

Estructuración de códigos geotécnicos basados en el modelo de estados límite de diseño¹

Artículo de Investigación - Fecha de recepción: 20 de junio de 2012 - Fecha de aceptación: 22 de agosto de 2012

Nayib Moreno

Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil, Corporación Universidad de la Costa - CUC. Barranquilla, Colombia, nmoreno@cuc.edu.co

Iván R. Berdugo

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Geotécnica, Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia, irberdugo@uninorte.edu.co

RESUMEN

En este artículo se ofrecen los principios de diseño y las reglas de aplicación propuestas para que sean consideradas en las revisiones de la Norma Sismo Resistente 2010 (NSR-10) y en el Código de Laderas del Distrito de Barranquilla, basados adecuadamente en el modelo de estados límite de diseño, donde a partir de principios de diseño asociados a reglas de aplicación determinísticas o probabilísticas, se pudiese dimensionar racionalmente las cimentaciones con niveles de seguridad apropiados.

Palabras clave

Estados límite, diseño, factor de seguridad, cimentación, ladera.

-
1. Artículo derivado del proyecto de investigación titulado: *Estructuración de códigos geotécnicos basados en el modelo de estados límite de diseño*; proyecto de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad del Norte, 2012.

*Geotechnical code structuring
based on limit states design model*

ABSTRACT

This article poses consistent design principles and application rules that must be considered for revisions to the Standard for earthquake resistance 2010 (NSR-10) and to Barranquilla District Slopes Code, since the national engineering system requires Limit States Design based codes. Using consistent design principles and the application of probabilistic and deterministic approaches, foundations with appropriate levels of security can be rationally gauged.

Keywords

Limit states, design, safety factor, foundation, slope.

INTRODUCCIÓN

El diseño de cimentaciones por estados límite se fundamenta en principios de diseño, los cuales se garantizan mediante el seguimiento de reglas de aplicación que respetan los principios y satisfacen sus exigencias. Las reglas de aplicación pueden ser de carácter determinístico o probabilístico, pero en cualquier caso deben formularse para que los diseños tengan niveles de seguridad contra las fallas por capacidad portante.

Se establece que los estados límite corresponden al conjunto de condiciones bajo las cuales una estructura, o parte de ella, no puede llegar a cumplir las funciones para las cuales fue proyectada o diseñada. En ninguna circunstancia se debe llegar a la falla para satisfacer este criterio de diseño, ya que de ocurrir esto se dirá que la estructura ha llegado a su estado límite.

El modelo de estados límite propone verificar los requisitos de estabilidad, de deformación, ambientales y económicos, verificando que no se presenten anomalías o estados extremos tipificados por patrones de comportamiento definidos.

En general, en el diseño de las cimentaciones se establecen dos estados límite:

Estado límite 1. Estado límite de falla o último. En este caso se distingue entre el estado límite 1A, que corresponde al colapso del terreno de fundación o del terreno alrededor de la cimentación; y el estado límite 1B, que corresponde al colapso de la cimentación a causa de grandes deformaciones. Los estados límite de falla o último están asociados con los conceptos de peligro o falta de seguridad, y generalmente involu-

cran daños estructurales que podrían llevar a la estructura a la inestabilidad o colapso. Para MacGregor [1], un estado límite último puede involucrar, por ejemplo, la rotura de partes críticas de la estructura, el colapso progresivo de un elemento estructural o inestabilidad debida a deformaciones de la estructura. En el caso de cimentaciones, el concepto clásico de falla por falta de capacidad de carga (falla por capacidad portante) se tipifica como un estado límite último.

Estado límite 2. Estado límite de servicio o de funcionalidad. Corresponde a condiciones donde ocurren asentamientos y desplazamientos laterales de la cimentación sin generación de colapso, pero que conducen a una pérdida de funcionalidad del proyecto o a un incremento inesperado de los costos de mantenimiento [2].

La estructuración del modelo de estados límite permite formular reglas de aplicación que pueden ser determinísticas y/o probabilísticas. Las primeras se basan en factores de seguridad totales que se determinan a través de la teoría de seguridad, mientras las segundas emplean la teoría de la probabilidad para establecer factores de seguridad parciales de diseño que deberán estar asociados a probabilidades de falla aceptables, expresadas en términos de índices de confiabilidad de diseño.

En este documento se presentan las conclusiones correspondientes al empleo de factores de seguridad y reglas de aplicación determinísticas y probabilísticas para la Norma Sismo Resistente 2010 (NSR-10) [3] y el Código de Laderas del Distrito de Barranquilla [4], [5].

ANTECEDENTES DE LOS CÓDIGOS GEOTÉCNICOS

La normalización del trabajo relacionado con el uso del suelo como material de cimentación tiene innumerables antecedentes en la historia de la humanidad. En la dinastía Chou (s. 1000 a.C.) se dan las primeras recomendaciones para construir caminos y puentes. El siglo XVII trae una de las primeras contribuciones literarias sobre ingeniería de suelos, publicada por el militar francés Vauban [6] y titulada *Reglas y fórmulas empíricas para la construcción de muros de contención*.

Se puede establecer que la mecánica de suelos, conocida hoy como geotecnia, se inicia con los trabajos del francés Coulomb [7], quien relaciona la resistencia al corte con la cohesión y fricción del suelo; y con los del escocés Rankine [8], quien presenta su teoría sobre empuje de tierras. En 1866 Culman [9] aplica gráficamente la teoría de Coulomb a muros de contención, y en 1871 Mohr [10] desarrolla una representación gráfica del cálculo de esfuerzos en un punto dado del suelo. Entre 1919 y 1925 se produce un gran avance sobre el conocimiento de las propiedades de las arcillas, incluyendo los estudios de Atterberg [11], de Fellenius [12] y de sus colegas suecos sobre estabilidad de taludes. Para esta misma época, instituciones de EE. UU., Inglaterra, Alemania y países nórdicos llevan a cabo numerosas investigaciones en mecánica de suelos publicadas en congresos internacionales y regionales, y mediante revistas especializadas [5].

