

Diseño geotécnico de cimentaciones aplicando factores de carga y resistencia (LRFD)

Geotechnical design of foundations applied load and resistance factors (LRFD)

Arias V. Carlos A., Ingeniero Civil

Durán G. Jorge E., Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería

RESUMEN: El presente trabajo explora la aplicación en Colombia de métodos estadísticos en el diseño geotécnico de cimentaciones y específicamente el método de diseño por confiabilidad llamado “Load and Resistance Factors Design – LRFD”, el cual se ha incorporado en las normas de diseño de Estados Unidos y de Europa hace más de 10 años en geotecnia y más de 20 años en diseños estructurales. Esta metodología ha sido desarrollada principalmente por la “American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO” en Estados Unidos y por los Euro códigos en la Unión Europea.

ABSTRACT: This paper explores the application in Colombia of statistical methods in geotechnical design of foundations and specifically the design method for reliability called "Load and Resistance Factors Design - LRFD," which has been incorporated into the design standards of the US and Europe more than 10 years over 20 years in structural design and geotechnical ago. This methodology has been developed mainly by the "American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO" in the United States and the Euro codes in the European Union.

PALABRAS CLAVE: LRFD, Factor de seguridad, Diseño por confiabilidad, NSR-10, Esfuerzos admisibles, Factores de carga, Factores de resistencia.

1 INTRODUCCIÓN

El ingeniero geotecnista debe lidiar con una cantidad importante de interrogantes al momento de definir o establecer los parámetros de diseño que se utilizarán en los estudios geotécnicos y es necesario reflexionar sobre aspectos como:

- ¿Cuál es el objetivo de los factores de seguridad?
- ¿Cómo se establecieron los valores indicados en las normas?
- ¿El Factor de seguridad cubre todas las incertidumbres que se generan en el modelo geológico – geotécnico, al ser éste realizado con pocas perforaciones?
- El factor de seguridad analiza el tipo de ensayo de campo realizado y su aplicabilidad a los materiales encontrados
- El factor de seguridad valora la calidad y cantidad de las muestras recuperadas
- El factor de seguridad analiza la calidad, la cantidad y la variabilidad de los resultados del laboratorio
- El factor de seguridad discrimina cuando los parámetros geotécnicos son obtenidos a partir de

correlaciones y cuando son establecidos con ensayos especiales de laboratorio

- El factor de seguridad estudia la incertidumbre en la determinación de las cargas permanentes, no permanentes, extremas y la combinación que se puedan dar entre ellas
- El factor de seguridad analiza los resultados obtenidos en los cálculos al aplicar diferentes metodologías para el mismo tipo problema considerado
- El factor de seguridad cubre la inexperiencia o el desconocimiento de los ingenieros diseñadores
- El factor de seguridad tiene en cuenta las deformaciones a corto y largo plazo y desplazamientos resultantes.

Los anteriores cuestionamientos, sustentan la siguiente pregunta frente al ejercicio geotécnico: ¿Los diseños geotécnicos están sobre-diseñados, sub-diseñados o correctamente diseñados? Tal vez la respuesta obvia es decir: “Pues están bien, porque las estructuras no se han caído”, pero ¿Las estructuras han funcionado correctamente?

Por lo anterior se considera adecuado abordar el tema del factor de seguridad geotécnico desde una perspectiva que permita analizar las cargas a las cuales está expuesta una cimentación bajo estados límite de servicio, estados límite últimos y cargas extremas. Estas condiciones de diseño son recogidas por el método de diseño “Factores de Carga

y Resistencia – LRFD”, el cual se soporta en la teoría de la confiabilidad.

En Colombia la aplicación del factor de seguridad geotécnico se ha basado en un enfoque empírico a partir de las recomendaciones internacionales sobre el tema. Las normas de diseño que se utilizan aplican en la actualidad dos conceptos, el primero de ellos es un enfoque de factor de seguridad global aplicado a la capacidad de carga calculada mediante las expresiones ampliamente utilizadas en diseño. El segundo enfoque corresponde con la aplicación de un factor básico directo aplicado al parámetro geotécnico.

Estos conceptos conducen a que los diseños realizados sobre materiales con un comportamiento granular estén controlados por el factor de seguridad básico directo y los diseños realizados sobre materiales cohesivos estén controlados por el factor de seguridad indirecto.

Particularmente el código colombiano de diseño sísmico de puentes del año 1995, permite la aplicación de los procedimientos de diseño avalados por la AASHTO en Estados Unidos. Esta situación generó alguna confusión entre los ingenieros diseñadores, debido a que la norma no aclaró suficientemente la implementación de estos procedimientos y en algunos casos se consideró que solamente era aplicable al diseño estructural. Como se analizará más adelante este concepto es errado y los diseños que se realicen aplicando metodologías basadas en la confiabilidad deben abarcar tanto los aspectos estructurales como los geotécnicos en un único modelo de estudio.

En el desarrollo del presente documento se abarcarán temas como:

- Métodos de diseño
- Evolución del factor de seguridad
- Estados límite de diseño
- Normas de diseño para Colombia
- Normas de referencia para Colombia
- Métodos para la calibración de factores de resistencia
- Factores de resistencia propuestos
- Comparación de resultados (Ejemplos de diseño)
- Aplicación de LRFD en Colombia. ¿Cómo empezar?
- Planteamiento de futuras líneas de investigación
- Factores de resistencia propuestos

2 DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES APLICANDO LRFD

2.1 Métodos de diseño

Para la aplicación del factor de seguridad existen tres enfoques de diseño que abordan el tema aplicando dos enfoques: el primero de ellos consiste en la aplicación de un factor de seguridad global aplicado a la capacidad de carga de una cimentación y el segundo consiste en aplicar factores de seguridad o de reducción de resistencia parcialmente, es decir, separándolo de acuerdo con las diferentes condiciones de diseño. Este último enfoque se analiza desde dos perspectivas el determinístico y el estocástico.

