Estructuración de la norma sismo resistente 2010 - NSR-10 basada en el modelo de estados límite de diseño

Nayib Moreno Rodriguez
Corporación Universitaria de la Costa, CUC. Barranquilla, Atlántico, Colombia, nmoreno@cuc.edu.co

RESUMEN

El territorio colombiano se divide geográficamente en regiones que presentan características propias en cuanto a relieve, clima, vegetación y geología, que ofrecen una amplia oferta de suelos con propiedades índices y mecánicas disimiles. El ejercicio profesional de la geotecnia requiere de una metodología detallada para el diseño geotécnico de las cimentaciones, consecuente con la naturaleza y propiedades de los suelos en el país, y que a su vez, garantice un proceso de cálculo seguro y racional.

Se requiere de investigaciones geotécnicas que permitan conocer las propiedades físicas del subsuelo, sus propiedades de resistencia al esfuerzo cortante, deformación y compresibilidad ante cargas estáticas, como su comportamiento ante cargas dinámicas. El uso de códigos y la caracterización físico mecánica de los materiales posibilita el compartir la información y la experiencia entre los ingenieros, e inclusive permite compilar información de utilidad común, como las microzonificaciones geotécnicas.

Hasta hace pocas décadas, los ingenieros geotecnistas sólo aplicaban la mecánica y la hidráulica para enfrentarse a los complejos problemas de la práctica, y mediante la utilización de unas mal llamadas "formulas clásicas". Éstas, mediante el uso de un factor de seguridad total determinístico, han permitido una adecuada y proporcionada relación entre la resistencia del subsuelo y el sistema elegido para la transmisión de las cargas de una edificación, con un margen de seguridad adecuado de estabilidad. La Ingeniería nacional requiere de códigos como la norma sismo resistente 2010 - NSR-10, basada en el modelo de estados límite de diseño, donde a partir de principios de diseño estructurados con reglas de aplicación asociadas, permitan dimensionar las cimentaciones con niveles de seguridad propios del país.

Palabras claves: estados límite, ladera, principios de diseño, reglas de aplicación, factor de seguridad

ABSTRAC

The Colombian territory is divided geographically in regions that present display own characteristics as far as relief, climate, vegetation and geology, that offer an ample supply of grounds with properties dissimilar mechanical indices and. The professional exercise of geotecnia requires of a detailed methodology for the geotechnical design of the layings of foundations, consequent with the nature and properties of grounds in the country, and that as well, guarantees a process of safe and rational calculation.

It is required of geotechnical investigations that allow to know the properties physical the subsoil, their properties of resistance to the shearing strain, deformation and compressibility before static loads, like his behavior before dynamic loads. The use of codes and the mechanical physical characterization of the materials the information and the experience between the engineers make possible sharing, and inclusively it allows to compile information of common utility, like the geotechnical microzonings.

Until it does few decades, the geotecnistas engineers only applied to the mechanics and the hydraulics to face the complex problems of the practice, and by means of the use of bad calls "you formulate classic". These, by means of the use of a determinístico total factor of safety, have allowed adapting and providing relation between the resistance of the subsoil and the system chosen for the transmission of the loads of a construction, with a safety margin adapted of stability. National Engineering requires of codes like norma sismo resistente 2010 –NSR10, based on the model of states design limit, where from the beginning of structured design with rules of associated application, allow to determine the proportions the layings of foundations with own levels of security of the country.

1.- INTRODUCCION

Los nuevos códigos de construcción en todo el mundo están empleando en los diseños factores de resistencia y carga. Estos factores se han venido empleando en numerosos códigos desde hace tiempo, principalmente en los códigos estructurales, sin embargo, su uso en geotecnia es mucho menos extendido y hay bastantes dificultades para hacerlo. Los códigos geotécnicos tienen por objeto fijar criterios y métodos de diseño y construcción de cimentaciones que permiten cumplir requisitos mínimos, pero sin que sean considerados manuales de diseño.