El año 1925 se considera como el del inicio de la geotecnia clásica con la publicación de la primera gran obra de Karl Terzaghi

[13]. Este autor e investigador es considerado el padre de la mecánica de suelos y su obra se caracteriza por la aplicación del método experimental a los problemas del terreno. Southwell [6] describe los métodos de relajación para resolver la ecuación de flujo en un medio poroso. Taylor [6] presenta una discusión sobre el uso de factores parciales en estabilidad de taludes, en cambio del factor de seguridad total. Hansen [14] sugiere reemplazar el tradicional sistema de factores de seguridad totales por el mucho más consistente sistema de factores de seguridad parciales [5].

A partir de la adopción del código ACI [15] en Estados Unidos se pone en práctica un método de diseño por factores de carga y resistencia denominado LRFD. Los códigos AASHTO (1994) [16], API (1993) [17], NRC (1995) [18] y ECS (1994) [19] han incluido la implementación del LRFD para el diseño geotécnico. El código AASHTO (1994 [16], 1998 [20]) propone utilizar para el diseño de las cimentaciones las mismas cargas, factores de carga y combinaciones de carga empleadas para el diseño estructural.

Para revisar los factores de carga propuestos por diferentes códigos sobre LRFD, se reunieron ocho códigos para puentes, edificios y fundaciones en tierra y *off shore* de Estados Unidos, Canadá y Europa. Los documentos reunidos fueron: AASHTO (1998) [20], ACI (1999) [21], AISC (1994) [22], API (1993) [17], MOT (1992) [23], NRC (1995) [18], DGI (1985) [24] y ECS (1994) [19]. Los factores de carga indicados en estos códigos han sido determinados mediante procesos de calibración, ya sea antes o después que los códigos adoptaran el LRFD para su implementación en la práctica de diseño [5].

Los proyectos de códigos o los códigos que se pueden referenciar en la historia de la geotecnia nacional son: Especificaciones generales de construcción para edificios (1975), Proyecto de Código de Construcciones de Bogotá (1978), Código de Construcciones y Edificaciones para Manizales (1980), Anteproyecto del Código de Edificaciones para el Distrito Especial de Bogotá (1985), Proyecto de decreto de normas mínimas para estudios de suelos de edificios en Cali (1988), Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (1984), Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (1998), Código de Laderas de Barranquilla (2000), Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá (2006) y Norma Sismo Resistente 2010 [5].

Hoy en día, los nuevos códigos de geotecnia proponen metodologías para la determinación de factores de seguridad que reemplazan el tradicional sistema de factores de seguridad totales por el sistema de factores de seguridad parciales. El método LRFD es uno de los que con mayor fuerza se ha venido utilizando para verificar los estados límite en los diseños geotécnicos mediante la aplicación de factores parciales a los componentes de diseño para incrementar las cargas y disminuir las resistencias [5].

ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO DE ESTADOS LÍMITE

La estructuración del modelo permite formular reglas de aplicación que pueden ser determinísticas y/o probabilísticas. Las primeras se basan en factores de seguridad totales, mientras las segundas emplean la teoría de la probabilidad para establecer factores de seguridad parciales de diseño [5].

Estructuración determinística

Los factores de seguridad totales aplicados son el resultado de evaluaciones empíricas que utilizan el método observacional, los métodos prescriptivos de diseño, los métodos experimentales de diseño, el criterio de resistencia nominal o el criterio de acciones nominales para dimensionar las cimentaciones y establecer el grado de confiabilidad de los valores característicos de los parámetros de diseño. Las características de los métodos y criterios de diseño se resumen a continuación [5].

Método observacional

Fundamenta el diseño en la toma de decisiones asistida por la interpretación de los resultados del monitoreo de un proyecto durante su construcción [5].

Métodos prescriptivos

Fundamentan el diseño en reglas empíricas, usualmente conservadoras, que no demandan la realización de cálculos; o si los demandan, éstos son limitados debido a que el dimensionamiento de la cimentación se realiza con la ayuda de tablas, cartas o especificaciones generales de diseño [5].

Métodos experimentales

Fundamentan el diseño en la toma de decisiones asistida por la interpretación de los resultados de ensayos sobre modelos, prototipos y/o pruebas de carga [5].

Criterio de resistencia nominal

Se fundamenta en verificar que los efectos de las acciones características como acciones directas características o asentamiento inducido no superen la resistencia nominal

de los materiales (resistencia de diseño o asentamiento admisible). La resistencia de diseño se obtiene dividiendo la resistencia última entre un factor de seguridad total, y el asentamiento admisible se determina amplificando el crítico. De esta manera, los estados límite se chequean para efectos característicos y resistencia nominal. El criterio de resistencia nominal es útil en casos donde el mecanismo de falla del problema estudiado es sensible a la resistencia del material e insensible a la variación de las acciones directas [5].

Criterio de acciones nominales

Se fundamenta en verificar que los efectos de las acciones nominales (acciones directas de diseño o asentamiento de diseño) no superen la resistencia característica de los materiales (resistencia última o asentamiento crítico). Las acciones directas de diseño se obtienen afectando las acciones directas características con factores de seguridad de mayoración y el asentamiento de diseño se determina amplificando el inducido. La resistencia última y el asentamiento crítico se determinan seleccionando los valores que más comúnmente pueden ocurrir, usando valores conservadores, por lo general [5].

Empleando el criterio de acciones nominales las cimentaciones se diseñan considerando que el mecanismo de falla se activa justo cuando se aplican las acciones de diseño. Es útil en casos donde el mecanismo de falla del problema estudiado es sensible a la variación de las acciones directas e insensibles a la resistencia del material [5].