2.1.1 Diseño por esfuerzos admisibles

El método de diseño por esfuerzos admisibles busca la estabilidad de las estructuras bajo condiciones de servicio limitando la resistencia a valores especificados. En diseños geotécnicos corresponde con la aplicación de factores de seguridad globales a la resistencia calculada, comparándola con las cargas de trabajo de la estructura. La ecuación (1) presenta el método de diseño de los esfuerzos admisibles o esfuerzos de trabajo.

$$\Sigma DL + \Sigma LL \leq R_u / FS \quad (1)$$

Dónde: DL: Carga muerta, LL : Carga viva, Ru: Resistencia última, F.S. : Factor de seguridad

2.1.2 Diseño por factores de carga

Esta metodología utiliza factores de amplificación de carga y factores de reducción de resistencia. La aplicación de los factores de reducción de resistencia dependen del comportamiento esperado en el suelo (Granular o Cohesivo) y los factores de amplificación de la carga dependen del tipo de carga (Muerta, Viva, Ambientales, Agua), y tipo de obra (Superficial, Profunda, Offshore).

$$\gamma(\Sigma \beta_{DL} DL + \Sigma \beta_{LL} LL) \leq \Phi R_u \quad (2)$$

Dónde: γ , β_{DL} , β_{LL} : Factores de carga, DL : Carga muerta, LL : Carga viva, Ru : Resistencia última, Φ : Factor de resistencia.

Con la aplicación de este método se pueden utilizar diferentes factores de amplificación para cada combinación de carga existente en el diseño. Las desventajas que existen en la aplicación de este método consisten en que es más complejo que el diseño por esfuerzos de trabajo y no existe ninguna evaluación del riesgo basada en la teoría de la confiabilidad.

2.1.2.1 Diseño por factores de carga y resistencia

Desde hace más de 40 años algunos países como Estados Unidos, Canadá, México, Chile y la Unión Europea, entre otros, han introducido en sus códigos de diseño y construcción el método de Factores de Carga y Resistencia (Load and Resistance Factors Design, "LRFD"), con un enfoque claro y concreto hacia la confiabilidad de las estructuras.

La teoría de la confiabilidad, puede resumirse así: La palabra confiabilidad designa la probabilidad de un sistema para cumplir satisfactoriamente con la función para la que fue diseñado, durante determinado período y en condiciones específicas de operación. Si un evento interrumpe ese funcionamiento, se denomina falla.

Aplicar la teoría de la confiabilidad en el análisis más simple de diseño por LRFD consiste en utilizar factores de amplificación en la carga y factores de reducción en la resistencia, de tal forma que se logre un equilibrio entre la condición de análisis y la resistencia esperada en el suelo de fundación, logrando niveles uniformes de seguridad, para las diferentes condiciones de funcionamiento de las obras.

En la ecuación (3) presenta la expresión general del método LRFD.

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \Phi R_u \quad (3)$$

Dónde: η_i : Modificadores de carga por efectos de ductilidad, redundancia e importancia operativa, γ_i : Factores de carga, Q_i : cargas impuestas en el sistema, R_u : Resistencia última, Φ : Factor de resistencia.

2.2 Evolución del factor de seguridad

El concepto de factor de seguridad se le atribuye a Belidor en 1729 (Meyerhof, 1994). Posteriormente, Coulomb en 1773 propuso valores para el factor de seguridad, indicando que para los problemas de capacidad se usara 1,25 y para diseños relacionados con volcamiento el valor del factor de seguridad a utilizar era 1,50.

Para 1925 Terzaghi unificó los conceptos sobre mecánica de suelos, dando origen a la mecánica de suelos moderna. En el año de 1926, Krey propuso valores para el factor de seguridad dividiéndolos en problemas de estabilidad, con un F.S.=1,50, y problemas de capacidad última de fundaciones, con valores de F.S. entre 2 y 3. En algunos códigos de diseño utilizados en el mundo, incluido el de Colombia, los valores propuestos por Krey siguen siendo vigentes.

En 1943, Terzaghi dividió los análisis geotécnicos en dos clases. La primera clase estaba relacionada con las

condiciones antes del fallo por flujo plástico, la cual ocurre en problemas de estabilidad y la segunda clase relacionada con las deformaciones en el suelo, es decir, problemas de elasticidad.

A partir de esta categorización, en 1948 Terzaghi y Peck propusieron factores de seguridad totales para el diseño de estabilidad y para el diseño de capacidad y deformación. Paralelamente Taylor indicó que los factores de seguridad se aplicaran a la cohesión y a la fricción de manera separada.

Brinch Hansen retomó las ideas de Taylor en 1953 y luego, en 1956, propuso coeficientes parciales de seguridad de acuerdo con el tipo de carga y el parámetro de resistencia. Los estudios sobre factores parciales fueron complementados por Pugsley (1955), Freudenthal (1956), Borges y Castanheta (1968), quienes aplicaron métodos semi-probabilísticos.

En resumen, desde 1729 hasta 1968 evolucionaron dos conceptos del factor de seguridad. El primero de ellos es el factor de seguridad global resumido por Terzaghi y Peck (1948) y el segundo corresponde a los coeficientes parciales de seguridad propuestos por Brinch Hansen (1953 – 1956).

