes, Colombia. https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportaldelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_15/Noticias/Shared%20Content/Documentos/2014/Uniandes_Informe-Final-Fase3-SPACE-Resumen.pdf

ANEXO 1

Preguntas del cuestionario:

1. Años de Experiencia específica en el área de Geotecnia (valor numérico sin decimales).
2. De las siguientes palabras: ¿cuál es la más apropiada para definir el concepto de Factor de Seguridad (FS)? (Selección múltiple, única opción a elegir).
3. Cuando usted fija un valor para el FS, en cualquier área de la ingeniería civil, ¿cuáles de las siguientes características tiene en cuenta, para definirlo? (Selección múltiple, más de una opción a elegir).
4. ¿El conocimiento impartido en la academia es suficiente para tener la habilidad de fijar una escala o valor para el FS de un diseño de una obra civil (Sí / No).
5. Justifique la respuesta anterior (respuesta abierta).
6. Dentro del proceso de enseñanza en la ingeniería civil, ¿cómo se presenta el FS? (Selección múltiple, única opción a elegir).
7. ¿Qué Factor de Seguridad (FS) usted recomienda para hallar la carga admisible de la cimentación? (valor numérico abierto, usando un decimal).
8. Del siguiente listado de criterios, ¿cuál fue el que utilizó para definir el FS en la pregunta anterior (Selección múltiple, única opción a elegir).
9. De las siguientes opciones, elija la consecuencia que considere más relevante en el análisis del diseño de una cimentación si NO se usará un FS (Selección múltiple, única opción a elegir).

10. ¿Cuál es el objetivo del FS en el análisis del diseño de cimentaciones? (Selección múltiple, única opción a elegir).
11. La estructura soportada por la cimentación colapsó. El consultor ha indicado que el colapso se debió a la falla del suelo de fundación, debido a que, durante el análisis del diseño para la cimentación, la capacidad de carga admisible se calculó con un FS inferior a 1,5. ¿Qué puede deducir de la afirmación? (Selección múltiple, única opción a elegir).