En el título H de la NSR-10 [3] se establece que en el diseño de toda cimentación se

deben considerar tanto los estados límite de falla, del suelo de soporte y de los elementos estructurales de la cimentación, como los estados límite de servicio. Para conocer la aproximación del título H de la NSR-10 [3] al modelo de estados límite de cimentaciones, se procedió a desglosar cada inciso de la norma, estableciendo si estos corresponden a un principio de diseño, a una regla de aplicación o factor de seguridad, encontrándose que no existe correspondencia directa entre estos y los factores de seguridad son determinísticos. Esta apreciación se soporta en la Tabla I, donde se contemplan los principios de diseño y los factores de seguridad establecidos en algunos numerales de la NSR-10 [3], como la ausencia de las correspondientes reglas de aplicación.

Con respecto al Código de Laderas de Barranquilla [4], en este no se presentan los criterios para el diseño de cimentaciones en zonas de ladera. Se infiere que estos criterios se basan en estados límites de falla y de servicio, al considerar que en el artículo 2.0 de este código se establece, que además del cumplimiento de las exigencias establecidas, todos los estudios geotécnicos deben cumplir con los requisitos exigidos en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

Estructuración probabilística

Los factores de seguridad parciales recomendados en los códigos de estados límite están asociados a probabilidades de falla. Cuando se emplean formulaciones probabilísticas para estructurar el modelo de estados límite, las reglas de aplicación se asocian a unos principios básicos de diseño [5].

TABLA I
 DESGLOSE DEL TÍTULO H DEL REGLAMENTO COLOMBIANO DE NORMAS SISMO RESISTENTES

Principio de Diseño		Regla de Aplicación		Factor de Seguridad	
Capítulo	PD	Capítulo	RA	Capítulo	FS
H.4.4.2	Estados límite de servicio				
H.4.4.3	Uso de pilotes de fricción para control de asentamientos				
H.4.5	Cimentaciones en roca				
H.4.5.1	Estados límite de falla				
H.4.5.2	Estados límite de servicio				
H.4.6	Profundidad de cimentación				
				H.4.7.1	Capacidad portante de cimientos superficiales y capacidad portante de punta de cimentaciones profundas (Factores de seguridad indirectos FSICPM mínimos)
				H.4.7.2	Capacidad portante por fricción de cimentaciones profundas
				H.4.7.3	Capacidad portante por pruebas de carga y factores de seguridad
H.4.8	Asentamientos				
H.4.8.1	Asentamientos inmediatos				

Fuente: Elaboración propia

La regla de aplicación asociada al primer principio básico de diseño señala que este deberá garantizarse mediante el uso de criterios probabilísticos de niveles I, II o III; y que las clases de seguridad de diseño deberán estar asociadas a probabilidades de fallas aceptables, expresadas en términos de índices de confiabilidad de diseño [5], [6], [25].

La regla de aplicación asociada al segundo

principio básico de diseño establece que los valores característicos de los parámetros deberán responder a la expectativa matemática, a la media aritmética de una media normal, o a los derivados, de manera que la probabilidad de un valor más adverso no sea mayor al 5% [6].

El límite inferior del 5% corresponde a los parámetros estabilizadores y el límite superior del 5% a los desestabilizadores [5].

Criterio probabilístico de nivel I - Simplificado

La forma más simple de criterio probabilístico de nivel I se conoce comúnmente como criterio de acciones y resistencia nominales (LRFD). Emplea factores de seguridad parciales obtenidos mediante análisis semiempíricos y fija los valores característicos a partir de simplificaciones de la expectativa matemática. En este criterio se aplican factores de seguridad parciales de mayoración a los parámetros desestabilizadores característicos y factores de seguridad parciales de reducción de capacidad a los parámetros estabilizadores característicos, para así determinar las acciones desestabilizadoras de diseño y la resistencia de diseño. De esta manera, se revisan los estados límites para efectos y resistencias nominales [5].

Criterio probabilístico de nivel I - Explícito

Este criterio emplea factores de seguridad parciales racionales obtenidos mediante análisis de compatibilidad entre los crite-

rios probabilísticos de nivel I - Explícito y II. Modela las acciones desestabilizadoras y la resistencia como parámetros estocásticos normalmente distribuidos y calcula sus valores característicos como la media aritmética, o bien, de manera que la probabilidad de un valor más adverso no sea mayor al 5%.

Las acciones desestabilizadoras de diseño se obtienen aplicando factores de seguridad parciales de mayoración a las acciones desestabilizadoras características, mientras que la resistencia de diseño se obtiene aplicando factores de seguridad parciales de reducción de capacidad a la resistencia característica. De esta manera los estados límite se revisan para acciones y resistencias nominales (Fig. 1) [5].

Criterios probabilísticos de niveles II y III

Los criterios probabilísticos de niveles II y III estudian los estados límites de diseño, definiendo una función estocástica con una

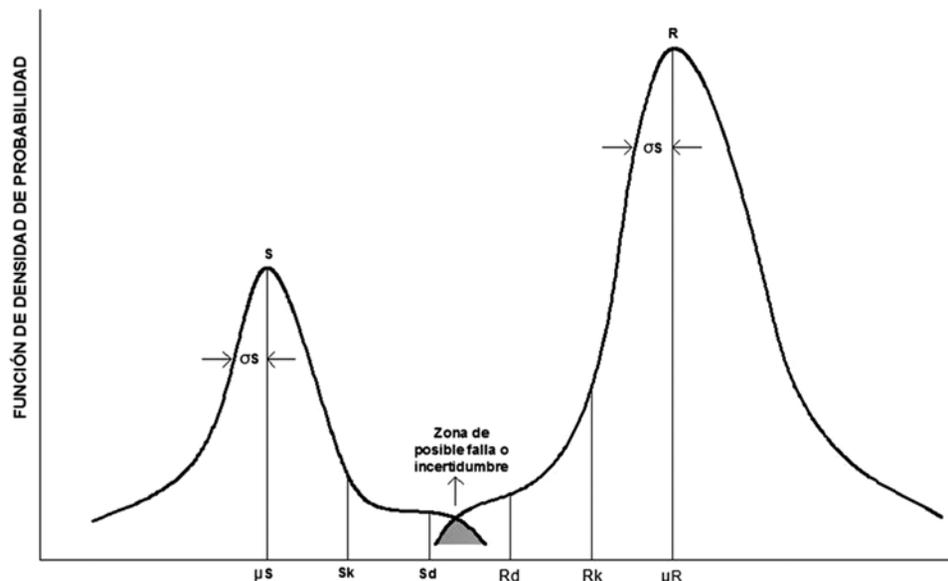


Fig. 1 Consideraciones del criterio probabilístico de nivel I - Explícito

Fuente: Elaboración propia

función de distribución de probabilidad Z , compuesta por una función de acciones desestabilizadoras S , y una función de resistencia R , que tienen algún grado de variabilidad, donde:

$$Z = R - S \quad (1)$$

La función de margen de seguridad tiene la propiedad de que $Z \geq 0$ es indicativo de un comportamiento satisfactorio y $Z < 0$ corresponde a una condición de falla. El estado límite, por su parte, corresponde a una condición donde $Z = 0$ [5].

En el criterio de nivel II, el cálculo de la probabilidad de falla es una aproximación; en el nivel III ese cálculo es exacto. La teoría de nivel II permite definir las condiciones de seguridad en términos de probabilidad y del índice de confiabilidad β [5] (Fig. 2).

Cuando se hace un tratamiento probabilístico formal al establecimiento de los índices de confiabilidad de diseño, es necesario tener en cuenta que la probabilidad de falla de una estructura como un todo está determina-

da por la probabilidad de falla de cada uno de sus componentes, es decir, por la ocurrencia de diferentes mecanismos de falla [5].

En un caso de correlación total, un mismo evento detonante puede conducir a la falla mediante varios mecanismos; de manera que la probabilidad de falla de la estructura como un todo será igual a la probabilidad de ocurrencia de los mecanismos individuales [5]. Si los mecanismos no son completamente dependientes, la probabilidad de falla de la estructura como un todo será mayor que la probabilidad de ocurrencia de los mecanismos individuales. En vista de que el incremento en la probabilidad de falla causa disminución en el índice de confiabilidad, para la estructuración de las clases de seguridad se requiere garantizar que se cumpla la siguiente desigualdad:

$$\beta_{\text{estructura}} \leq \beta_{\text{mecanismo}} \quad (2)$$

La Tabla II presenta la relación entre las clases de seguridad y el índice de confiabilidad de diseño.

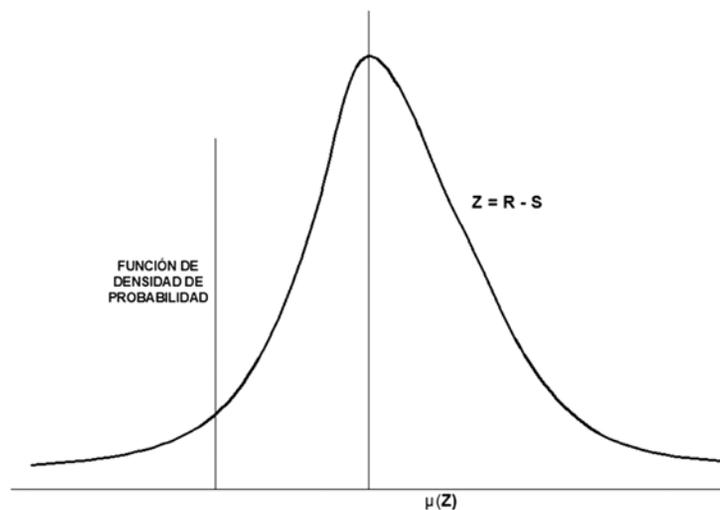


Fig. 2 Consideraciones de los criterios probabilísticos de niveles II y III
Fuente: Elaboración propia

La Tabla III presenta el modelo general de índices de confiabilidad de diseño establecida por CUR (1996), que corresponde a una de las escasas propuestas consistentes que se encuentra en la literatura geotécnica disponible.

FACTORES DE SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE CIMENTACIONES POR EL MÉTODO DE ESTADOS LÍMITE a través de la aplicación de factores de seguridad totales determinísticos y probabilísticos - Propuesta de aplicación a la NSR-10 y al Código de Laderas de Barranquilla

El Reglamento Colombiano de Construc-

ción Sismo Resistente 2010 (NSR-10) se estructura mediante la formulación de reglas de aplicación determinísticas. Se propone utilizar como factores de seguridad determinísticos los establecidos en la NSR-10 [3]. En esta, la selección de los factores de seguridad geotécnico básico (FSB) deben justificarse plenamente teniendo en cuenta:

- (a) La magnitud de la obra.
- (b) Las consecuencias de una posible falla en la edificación o sus cimentaciones.
- (c) La calidad de la información disponible en materia de suelos.

TABLA II
RELACIÓN ENTRE LAS CLASES DE SEGURIDAD Y EL ÍNDICE DE CONFIABILIDAD DE DISEÑO

Clases de seguridad	Características
I	Requiere el empleo de índices de confiabilidad de diseño 2,3 ⁽¹⁾ y 3,2 ⁽²⁾ para el estado límite de falla y de 1,8 para el estado límite de servicio
II	Requiere el empleo de índices de confiabilidad de diseño de 2,4 ⁽¹⁾ y 3,4 ⁽²⁾ para el estado límite de falla y de 1,8 para el estado límite de servicio
III	Requiere el empleo de índices de confiabilidad de diseño de 2,6 ⁽¹⁾ y 3,6 ⁽²⁾ para el estado límite de falla y de 1,8 para el estado límite de servicio

(1) Aplica cuando el viento es decisivo en el diseño

(2) Aplica cuando otros tipos de cargas son decisivos en el diseño.