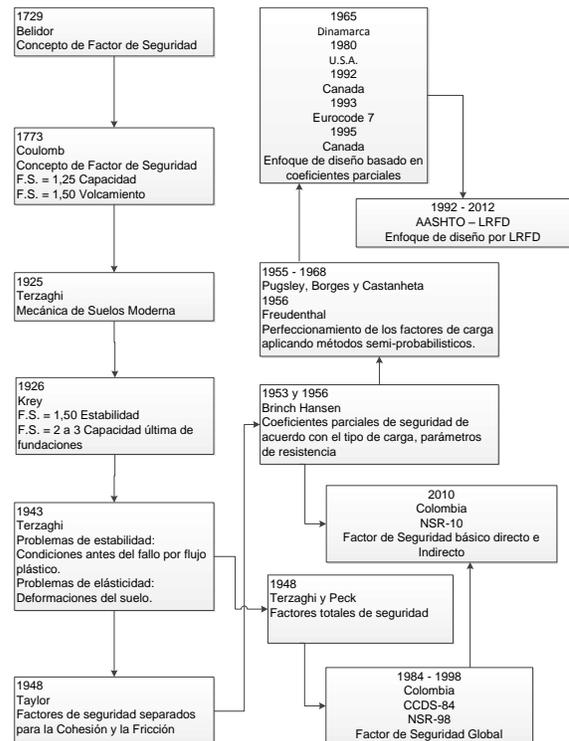


Figura 1 Evolución histórica del factor de seguridad.

2.3 Estados límite de diseño

Los estados límite de diseño son aquellas condiciones impuestas por el diseñador de una estructura para su

funcionamiento normal o extremo, de tal forma que si las condiciones de operación superan las condiciones de diseño la estructura entra en condición de falla.

De acuerdo con la ASSTHO se presentan cuatro estados límite de diseño: estado límite de servicio, estado límite de resistencia, estado límite para cargas extremas y estado límite para fatiga. Para cada estado límite se presentan combinaciones de carga que puedan conducir a la estructura a una condición de falla.

2.3.1 Estados límite de servicio

Los estados límite de servicio están asociados con el uso diario de las estructuras y la percepción o comodidad que tengan los usuarios de la misma. Para esta condición de diseño se deben analizar aspectos como deformaciones, vibraciones, fisuras y durabilidad. En la Tabla 1 se presentan los principales estados límite de servicio que se deben analizar.

Tabla 1 Estados límite de servicio

ESTADO LÍMITE	DESCRIPCIÓN
Estados Límite de Servicio (ELS)	ELS de deformación excesiva. ELS de vibración excesiva. ELS de fisuración excesiva. ELS de durabilidad

2.3.2 Estados límite de resistencia

Los estados límite de resistencia corresponden a la verificación de la estructura frente a condiciones de resistencia última. En estas condiciones se deben analizar aspectos como falla por capacidad portante, falla por esfuerzos cortantes, falla por plastificación de los materiales y fallas por estabilidad al volcamiento o al deslizamiento. En la Tabla 2 se presentan los principales estados límite de resistencia que se deben analizar en una estructura.

Tabla 2 Estados límite de fatiga

ESTADO LÍMITE	DESCRIPCIÓN
Estados Límite Últimos (ELU)	ELU de agotamiento por solicitación normal (flexión, tracción, compresión) ELU de agotamiento por solicitación tangente (cortadura, torsión). ELU de inestabilidad elástica (Pandeo, etc.) ELU de equilibrio (equilibrio mecánico: vuelco, deslizamiento, etc.).

2.3.3 Cargas extremas y estados límite de fatiga

Los estados límite por condiciones extremas están asociados a eventos sísmicos que, para el caso de diseños geotécnicos, se traduce en una amplificación momentánea de las cargas muertas y vivas que actúan sobre la estructura.

La condición límite de fatiga hoy día está asociada solamente a los diseños estructurales, pero es posible que en un futuro este estado límite de diseño se aplique a los diseños geotécnicos en casos como vibraciones sobre fundaciones o cargas repetitivas en complejos industriales.

2.4 Normas de diseño para Colombia

A continuación se presenta un breve resumen de la metodología utilizada en los códigos colombianos desde 1984 hasta la fecha, para la aplicación del factor de seguridad en los diseños geotécnicos.

2.4.1 Código de 1984

La primera norma colombiana que estableció los criterios a seguir en el diseño de estructuras sismo resistentes fue promulgada mediante el decreto 1400 de 1984, a raíz de la tragedia ocurrida en la Ciudad de Popayán el 31 de Marzo de 1983.

Los aspectos geotécnicos no fueron abarcados con profundidad y solamente se encuentran dos referencias claras para el control geotécnico de los diseños. En la Tabla C.9.2 se fijan las deflexiones máximas permisibles, las cuales permiten controlar los asentamientos diferenciales de las estructuras y en el numeral E.5.1.1 se establecen los requisitos para edificaciones de uno y dos pisos que para la época era el tipo de construcción que con mayor frecuencia se construía.

2.4.2 NSR-98

La norma sismo-resistente de 1998 (NSR-98), acogió para el análisis de la seguridad geotécnica de las obras civiles el estudio de los estados límites, evaluando las condiciones críticas que puedan presentarse durante la construcción y vida útil de las estructuras.

En la Tabla 3, se presentan los factores de seguridad utilizados por la NSR-98, para los análisis de capacidad portante, deslizamiento y falla de fondo.