El estudio de los coeficientes de seguridad que se propone en este proyecto de investigación, es un requisito indispensable, si se quiere contar con reglamentos actualizados y acordes a las características de cada región, lo que garantizaría diseños seguros y racionales. Esto se puede lograr hacer a través de la teoría de seguridad o métodos probabilísticos, que tienen un respaldo matemático y estadístico eficiente, donde se toman en cuenta elementos importantes que hasta el momento no se han considerado en la normatividad geotécnica en Colombia.

2.- OBJETIVO DE LA INVESTIGACION

Como objetivo general de la investigación, nos planteamos formular reglas de aplicación determinísticas y probabilísticas para análisis de estabilidad y deformación de estructuras geotécnicas para edificaciones basadas en el modelo de estados límite de diseño.

3.- 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, mil años antes de Cristo, se dan las primeras recomendaciones para construir caminos y puentes. El siglo XVII trae las primeras contribuciones literarias sobre ingeniería de suelos publicada por el militar francés Vauban (1687) y titulada: reglas y formulas 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 (1776) quien relaciona la resistencia al corte con la cohesión y fricción del suelo, y el escocés Rankine (1857) quien presenta su teoría sobre empuje de tierras.

En 1866 Culman aplica gráficamente la teoría de Coulomb a muros de contención, y en 1871, Mohr 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, de Fellenius y de sus colegas suecos sobe estabilidad de taludes. Para esta misma época, instituciones de Estados Unidos, Inglaterra, Alemania y países nórdicos llevan a cabo numerosas investigaciones en mecánica de suelos publicadas en congresos internacionales y regionales, y mediante revistas especializadas.

El año 1925 se considera como el del inicio de la geotecnia clásica con la publicación de la primera gran obra de Karl Terzagui. 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 (1938) describe los métodos de relajación para resolver la ecuación de flujo en un medio poroso.

Taylor (1948), presenta una discusión sobre el uso de factores parciales en estabilidad de taludes, en cambio del factor de seguridad total. Hansen (1965) sugiere reemplazar el tradicional sistema de factores de seguridad totales por el mucho más consistente sistema de factores de seguridad parciales.

A partir de la adopción del código ACI, en Estados Unidos se pone en práctica un método de diseño por factores de carga y resistencia denominado LRFD. Los códigos AASHTO (1994), API (1993), NRC (1995) y ECS (1994) han incluido la implementación del LRFD para el diseño geotécnico.

El código AASHTO (1994, 1998) propone utilizar para el diseño de las cimentaciones las mismas cargas, factores de carga y combinaciones de carga empleadas para el diseño 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), ACI (1999), AISC (1994), API (1993), MOT (1992), NRC (1995), DGI (1985) y ECS (1994). 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.

Los proyectos de códigos o códigos que se pueden referenciar en la historia de la geotecnia nacional son:

- Especificaciones generales de construcción para edificios. IDU. 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. Uniandes. 1985. Capítulo C-1.
- Proyecto de decreto de normas mínimas para estudios de suelos de edificios en Cali. Asociación de Ingenieros del Valle. 1988.
- Código colombiano de construcciones sismo resistentes. Decreto 1400 de 1984.
- Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente. Decreto 33 de 1998.
- Código de Laderas de Barranquilla. Artículo 312 del Decreto 0154 del año 2000, donde se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla.
- Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. Decreto 193 del 8 de junio del 2006. Alcaldía de Santa Fe de Bogotá.
- Norma sismo resistente 2010. Decreto 926 del 2010

Hoy día, los nuevos códigos de geotecnia proponen metodologías para la determinación de factores de seguridad que reemplazan el tradicional sistema de factor de seguridad total por el sistema de factores de seguridad parciales. El método de diseño por factores de carga y resistencia, denominado Load and Resistence Factor Design (LRFD) es uno de los métodos 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.

4. ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO DE ESTADOS LÍMITE

La estructuración del modelo permite formular reglas de aplicación que pueden ser determinísticas y 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.

4.1 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 son:

- 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.
- Métodos prescriptivos. Fundamentan el diseño en reglas empíricas, usualmente conservadoras, que no demandan la realización de cálculos; o si los demandan, estos son limitados debido a que el dimensionamiento de la cimentación se realiza con la ayuda de tablas, cartas o especificaciones generales de diseño.
- 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.
- 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 ultima 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.
- 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, usualmente usando valores conservadores.

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.