Fuente: [6]

TABLA III
ÍNDICES DE CONFIABILIDAD DE DISEÑO - MODELO GENERAL

Estado límite	Categoría de estructura	β	Riesgo económico y riesgo sobre la vida de personas asociado al colapso o la deformación excesiva del terreno de fundación
1 A y 1 B	I	2,6	Bajo Medio Alto
	II	3,4	
	III	4,3	
2	I, II y III	1,8	-

Fuente: [6]

En cualquier caso los Factores de Seguridad Básicos FSB aplicados al suelo, roca o material intermedio no deben ser inferiores a los Factores de Seguridad Básicos Mínimos FSBM o FSBUM. En ningún caso el factor de seguridad básico mínimo FSBM podrá ser inferior a 1,0.

El Factor de Seguridad Básico o directo FSB es el factor de seguridad geotécnico real, pero de él se derivan Factores de Seguridad Indirectos que tienen valores diferentes y los cuales se especifican en los distintos capítulos de este Título H, pero en todo caso se debe demostrar que el empleo de éstos FS indirectos implica Factores de Seguridad Básicos FSB iguales o superiores a los valores mínimos FSBM.

Para la capacidad portante de cimientos superficiales y capacidad portante de punta de cimentaciones, el título H.4.7.1 de la NSR-10 [3] aconseja determinados valores de seguridad indirectos mínimos (Tabla IV).

Se deberá demostrar que los valores de FSB directos equivalentes no son inferiores a los de la tabla H.2.4.1 de la NSR-10 [3].

A la fecha, el Código de Laderas de Barranquilla [4] está desactualizado ya que en este se establece que los diseños geotécnicos realizados en laderas deben dar cum-

plimiento a los requisitos exigidos en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98. El 19 de marzo del 2010, el Gobierno nacional derogó la NSR-98 y mediante la expedición del Decreto 926, aprueba el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010 (NSR-10) [3], al considerar que este es un documento tecnológico que amerita actualizaciones periódicas, consecuentes con los avances en la ciencias de la ingeniería y la arquitectura, en la ingeniería sísmica y en las experiencias que se adquieren con los sismos fuertes que ocurren periódicamente en el territorio nacional y en otros países del mundo.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑO

Se presentan los principios básicos de diseño que para códigos como la NSR-10 y el Código de Laderas de Barranquilla, incondicionalmente deben garantizarse. Los principios básicos de diseño son:

1. En el análisis de las condiciones de estabilidad y deformación de una cimentación debe verificarse que no se superen los estados límite de diseño de la misma.
2. Los parámetros de análisis deben ser

TABLA IV
FACTORES DE SEGURIDAD INDIRECTOS FSICP MÍNIMO

Condición	FSICP mínimo
	Diseño
Carga muerta + carga viva normal	3,0
Carga muerta + carga viva máxima	2,5
Carga muerta + carga viva normal + sismo de diseño pseudo estático	1,5

Fuente: [3]

cuidadosos estimativos de aquellos que realmente afectan la ocurrencia de los estados límite [5].

REGLAS DE APLICACIÓN

Las reglas de aplicación de carácter determinística se basan en el empleo de factores de seguridad total, mientras que las reglas de aplicación probabilísticas emplean la teoría de la probabilidad para establecer factores de seguridad parciales de diseño. En cualquier caso, las reglas de aplicación deben formularse para que a pesar de las incertidumbres, los diseños tengan niveles de seguridad adecuados contra los problemas de estabilidad [5].

Para implementar el modelo de estados límite, los principios de diseño se garantizan mediante el seguimiento de las siguientes reglas de aplicación:

1. La regla de aplicación determinística asociada al primer principio de diseño señala que este deberá garantizarse mediante el uso del método observacional, de métodos prescriptivos de diseño, de métodos experimentales de diseño, del criterio de resistencia nominal o el criterio de acciones nominales [5].
2. La regla de aplicación determinística asociada al segundo principio básico de diseño establece que los valores característicos de los parámetros de análisis deberán corresponder a los valores más conservadores, a los valores promedio, a los valores mínimos para el caso de la resistencia, o a los valores máximos para las acciones directas e indirectas desfavorables y permanentes [5].
3. La regla de aplicación probabilística asociada al primer principio básico de diseño señala que este deberá garantizarse mediante el uso de criterios probabilísticos de niveles I, II o III, y que las clases de seguridad de diseño deberán estar asociadas a probabilidades de fallas aceptables, expresadas en términos de índice de confiabilidad de diseño [5].
4. La regla de aplicación probabilística asociada al segundo principio básico de diseño establece que los valores característicos de los parámetros deberán corresponder a la expectativa matemática, a la media aritmética de una distribución normal, o a los derivados de manera que la probabilidad de un valor adverso no sea mayor al 5% [5].

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

El procedimiento recomendado para determinar los factores de seguridad parciales para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales es:

1. *Selección del índice de confiabilidad de diseño*

El índice de confiabilidad de diseño es función de la categoría de la estructura y el estado límite objeto de análisis, como se presentó en las Tablas II y III [5].

2. *Selección de las acciones y la resistencia de acuerdo con el estado límite objeto de análisis*

El modelo de estados límite reconoce los parámetros de análisis geomecánicos y

acciones. Los primeros corresponden a las propiedades índice, a la resistencia al corte y a los indicadores de compresibilidad del terreno de cimentación. Las acciones impuestas a la cimentación se clasifican en función de su naturaleza, su efecto sobre la generación de los estados límite y su ocurrencia en el tiempo, como se presenta en la Tabla V [5].