Tabla 3 Factores de seguridad NSR-98

HIPÓTESIS	F.S.
CAPACIDAD PORTANTE (H.4.1.7)	
Carga Muerta + Carga Viva Normal	3.0
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	2.0
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo Diseño	1.2
ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN (H.4.2.11)	
Deslizamiento en suelos granulares	1.5
Deslizamiento en suelos cohesivos	2.0
Volcamiento en suelos granulares	3.0
Volcamiento en suelos cohesivos	2.0
Capacidad portante	2.5
Estabilidad intrínseca	1.6
Estabilidad general del sistema	1.5
EXCAVACIONES (H.4.3.4)	
Falla de fondo en condiciones estáticas	1.5
Falla de fondo en condiciones con sismo	1.1
ASENTAMIENTOS TOTALES (20 Años)	
Construcciones aisladas	30 cm
Construcciones medianeras	15 cm
ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES (Según tipo de Construcción)	
Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	1/1000
Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería	1/500
Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	1/300
Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	1/160

2.4.3 NSR-10

La NSR-10 plantea dos enfoques en la aplicación del factor de seguridad. El primero de ellos corresponde a un factor básico directo aplicado a los parámetros del suelo (Cohesión, Fricción). El segundo enfoque corresponde al factor de seguridad indirecto, que es el mismo factor de seguridad global que tradicionalmente se ha utilizado en los diseños geotécnicos. (Ver Tabla 4)

La aplicación de estos dos criterios conduce a que los materiales con un comportamiento granular están controlados por el factor de seguridad básico directo y los materiales con comportamiento cohesivo están controlados por el factor de seguridad global. Los materiales intermedios pueden estar controlados por alguno de los factores, dependiendo de la fracción dominante.

Tabla 4 Factores de seguridad NSR-10

Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos				
CONDICIÓN	F _{SBM}		F _{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo Estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes - Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes - Condición Seudo-Estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Factores de Seguridad Indirectos Mínimos				
Condición		F _{SICP} Mínimo		
Carga Muerta + Carga Viva Normal		3.00		
Carga Muerta + Carga Viva Máxima		2.50		
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo Estático		1.50		
Valores máximos de asentamientos diferenciales calculados, expresados en función de la distancia entre apoyos o columnas,.				
Tipo de construcción			δ _{max}	
Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores			1/1000	
Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería			1/500	
Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores			1/300	
Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores			1/160	

2.5 Normas de referencia para Colombia

A continuación se presenta en la Tabla 5 un resumen de las normas internacionales más representativas que comúnmente son utilizadas como referencia en Colombia para complementar o validar los diseños estructurales y geotécnicos que se realizan en el país

Tabla 5 Normas internacionales para diseño estructural y geotécnico

PAIS	NOMBRE	AÑO
U.S.A.	AASHTO	1931, con actualizaciones cada 4 años aprox.
U.S.A.	ANSI A58	1980
Dinamarca	DS 415	1965
Unión Europea	Eurocódigo 7	1993
Canadá	CFEM	1992
Canadá	NBCC	1995
México		

2.5.1 AASHTO-2012 y EUROCÓDIGOS

Estas normas han desarrollado de manera profunda la aplicación del concepto de confiabilidad en sus criterios de diseño desde hace más de 20 años, estableciendo factores de reducción de resistencia para los diseños geotécnicos. En la aplicación del diseño por confiabilidad es necesario que las combinaciones de carga para cada uno de los estados límite de diseño estén claramente establecidas, de tal forma que se pueda equilibrar el diseño con los respectivos factores de reducción de resistencia.

2.6 Calibración de factores de resistencia

La aplicación de métodos basados en la teoría de la confiabilidad puede representar algunas ventajas en el diseño de cimentaciones superficiales o profundas, pero es necesario realizar una calibración de los factores de amplificación de carga y de reducción de resistencia para cada región en donde se pretenda implementar.

Como se explicó anteriormente el diseño por confiabilidad busca equilibrar en el mismo modelo las cargas impuestas sobre el sistema amplificándolas en función de la incertidumbre que se posee en su determinación y paralelamente aplicar una reducción de la resistencia de acuerdo con la variabilidad que poseen aspectos como la naturaleza misma del suelo, los procedimientos empleados en campo y en laboratorio para determinar los parámetros geotécnicos, las diferentes metodologías que existen para el cálculo de la resistencia al corte y la experiencia misma del ingeniero diseñador. A continuación se presentan de manera resumida algunos procedimientos aplicables en la calibración de este modelo.

2.6.1 Calibración a partir de ASD

La forma más rápida de establecer un orden de magnitud para los factores de amplificación y de reducción de resistencia consiste en igualar el concepto de diseño por

esfuerzos admisibles (ASD), con el concepto de diseño por confiabilidad, como se muestra en la Ecuación 4

$$\frac{R_n}{F.S.} \geq \sum Q_i \leftrightarrow \phi R_n \geq \sum \eta_i \gamma_i Q_i \quad (4)$$

Dónde: R_n : Resistencia nominal, Q_i : Cargas impuestas sobre el sistema, $F.S.$: Factor de seguridad global, ϕ : Factor de reducción de resistencia, η_i : Efectos de ductilidad, redundancia e importancia operativa, γ_i : Factores de amplificación de carga

El desarrollo de la expresión matemática para el cálculo del factor de reducción de resistencia (ϕ), se muestra en la ecuación 5. A partir de esta expresión se puede establecer que existe una fuerte dependencia de la relación que existe entre la carga muerta y la carga viva, es decir, entre las cargas permanentes y las no permanentes.

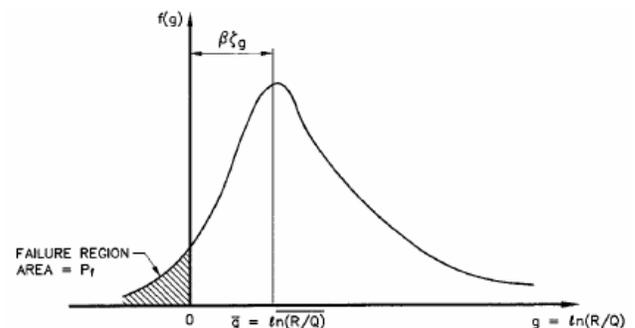
$$\phi = \frac{\gamma_D(Q_D/Q_L) + \gamma_L}{FS(Q_D/Q_L + 1)} \quad (5)$$

Dónde: γ_D : Factores de carga muerta, γ_L : Factores de carga viva, Q_D : Carga muerta, Q_L : Carga viva, FS : Factor de seguridad global