4.2 Estructuración probabilística

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

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 (CUR, 1996; Simpson 1997; GCG, 1998).

La regla de aplicación asociada al segundo principio básico 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% (CUR, 1996;Simpson, 1997; GCG, 1998; Day, 1999). El límite inferior del 5% corresponde a los parámetros estabilizadores y el límite superior del 5% a los desestabilizadores.

4.2.1 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.

4.2.2 Criterio probabilístico de nivel I – explicito

Este criterio emplea factores de seguridad parciales racionales obtenidos mediante análisis de compatibilidad entre los criterios probabilísticos de nivel I – explicito 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.

4.2.3 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 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:

$$Z = R - S$$

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 $Z = 0$.

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.

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 determinada por la probabilidad de falla de cada uno de sus componentes, es decir, por la ocurrencia de diferentes mecanismos de falla.

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. 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:

$$\beta \text{ estructura} \leq \beta \text{ mecanismo}$$

La siguiente tabla presenta la relación entre las clases de seguridad y el índice de confiabilidad de diseño.

Tabla 1. 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: CUR (1996) y Everts & Luger (1997)

La tabla 2. 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.

Tabla 2. 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 II III	2,6 3,4 4,3	Bajo Medio Alto
2	I, II y III	1,8	-

FUENTE: CUR (1996)

5.- 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 APLICADO A LA NSR-10.

La Norma Sismo resistente 2010 –NSR-10 se estructura mediante la formulación de reglas de aplicación determinísticas, pero el objeto de este proyecto es implementar en esta norma reglas de aplicación probabilísticas que permitan establecer factores de seguridad parciales de diseño.

5.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑO.

Se presentan los principios básicos de diseño, los que incondicionalmente deben garantizarse mediante la implementación de reglas de aplicación asociadas de carácter determinísticas y probabilísticas. 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 cuidadosos estimativos de aquellos que realmente afectan la ocurrencia de los estados límite.

5.2 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

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.
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.
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 falla aceptables, expresadas en términos de índice de confiabilidad de diseño
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 la los derivados de manera que la probabilidad de un valor adverso no sea mayor al 5%.

5.3 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:

5.3.1 Selección del índice de confiabilidad de diseño

Está en función de la categoría de la estructura y el estado límite objeto de análisis como se presenta en las tablas 1 y 2

5.3.2 Selección de las acciones y la resistencia de acuerdo al 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 3.

Tabla 3. 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
• 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	• Acciones favorables • Acciones desfavorables	• Acciones permanentes • Acciones temporales • Acciones accidentales

5.3.3 Determinación de las distribuciones de probabilidad de las acciones y la resistencia

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:

$$Sk = \mu(S)[1 + 1{,}64\sigma(S)]$$

$$Rk = \mu(R)[1 - 1{,}64\sigma(R)]$$

$$\{Sd = Sk\Upsilon s\} \leq \{Rd = \frac{Rk}{\Upsilon r}\}$$

Donde:
Sk: Acción desestabilizadora característica; Rk: Resistencia característica; μ(S): Media aritmética de la acción desestabilizadora; μ(R): Media aritmética de la resistencia; σ(S): Desviación estándar de la acción desestabilizadora; σ(R): Desviación estándar de la acción resistencia; v(S): Coeficiente de variación de la acción desestabilizadora v(S) = σ(S)/ μ(S); v(R): Coeficiente de variación de la resistencia v(R) = σ(R)/ μ(R)
Sd: Acción desestabilizadora de diseño; Ys: Factor de seguridad parcial de mayoración aplicado a la acción desestabilizadora característica; Rd: Resistencia de diseño; Yr: Factor de seguridad parcial de reducción de capacidad aplicado a la resistencia característica

5.3.4 Determinación de la distribución de probabilidad de la función de margen de seguridad y cálculo de los coeficientes de sensibilidad de las acciones y la resistencia

$$\alpha i - \frac{\delta Z}{\delta xi}\frac{\sigma(xi)}{\sigma(Z)}$$

αi varía entre 0 (sin efecto) y +1 o -1 (máximo efecto).