3. *Determinación de las distribuciones de probabilidad de las acciones y la resistencia.*

Para el criterio probabilístico de nivel I - Explícito se emplean factores de seguridad parciales racionales obtenidos mediante análisis de compatibilidad entre los criterios probabilísticos de niveles I - Explícito y II [5]. Modela las acciones desestabilizadoras y la resistencia como parámetros estocásticos normalmente distribuidos y calcula sus valores característicos como la media aritmética. Se calculan los coeficientes de variación y se emplean valores característicos correspondientes a probabilidades de un valor más adverso no mayores al 5%, como se presenta en las ecuaciones (3) y (4):

$$Sk = \mu(S)[1 + 1,64\sigma(S)] \quad (3)$$

$$Rk = \mu(R)[1 - 1,64\sigma(R)] \quad (4)$$

Los estados límite se chequean para acciones y resistencia nominales, como se indica en la ecuación (5).

$$\{Sd = Sk\gamma_s\} \leq \{Rd = \frac{Rk}{\gamma_r}\} \quad (5)$$

Donde:

Sk: Acción desestabilizadora característica; *Rk*: Resistencia característica; $\mu(S)$: Media aritmética de la acción desestabilizadora; $\mu(R)$: Media aritmética de la resistencia; $\sigma(S)$: Desviación estándar de la acción desestabilizadora; $\sigma(R)$: Desviación estándar de la acción resistencia; $\nu(S)$: Coeficiente de variación de la acción desestabilizadora $\nu(S) = \frac{\sigma(S)}{\mu(S)}$; $\nu(R)$: Coeficiente de variación de la resistencia donde: $\nu(R) = \frac{\sigma(R)}{\mu(R)}$

Sd: Acción desestabilizadora de diseño; γ_s : Factor de seguridad parcial de mayoración aplicado a la acción desestabilizadora característica; *Rd*: Resistencia de diseño; γ_r : Factor de seguridad parcial de reducción de capacidad aplicado a la resistencia característica [5].

4. *Determinación de la distribución de probabilidad de la función de margen de seguridad y cálculo de los coeficien-*

TABLA V
CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE ACCIONES EN EL MODELO DE ESTADOS LÍMITE DE DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES

Naturaleza	Efecto sobre la generación de los estados límite	Ocurrencia en el tiempo
<ul style="list-style-type: none"> • Acciones directas: fuerzas y momentos. • Acciones indirectas: deformaciones inducidas por la superestructura, aceleraciones debidas a movimientos del terreno, asentamientos, expansiones y desplazamientos laterales del terreno 	<ul style="list-style-type: none"> • Acciones favorables • Acciones desfavorables 	<ul style="list-style-type: none"> • Acciones permanentes • Acciones temporales • Acciones accidentales

Fuente: [26]

tes de sensibilidad de las acciones y la resistencia

La determinación de los factores de seguridad parciales racionales, γ_s y γ_r se basa en el análisis de nivel II y nivel de riesgo que se compatibilizan con los de nivel I - Explícito. El nivel II suministra más que una probabilidad de falla o un índice de confiabilidad. De hecho, aporta un número infinito de combinaciones de los parámetros que conducen a la superación de los estados límite y que genera distribuciones de probabilidad a partir de las cuales es posible fijar los denominados puntos de diseño [5]. Adicionalmente, permite establecer el efecto relativo de cada parámetro x_i (estabilizador o desestabilizador) sobre la probabilidad de falla. Esto último se define en términos del coeficiente de sensibilidad α_i .

$$\alpha_i = \frac{\delta Z}{\delta x_i} \frac{\sigma(x_i)}{\sigma(Z)} \quad (6)$$

α_i varía entre 0 (sin efecto) y +1 o -1 (máximo efecto) [5].

Cálculo de los factores de seguridad parciales

Cuando los parámetros de resistencia característicos equivalen al límite inferior del 5%, los factores de seguridad parciales de reducción de capacidad se determinan mediante el empleo de la ecuación (7).

$$\gamma_r = \frac{(1-1,64v_i)}{(1-\alpha_i\beta v_i)} \quad (7)$$

De otra parte, la naturaleza desfavorable de

las acciones impuestas a una cimentación conduce a que $\alpha < 0$. En estas condiciones los factores de seguridad parciales de mayoración, asociados a parámetros desestabilizadores característicos equivalentes al límite superior del 5%, se obtienen haciendo uso de la ecuación (8).

$$\gamma_s = \frac{(1+\alpha_i\beta v_i)}{(1+1,64v_i)} \quad (8)$$

Donde v_i es el coeficiente de variación del parámetro de resistencia característico [5].

En cuanto a la determinación de los factores de seguridad probabilísticos recomendados para ser utilizados en el diseño de pilotes, el procedimiento recomendado para determinar el factor de seguridad global a partir de factores de seguridad parciales para el diseño geotécnico de pilotes se señala a continuación.

Determinación de los factores de seguridad parciales

Las Tablas VI, VII y VIII resumen los factores de seguridad parciales de mayoración de las acciones características y de reducción de la capacidad de carga axial característica más consistentes registrados en la literatura geotécnica [5].

Determinación del coeficiente de variación $\mu(B)$

La Tabla IX reproduce los valores típicos de los coeficientes de variación y obtenidos por varios autores al analizar los métodos de cálculo más empleados en la práctica de la ingeniería de cimentaciones.

TABLA VI
 FACTORES DE SEGURIDAD PARCIALES DE MAYORACIÓN DE ACCIONES PARA EL ESTADO LÍMITE DE FALLA 1 A (γ_s)

Documento	Tipo de acción					
	Permanente		Variable		Accidental	
	Favo- rable	Desfav.	Favo- rable	Desfav.	Favo- rable	Desfav.
FFES RIL 121 (1988)	-	1,20	1,00	1,60	-	-
DS415 (1984)	-	1,00	-	1,30	-	-
NEN 6702 (1991)	-	1,20-1,35	-	1,50	1,00	1,00
EC7 Caso C (1994)	1,00	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00
Frank (1997)	1,00	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00

Fuente: [6]

TABLA VII
 FACTORES DE SEGURIDAD PARCIALES PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Parámetros	Factores de resistencia
Cohesión	2,0 (1,8)
Coefficiente de fricción interna	1,2 (1,1)