2.6.2 Análisis de confiabilidad simple

Para desarrollar este concepto se parte de la hipótesis original del método, la cual consiste en establecer la función de densidad de probabilidad para cargas y resistencias y a partir de éstas funciones establecer una nueva función de probabilidad que relacione las cargas y la resistencia. En esta nueva función se involucra el concepto de índice de confiabilidad (β), que representa la distancia que el valor medio de la función $F(g)$ se aleja de la zona de falla. (Ver Figura 2)

Figura 2 Definición del índice de confiabilidad β



El índice de confiabilidad debe estar asociado a una probabilidad de falla de un sistema y una relación comúnmente aceptada entre el índice de confiabilidad, β , y la probabilidad de falla, P_f , fue desarrollada por Rosenblueth y Esteva (1972) para valores de distribución lognormal de R y Q utilizando la ecuación 6:

$$p_f = 460 \exp(-4.3 \times \beta) \quad (6)$$

Dónde β , toma valores entre $2 < \beta < 6$

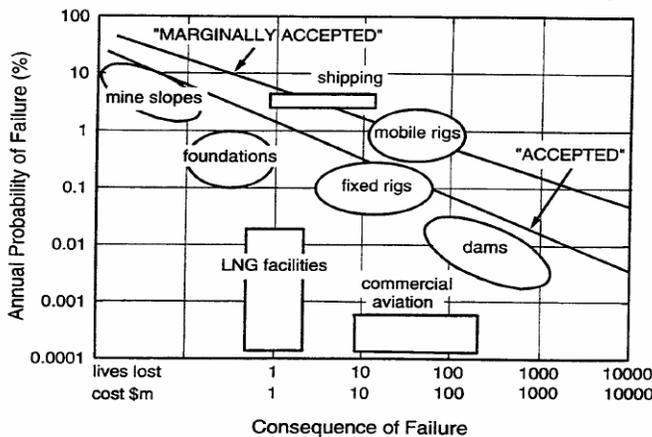
En la Tabla 6 se presenta la relación entre la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad asociado.

Tabla 6 Relación entre la probabilidad de falla y el Índice de confiabilidad β

Índice de Confiabilidad (β)	Probabilidad de Falla (p_f)
2.5	0.99×10^{-2}
3.0	1.15×10^{-3}
3.5	1.34×10^{-4}
4.0	1.56×10^{-5}
4.5	1.82×10^{-6}
5.0	2.12×10^{-7}
5.5	2.46×10^{-8}

En la Figura 3, se observa la relación entre la probabilidad de falla anual de las estructuras relacionadas con las pérdidas de vidas humanas y diseño.

Figura 3 Valores empíricos de probabilidad de falla en obras civiles (AASHTO-2012)



Como se mencionó anteriormente los procedimientos de calibración comienzan en la definición de la función de probabilidad de frecuencia que poseen las cargas y la resistencia, a priori esto no es fácil de determinar sin contar con el apoyo de análisis estadístico sobre las variables que intervienen en el diseño.

Bajo estas condiciones es posible que la función de probabilidad de frecuencia que relaciona las cargas y las resistencias corresponda a una función normal para cargas y resistencias, lognormal para cargas y resistencias o normal para cargas y lognormal para resistencias.

A partir de los parámetros estadísticos que definen la nueva función analizada se puede llegar a expresiones para la determinación del factor de reducción de resistencia de acuerdo con la condición estudiada. En las Ecuaciones 7, 8

y 9 se presentan las expresiones aplicables en estos análisis. Así: Ecuación 7 (Normal para carga y resistencia), Ecuación 8 (Normal para carga y Lognormal para resistencia), Ecuación 9 (Lognormal para carga y resistencia)

$$\phi = \frac{\lambda_R \left(\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L \right)}{\left(\lambda_{Q_D} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{Q_L} \right) + \left(\beta \sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_R^2} / Q_L \right)} \quad (7)$$

$$\phi \approx \frac{\lambda_R \left(\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L \right) [1 - k(COV_R)] [1 - \ln[1 - k(COV_R)]]}{\left(\lambda_{Q_D} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{Q_L} \right) + \beta_T \sqrt{\left\{ \sigma_R [1 - k(COV_R)] \right\}^2 + \sigma_Q^2}} \quad (8)$$

$$\phi = \frac{\lambda_R \left(\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L \right) \sqrt{\frac{1 + COV_{Q_D}^2 + COV_{Q_L}^2}{1 + COV_R^2}}}{\left(\lambda_{Q_D} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{Q_L} \right) \cdot \exp \cdot \beta_T \sqrt{\ln \left[(1 + COV_R^2) (1 + COV_{Q_D}^2 + COV_{Q_L}^2) \right]}} \quad (9)$$

Dónde:

Desviación estándar de la carga	σ_Q
Desviación estándar de la resistencia	σ_R
Factor de carga muerta	γ_D
factor de carga viva	γ_L
Coefficiente de variación de la carga muerta	COV_{Q_D}
Coefficiente de variación de la carga viva	COV_{Q_L}
Coefficiente de variación de la resistencia	COV_R
Sesgo de la resistencia	λ_R
Sesgo de la carga muerta	λ_{Q_D}
Sesgo de la carga viva	λ_{Q_L}
Indicé de confiabilidad	β
Factor similar a β (Usualmente = 2)	K

Este tipo de análisis es el más simple de realizar que involucre análisis estadístico, sin embargo es necesario que para cada una de las variables se realice un análisis estadístico completo.

2.6.3 Primer orden segundo momento

El denominado método FOSM ("First-Order, Second Moment") utiliza la serie de Taylor para la determinación de la distribución de probabilidad de una función con un número de variables aleatorias.