5.3.5 Cálculo de los factores de seguridad parciales

Se determinan mediante el empleo de las ecuaciones:

$$\gamma r = \frac{(1 - 1{,}64vi)}{(1 - \alpha i\beta vi)}$$

$$\gamma s = \frac{(1 + \alpha i\beta vi)}{(1 + 1{,}64vi)}$$

Donde vi es el coeficiente de variación del parámetro de resistencia característico.

Para 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 es:

5.3.6 Determinación de los factores de seguridad parciales.

As tablas 18 y 19 resumen los factores de seguridad parciales de mayoración de las acciones características y de reducción de la capacidad de carga axial característica más consistentes registrada en la literatura geotécnica.

5.3.7 Determinación de μ(B)

La tabla 4 reproduce los valores típicos de los coeficientes de variación μ(B) y v(B) obtenidos por varios autores al analizar los métodos de cálculo más empleados en la práctica de la ingeniería de cimentaciones.

Tabla 4. Precisión de algunos métodos de cálculo de la capacidad de carga axial ultima de pilotes

Método	μ(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

5.3.8 Determinación del factor de ajuste de Ru

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

Donde:

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

5.3.9 Factor de seguridad global

El enfoque probabilístico genera un factor de seguridad global asociado a los factores de seguridad parciales de mayoración y reducción

$$FSG = Ys.Yr.\xi$$

6. CONCLUSIONES

Se requiere que los códigos geotécnicos colombianos utilicen el método de diseño por factores de carga y resistencia -LRFD, abandonando el tradicional método de diseño por esfuerzos admisibles o de trabajo. El numeral H.4.1 de la NSR 10 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.

La implementación del método LRFD se realiza mediante la implementación de factores de seguridad determinísticos y probabilísticos. Las normas colombianas utilizan reglas de aplicación determinísticas donde se utilizan factores de seguridad básicos e indirectos. Los estados límite se pueden garantizar mediante el empleo de factores de seguridad parciales probabilísticos que permitan un análisis más detallado de los parámetros que intervienen en el diseño; sin embargo, se recomienda que para la Norma Sismo Resistente 2010 - NSR-10 se utilicen simultáneamente los factores de seguridad totales determinísticos y los globales probabilísticos como medidas complementarias para un diseño geotécnico aceptable. Para la utilización única 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 debe considerar las propiedades físicas de los suelos, el ambiente local y las características de las estructuras y de los materiales de construcción.

Como aproximación a esta calibración, se encontró 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 y las normas Denmark DS 415, Eurocode 7, Canadá NBCC y USA ANSI A58, son similares y compatibles tanto para los factores de carga parciales como para los factores de resistencia.

Los factores de seguridad parciales conducen a la obtención de un valor único denominado factor de seguridad global. La literatura consultada en este proyecto de investigación establece 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 sean comparados con los factores de seguridad total utilizados hasta ahora. Para esto se sugiere se continúe este proyecto de grado, donde a partir de los parámetros geotécnicos conocidos para los suelos de la región y el país y de 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 total determinístico.

BIBLIOGRAFIA

BERDUGO DE MOYA, Iván Rafael. Aplicación de criterios probabilísticos de niveles I – explicito 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.

DUNCAN J. MICHAEL. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. Texas USA. 1999

EUROCODE 7. Geotechnical Design, General rules. European Committee for Standardization. Copenhagen. 1993

GONZALEZ G, Alvaro J. Factores de seguridad…por qué tantos?. V encuentro de ingenieros de suelos y estructuras. Bogotá. 2009

GONZÁLEZ C, Ana Virginia y QUEVEDO Sotolongo. Aplicación de la teoría de seguridad al diseño de cimentaciones en arenas. Chequeo de linealidad. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 No2. Santa Clara, Cuba. 2007

MEYERHOF, G. Geoffrey. Evolution of Safety Factors and Geotechnical Limit State Design. Texas USA. 1994.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente –NSR-10. Bogotá.2010

ROCCA, Ricardo. La evolución a largo plazo de la Ingeniería Geotécnica. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Universidad de Puerto Rico. Puerto Rico. 2009.

SCOTT, B. J Kim y SAGADO, R. Assessment of current load factors for use in geotechnical load and resistance factor design. Journal of geotechnical and geo environmental engineering. 2003

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.