Fuente: [27]

TABLA VIII
 FACTORES DE SEGURIDAD PARCIALES DE REDUCCIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA PARA EL ESTADO LÍMITE DE FALLA 1ª. (γ_T)

Documento	Tipo de pilote	Tipo de acción					
		Permanente y variable			Accidental		
		γ_r	γ_{rf}	γ_{rb}	γ_r	γ_{rf}	γ_{rb}
FFES RIL 121 (1988)	H	1,30	1,30	1,30	-	-	-
	PE	1,50	1,30	1,60	-	-	-
NEN 6702 (1991)	H	1,40	-	-	-	-	-
	CFA	1,30	-	-	-	-	-
	PE	1,30	-	-	-	-	-
NS 3479 (1991)	Todos los tipos	1,70	-	-	-	-	-
Fascicule 62-V (1993)	Todos los tipos	1,40	1,40	1,40	1,20	1,20	1,20
EC7 Caso C (1994)	H	1,30	1,30	1,30	1,00	1,00	1,00
	CFA	1,40	1,30	1,45	1,00	1,00	1,00
	PE	1,50	1,30	1,60	1,00	1,00	1,00
DIN V 1054-100 (1996)	Todos los tipos	1,70	-	-	1,33	-	-
Frank (1997)	H	1,20	1,30	1,10	1,00	1,00	1,00
	CFA	1,30	1,30	1,30	1,00	1,00	1,00
	PE	1,40	1,30	1,50	1,00	1,00	1,00

Fuente: [6]

TABLA IX
 PRECISIÓN DE ALGUNOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA AXIAL ÚLTIMA DE PILOTES

Método	$\mu(B)$	$v(B)$
API (1984) - SPT	0,92	0,58
Briaud & Tucker (1984) - SPT	1,4	0,51
Coyle & Castello (1981) - SPT	1,19	0,66
De Ruiter & Beringer (1979) - CPT	1,49	0,42
LPC - CPT (1983)	1,15	0,43
LPC - PMT (1982)	1,32	0,44
Schmertmann (1978) - SPT	1,48	0,74

Fuente: [26]

Determinación
 del factor de ajuste de R_u (ξ)

Para efectos de la precisión de cálculo se asume que B se ajusta a una distribución log-normal [5].

$$\xi = \frac{\mu(B)}{\exp(-1.64\epsilon - \frac{\epsilon^2}{2})} \quad (9)$$

Donde:

$$\epsilon^2 = \ln\{v(B)^2 + 1\} \quad (10)$$

Factor de seguridad global

El enfoque probabilístico genera un factor de seguridad global asociado a los factores de seguridad parciales de mayoración y reducción indicado en la ecuación (11) [5].

$$FSG = \gamma_s \gamma_r \xi \quad (11)$$

CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación presenta una propuesta para el análisis de estabilidad y deformación de estructuras geotécnicas en edificaciones, basadas en el modelo de es-

tados límite de diseño, a partir de la cual se definen los principios de diseño y las reglas de aplicación para códigos como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010 (NSR-10) [3] y el Código de Laderas de Barranquilla [4], reglamentado por el Consejo Distrital de Barranquilla dentro del Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla mediante la expedición del Decreto 0154 del año 2000.

En la próxima revisión que se dé a la NSR-10 [3] y al Código de Laderas de Barranquilla [4], se debe verificar la correspondencia entre los principios de diseño y las reglas de aplicación. En este proyecto se identificó que no existe relación directa entre estos aspectos y se determinó que los factores de seguridad recomendados en estas normas son determinísticos.

El hacer uso de reglas de aplicación coherentes con los principios de diseño, permitirá a los geotecnistas del país contar en un futuro cercano con la posibilidad de efectuar un análisis comparativo entre los facto-

res de seguridad totales, parciales y globales derivados de la estructuración probabilística del modelo de estados límite de diseño.

A partir de la propuesta para el uso de factores de seguridad parciales en el diseño de cimentaciones por el método de estados límite, a través de factores de seguridad totales determinísticos y probabilísticos aplicados a la NSR-10 y el Código de Laderas de Barranquilla, se presentan las siguientes conclusiones:

- Se requiere que los códigos geotécnicos colombianos utilicen el método de diseño por factores de carga y resistencia, abandonando el tradicional método de diseño por esfuerzos admisibles o de trabajo [5].
- Para el diseño de toda cimentación se deben considerar tanto los estados límite de falla del suelo de soporte y de los elementos estructurales de la cimentación como los estados límite de servicio, como lo establece el numeral H.4.1 de la NSR-10 [3], [5].
- La implementación del método de estados límite se debe realizar mediante el uso de factores de seguridad determinísticos y probabilísticos.
- Tanto para la NSR-10 como para el Código de Laderas de Barranquilla, se debe evitar que se alcancen los estados límite de servicio y último en el diseño final de los elementos, mediante el empleo de factores de seguridad totales y parciales probabilísticos como medidas complementarias para un diseño geotécnico aceptable.
- Para la utilización de factores de seguridad parciales se requiere de procesos previos de calibración que permitan la implementación adecuada de estos factores en las normas colombianas. Esta calibración deberá considerar las propiedades físicas de los suelos, el ambiente local y las características de las estructuras y de los materiales de construcción [5].
- Se evidencia una notable similitud entre los factores de seguridad deterministas establecidos por las normas y autores consultados en este trabajo de investigación, donde se presentan para cimentaciones superficiales en un rango claramente definido con valores numéricos entre 2 y 3. De igual manera, los valores para los coeficientes parciales de seguridad correspondientes a autores como Brinch, Hansen [27] y las normas Denmark DS 415, Eurocode 7 [19], [28], Canadá NBCC [29] y USA ANSI A58 [30], son similares y compatibles tanto para los factores de carga parciales como para los factores de resistencia [5].
- Se establece en este proyecto que el factor de seguridad global es similar al factor de seguridad total o determinístico. Sin embargo, se requiere calibrar los modelos probabilísticos a fin de obtener un factor de seguridad global nacional, cuyos valores numéricos puedan ser comparados con los factores de seguridad total utilizados hasta ahora. Para esto se sugiere se continúe este proyecto de investigación, donde a partir de determinar los parámetros geotécnicos para los suelos de la región y el país, de aplicar los principios de diseño y las

reglas de aplicación sugeridas para las normas colombianas, se encuentre una relación entre el factor de seguridad global probabilístico y determinístico.