El truncamiento de la función de expansión de la Serie de Taylor forma la base de este método y las salidas y entradas de datos son expresadas por valores esperados y desviación estándar. Las ventajas de este tipo de solución radican en que los cálculos matemáticos son simplificados y se requiere apenas del conocimiento de los valores de los momentos de las distribuciones estadísticas de las variables que forman la función.

2.6.4 Estimaciones puntuales de Rosenblueth

Rosenblueth propuso un método aproximado que simplifica mucho la tarea de estimar la media y la desviación estándar del factor de seguridad y solamente compromete ligeramente la exactitud cuando las dispersiones de las variables envueltas son muy grandes. Consiste en estimar los momentos (media, desviación estándar, coeficiente de asimetría, etc.) de la variable dependiente en función de las variables aleatorias independientes, para las cuales se conocen por lo menos dos momentos, media y desviación estándar (o por lo menos sus estimativas), sin la necesidad de conocer las distribuciones de probabilidad completas de las variables independientes o de la dependiente.

2.6.5 Simulaciones de Montecarlo

El método de Monte Carlo es una metodología que permite determinar la función de distribución de frecuencia de la variable dependiente analizada mediante la generación de números aleatorios uniformes que representan las variables independientes envueltas.

El método de Monte Carlo puede ser presentado como un método exacto, pues a partir del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes, valores de estas variables podrían ser obtenidos por medio de un generador de números aleatorios y valores de la variable independiente calculados a partir de estos.

2.7 Factores de resistencia propuestos

Como se ha podido analizar en los numerales anteriores, establecer los factores de reducción de resistencia es una tarea muy compleja que requiere de gran cantidad de información de las etapas de exploración de campo, ensayos de laboratorio, diseños geotécnicos, control de obra, pruebas de carga y análisis de resultados.

Para la estimación de factores de reducción de resistencia cercanos a los aplicables en el ámbito colombiano se siguió el siguiente procedimiento planteado por Foye, Jaoude, & Salgado, en su texto “Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites, 2004”:

1. Identificar las ecuaciones utilizadas para calcular la resistencia de la fundación
2. Identificar las variables que componen las ecuaciones de resistencia
3. Identificar las cantidades mensurables (Ensayos geotécnicos) asociadas con cada una de las variables utilizadas como datos de partida

4. Identificar todas las incertidumbres que componen cada variable, incluyendo las transformaciones
5. Evaluar las incertidumbres compuestas usando los análisis estadísticos disponibles (Literatura, ensayos/análisis, investigación actual)
6. Utilizar las incertidumbres para seleccionar funciones de densidad de probabilidad (PDF) para el análisis de confiabilidad
7. Seleccionar las variables de diseño representativas (Dimensiones, resistencias, cargas)
8. Ejecutar el análisis de confiabilidad para obtener factores de resistencia (Para este caso se realizaron simulaciones de Montecarlo para determinar las propiedades de la función de densidad de probabilidad de la resistencia y luego mediante análisis de confiabilidad simple se calculó el factor de resistencia).
9. Ajustar los factores de resistencia para los factores de carga determinantes.
10. Repetir el análisis de confiabilidad para abarcar un rango de condiciones de diseño representativas.

A partir de la recomendación de la AASHTO se evaluaron los factores de reducción de resistencia tomando la función de densidad de probabilidad que relaciona la carga y la resistencia como una función Lognormal.

Adicionalmente se asumió como marco de referencia las normas AASHTO-2012, NSR-10 y el CCDSP-95 para la definición de los factores de amplificación de carga.

Se calcularon los coeficientes de variación de la resistencia a partir del estudio de una base de datos con 95 000 registro de ensayos de laboratorio y campo a partir de los cuales se calcularon cimientos superficiales y profundos hipotéticos apoyados sobre estos materiales.

Los coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos son los presentados en la Tabla 7.

Tabla 7 Coeficientes de variación para cimientos superficiales y Profundos

TIPO DE CIMIENTO	Parámetro	COV
SUPERFICIAL	ϕ	0.52
	Su	0.63
	c', ϕ	0.45
PROFUNDO	Su	0.53
	N ₁₆₀	0.47

A partir de los coeficientes de variación y sesgo para la resistencia se calcularon los factores de resistencia para cada una de las normas tomadas como marco de

referencia. En la Tabla 8, se presentan los valores del factor de resistencia calculado.

TIPO DE CIMIENTO	Parámetro	COV	CON FACTORES DE CARGA DE			AASHTO
			AASHTO	NSR-10	CCDSP-95	
SUPERFICIAL	ϕ	0.52	0.42	0.39	0.51	0.45
	Su	0.63	0.25	0.23	0.30	0.45
	c', \square	0.45	0.38	0.36	0.47	0.45
PROFUNDO	Su	0.53	0.31	0.29	0.38	0.45
	N ₁₆₀	0.47	0.47	0.44	0.57	0.45

2.8 Aplicación de LRFD en Colombia. ¿Cómo empezar?

Las ventajas que brinda la aplicación de LRFD están encaminadas a lograr edificaciones confiables y con una baja probabilidad de falla, de acuerdo con el estado límite que se requiera evaluar. Como se ha visto en el caso europeo y en el norteamericano, la aplicación de este procedimiento de diseño no es fácil y requiere de gran tiempo debido a la cantidad de información necesaria para la calibración de los factores de resistencia.

De acuerdo con lo anterior, para lograr la aplicación de esta metodología se deben adelantar esfuerzos en dos áreas principalmente:

- Universidades
- Normatividad

2.8.1 Universidades frente al LRFD

Teniendo en cuenta que en la filosofía del método está el garantizar confiabilidad en las obras y una probabilidad de falla acorde con el tipo de obra, es necesario que en las Universidades que dictan programas de especialización en Geotecnia y se implemente en las mallas curriculares asignaturas relacionadas con probabilidad y estadística aplicadas a geotecnia, ya que son las universidades las encargadas de aportar los conocimientos necesarios para que los profesionales realicen la transición entre los dos métodos, sin tener mayores complicaciones.