- A pesar de haber alcanzado los objetivos trazados, este trabajo de investigación presenta limitaciones asociadas al alcance de los objetivos propuestos, por lo que se requiere que el tema tratado corresponda a una línea de investigación donde en una nueva fase se apliquen los modelos matemáticos probabilísticos asociados a la magnitud de las obras, las consecuencias de una posible falla en una edificación o sus cimentaciones y de conocer la calidad de la información disponible en materia de suelos. De esta manera se podrán determinar en el país los factores de seguridad total, parcial y global reales y ajustados a nuestro medio.
- Los proyectos generados en una futura línea de investigación asociada a este trabajo de investigación, pueden ser financiados por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias, en consideración a que esta entidad fomenta la investigación aplicada para la solución de problemas empresariales, la transferencia de conocimiento para la modernización y la transformación de la industria manufacturera continua y discreta a partir del desarrollo de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico en el marco de la alianza universidad - empresa - Estado.

REFERENCIAS

- [1] J. G. MacGregor, *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Prentice Hall. 3rd Edition, 1997.
- [2] A. V. González C. and G. Quevedo S., Aplicación de la teoría de seguridad al diseño de cimentaciones en arenas. Chequeo de linealidad. *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 22 No 2. Santa Clara, Cuba, 2007.
- [3] Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, 2010. [Online] Disponible en: <http://camacol.co/informacion-tecnica/nsr-10>
- [4] Alcaldía Distrital de Barranquilla, *Código de Laderas del Distrito de Barranquilla*, 2005.
- [5] N. Moreno, "Estructuración de la Norma Sismo resistente 2010, NSR-10 basada en el modelo de estados límite de diseño". *Ninth Laccei Latin American and Caribbean conference*, 2011.
- [6] R. Salgado, K. Foye and G. Jaoude, *Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites*. Purdue University, USA. 2004.
- [7] C. A. Coulomb, "Essai sur une application des regles de Maximums et Minimis a quelques Problemes de Statique, relatifs á l' Architecture," *Memories de Mathematique et de Physique, Présentes, á l' Academie Royale des Sciences, Paris, Vol 3*, 1976.
- [8] W. M. J. Rankine, "On stability on loose Earth" *Philosophic Transactions of Royal Society, London. Part I*, 9, 27.1857.

- [9] K. Cullman, *Die Graphische static in theorie der Stutz und Futtermavern*, Meyer und Zeller, Zurich, 1866.
- [10] O. Mohr, "Welche Umstande Bedingen die Elastizitatsgrenze und den brunch eines materiales?" *Zeitschrift des verenies deutscher Ingeniure*, Vol 44, 1900.
- [11] A. Casagrande, "Research of Atterberg limits of soils" *Public Roads* Vol. 13 No. 8, 1932.
- [12] W. Fellenius, "Erdstatische berechnungen mit reibungund kohesion". Ernest Verlag, Berlim, 1927.
- [13] K. Terzagui, *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Deuticke, Vienna, 1925.
- [14] J. B. Hansen, "The Philosophy of foundation design: design criteria, safety factors and settlement limits", *Lecture- Duke University Symposium on foundations - Raleigh NC*, 1965.
- [15] American Concrete Institute (ACI), *Standard Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Materials* (117-90), Detroit, 1990.
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, 1st ed., Washington D.C., 1994.
- [17] American Petroleum Institute (API), *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-load and resistance factor design*, Washington D.C., 1993.
- [18] National Research Council of Canada (NRC). *National building code of Canada*, Ottawa. 1995.
- [19] European Committee for Standardization (ECS), *Eurocode 7: Geotechnical Design-Part I: General Rules*, Central Secretariat, Bruselas, 1994.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, 2nd ed., Washington D.C., 1998.
- [21] American Concrete Institute (ACI), *Building Code Requirements for Structural Concrete* (318-99) and Commentary (318R-99), Detroit, 1999.
- [22] American Institute of Steel Construction (AISC), *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, 2nd. ed, Chicago, Illinois, 1994.
- [23] Ministry of Transportation Ontario MOT, "Ontario highway bridge design code", *Downsview*, 1992.
- [24] Danish Geotechnical Institute DGI, *Code of practice for foundation engineering*, Copenhagen, Dinamarca, 1985.
- [25] R. Day, *Limit states design in geotechnical engineering - consistency, confidence or confusion?* 1997.
- [26] I. R. Berdugo, "Aplicación de criterios probabilísticos de niveles I – explícito y II en la estructuración del modelo de estados límite de diseño geotécnico de cimentaciones". *Revista Ingeniería y Universidad*, Pontifica Universidad Javeriana. ISSN 0123-2126. Bogotá, 2000.
- [27] J. Brinch Hansen, *A theory of plasticity for ideal frictionless materials*. 1965. [Online] Disponible en: <<http://www.geodk/media/5031/geo.dgi.bulletin.no.28.pdf>>
- [28] N. K. Ovesen, "Eurocode 7: An European Code Practice for Geotechnical Design",

- Proceedings of the international Symposium on Limit State Design in Geotechnical Engineering, Copenhagen, Sponsored by the Danish Geotechnical Society, 1993.
- [29] National Research Council Canada. “National Building Code of Canada” NBCC, 2005.
- [30] ANSI. *American Standard Building Code requirements for minimum design loads in buildings and other structures*. American National Standards Institute, ANSI A58.1, 1982.