A partir de ese conocimiento se podrá analizar la manera en que se deben adelantar los trabajos geotécnicos y la forma correcta de establecer los factores de resistencia según el caso de análisis. En la Figura 4 se presenta la secuencia que se considera debe seguir el diseño geotécnico, cuando se quieren determinar los factores de

resistencia por utilizar en diseño. Estas áreas corresponden con las que se deben reforzar en los programas de Maestría y Especialización geotécnica.

Figura 4 Secuencia típica en el desarrollo de un diseño geotécnico aplicando LRFD



2.8.2 Normatividad frente al LRFD

Como se explicó anteriormente las normas colombianas encargadas de regular los diseños geotécnicos (NSR-10, CCCP-95), van por caminos diferentes y, aunque es lógico pensar, que los tipos de obras no son comparables, no por ello se debe descartar un método que apunta hacia mejores resultados, por ejemplo el LRFD.

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, por medio de los Comités AIS 100 (Diseño y Construcción Sismo Resistente de Edificaciones) y AIS 200 (Diseño y Construcción Sismo Resistente de Puentes) es la encargada de preparar las normas aplicables en Colombia en temas relacionados con diseños estructurales y geotécnicos de Edificaciones y Puentes, respectivamente, y es su deber armonizar las normas para lograr que los factores de seguridad y las probabilidades de falla sean homogéneas, independientemente del tipo de estructura diseñada o de la norma aplicada. Por lo tanto se deben unificar los criterios aplicados en las normas vigentes.

Adicionalmente es necesario que exista un mayor control sobre la gestión realizada por las curadurías por parte del Gobierno y que exista capacitación permanente por parte de las universidades a los funcionarios encargados de aprobar las licencias de construcción.

Para lograr la implementación de LRFD se requiere gran cantidad de información geotécnica y estructural. Por lo tanto, es necesario que desde la normatividad se cree una entidad que regule aspectos como:

- Calidad de los estudios de suelos. Las empresas consultoras deberán reportar los estudios de suelos realizados ante esta entidad, garantizando la reserva necesaria para el cliente que haya contratado los servicios, pero aportando información necesaria para analizar estadísticamente los materiales encontrados. Al verificar la calidad se observarán aspectos como cantidad y profundidad de investigaciones geotécnicas, cantidad y calidad de muestras recuperadas, dispersión de los datos recopilados en campo y laboratorio.
- Instrumentación geotécnica. Es necesario que los proyectos, en general, cuenten con instrumentación geotécnica suficiente, la cual permitirá analizar aspectos como niveles de deformación que presente la estructura, cargas permanentes reales sobre el suelo de fundación, variación de las cargas transitorias, valores pico en eventos extremos, entre otros.

Con el manejo de esta información resultará más fácil ajustar los factores de carga y los factores de resistencia, por sectores y por tipo de suelo. Esta labor se puede realizar mediante la publicación anual de una cartilla en donde se registren los datos estadísticos de los diferentes estudios de suelos realizados y aprobados a nivel nacional.

Es necesario desarrollar un proyecto de investigación financiado por el Estado, que permita establecer de manera adecuada la confiabilidad real de los estudios de suelos en Colombia, es decir, que, con el objetivo de implementar en los diseños geotécnicos los conceptos de confiabilidad, es necesario generar una gran base de datos detallada de uso público que permita establecer la veracidad y calidad de los trabajos realizados, publicar valores típicos de los parámetros geotécnicos y definir desde el punto de vista estadístico las funciones de densidad de probabilidad que de deban utilizar en la calibración de los factores de resistencia por regiones o zonas típicas en Colombia. (Microzonificación geoestadística para Colombia)

2.9 Planteamiento de futuras líneas de investigación

Dentro del desarrollo del presente ejercicio académico se pudo evidenciar la necesidad de adelantar investigaciones y profundizaciones en los siguientes campos del conocimiento geotécnico:

- Análisis de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en los diferentes tipos de suelos en Colombia. Este tema es el soporte principal desde el punto de vista geotécnico para realizar diseños basados en confiabilidad.
- Recopilación, procesamiento y análisis de instrumentación geotécnica en temas como: Deformaciones, Pruebas de Carga (Estáticas y Dinámicas), en diferentes tipos de obras civiles.

- Desarrollo de investigaciones conjuntas entre Ingenieros Estructurales y Geotécnicos para la determinación de los valores de amplificación de carga y reducción de la resistencia.

- Desarrollo de tesis de investigación y/o profundización en la utilización de equipos geotécnicos como CPT, PMT, DMT y CPTu. Con el objetivo de calibrar adecuadamente los equipos y plantear factores de ajuste y correlaciones adecuadas a nuestro medio.

- Implementación en los programas académicos de Especialización y Maestría en áreas del conocimiento relacionadas con Probabilidad y Estadística aplicada a la geotecnia (Geo estadística)

3 CONCLUSIONES

El ejercicio de la profesión de Ingeniero de Fundaciones, está lleno de incertidumbre, la cual está asociada principalmente con la génesis de los materiales sobre los cuales se deben cimentar las obras civiles. El desarrollo de un estudio geotécnico está limitado por aspectos como el dinero disponible para los trabajos de campo, la cantidad de ensayos de laboratorio que se pueden ejecutar, el tiempo disponible para realizar el trabajo y la cantidad de información disponible para plantear las soluciones.

Estas incertidumbres se han resuelto a partir de dos aspectos básicamente: el primero es el buen juicio de los profesionales encargados de realizar los diseños geotécnicos y el segundo es mediante la aplicación de factores de seguridad globales.

La combinación de estos dos aspectos, ha conducido a obtener resultados aceptables desde el punto de vista del colapso de las estructuras, ya que no es usual que ocurran casos como el del edificio Space de la ciudad de Medellín. Sin embargo, los resultados no han sido tan afortunados cuando se analiza la situación desde el punto de vista del servicio o funcionamiento de las estructuras o los puentes vehiculares en donde es habitual una falla de servicio en la zona de transición entre la estructura flexible a la rígida.

Teniendo en cuenta que, bajo la norma NSR-98, se han presentado numerosas quejas por parte de los usuarios de edificaciones nuevas y que la NSR-10 posee la misma filosofía de diseño para aspectos geotécnicos, es de esperar que se mantengan las quejas o, peor, que estas se incrementen debido al crecimiento económico proyectado para Colombia, el cual debe generar un crecimiento en el sector de la construcción de vivienda, hoteles, hospitales, entre otros. Por lo tanto, existe la posibilidad de que se sigan presentando fallas de servicio, las cuales implican pérdidas económicas importantes para los propietarios de los inmuebles.

Lo anterior indica que, se hace necesario utilizar métodos más robustos que permitan combinar de una manera más adecuada el modelo estructural con el modelo geotécnico, logrando resultados más equilibrados. Este método puede ser el LRFD, pero su aplicación no es conveniente de manera inmediata como lo plantea el nuevo código de puentes que está próximo a quedar vigente para Colombia o el manual presentado por el INVIAS para el diseño de estructuras viales ya que se requiere que los profesionales especializados en estas áreas reciban capacitación adecuada, se calibren los factores de carga y resistencia de manera unificada y no que unos respondan al planteamiento de los otros.

Además, se hace necesario que las normas en Colombia incluyan estos métodos de diseño basados en la confiabilidad ya que tienen un sustento matemático más profundo que el simple concepto de factor de seguridad global que hoy día se utiliza.

Igualmente, las Universidades deben actualizar sus programas académicos para que incluyan análisis y diseños basados en la teoría de la confiabilidad, independientemente de que en Colombia aún no se aplique este tipo de métodos. En la búsqueda de profesionales mejor preparados y buscando darles una proyección internacional, es necesario que se incluyan estos contenidos académicos.

Las universidades buscan profesionales mejor preparados y con una proyección internacional, pero para tal fin es necesario que los programas curriculares abarquen temáticas que sean de punta en la práctica normal de otras latitudes, las analicen y enfoquen a la realidad colombiana.

Dentro del desarrollo del presente trabajo de profundización se presentaron grandes dificultades en abarcar la temática ya que no estamos acostumbrados a este tipo de análisis en estructuras y en forma general existe desconocimiento de la manera en que se debe abarcar el tema, esta situación generó un sesgo en los análisis y probablemente los factores obtenidos son más conservadores de lo que podrían ser utilizados.

En forma general las empresas o los profesionales consultados para adelantar el presente trabajo se mostraron celosos con la información o los procedimientos utilizados para diseño. Debido a esto no fue posible consultar información de buena calidad en aspectos como instrumentación, pruebas de carga o controles de asentamientos. Estos aspectos son vitales para poder implementar análisis basados en la confiabilidad ya que es una tarea casi imposible pensar que un solo proyecto invierta todo el dinero requerido para calibrar de manera adecuada los factores de resistencia

Como se pudo observar en el capítulo dedicado a la calibración de los factores de resistencia existen

procedimientos robustos y de fácil aplicación, pero que requieren de una gran cantidad de datos para su implementación. De acuerdo con lo anterior, se considera inadecuado que cualquier norma colombiana aplique o permita diseños basados en la confiabilidad como los indicados por la AASHTO, sin antes realizar una calibración rigurosa de los factores de carga y resistencia.

Aplicar LRFD tal como lo indica AASHTO implica suponer que los procedimientos de diseño, construcción, control de calidad, calidad de los material, ensayos de laboratorio, y todo lo relacionado con las obras civiles en Colombia poseen igual o mejor calidad que la utilizada en la calibración de los factores que se realizó para la AASHTO. La validación de esta hipótesis requiere investigación, la cual debe ser liderada por el Estado apoyado en las universidades.

Actualmente la aplicación del LRFD en Estados Unidos o el EUROCÓDIGO en Europa no se realiza de manera generalizada, existen inclusive estados en donde aún están analizando la aplicabilidad de estos procedimientos. En la presentación misma de las normas se indica que los factores presentados son de referencia, pero que es necesario que se realice la calibración de los factores de acuerdo con la práctica local. Estas indicaciones, sumadas al hecho que los procedimientos de diseño y construcción obedecen a condiciones diferentes en cada región, implican que para la aplicación adecuada de estos métodos es necesario profundizar en análisis estadísticos específicos.

4 REFERENCIAS

AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. (Octubre de 2010). UNE-EN 1997-1. Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico, parte 1, reglas generales. Madrid, España: AENOR.

American Association of Transportation Officials. (2012). AASHTO LRFD BRIDGE. Design Specifications. Estados Unidos.

Epidat 4.0 . (Junio de 2012). Distribuciones de probabilidad. Ayuda Epidat 4.0. Análisis Epidemiológico de Datos. Galicia, España: Consejería de Sanidad. Galicia.

Federal Highway Administration. (2001). Load and resistance factor design (LRFD) for highway bridge substructures. Publication No FHWA HI-98-032.

Felizia, E. (1996). Centrales Nucleares, La Evaluación Probabilística de su Seguridad. Revista de divulgación científica y tecnológica de la asociación "Ciencia Hoy". Volumen 5, No 35.

Foye, K., Jaoude, G. A., & Salgado, R. (2004). *Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites*. West Lafayette, Indiana: Universidad de Purdue.

Foye, K., Jaoude, G., & Salgado, R. (2004). *Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites*. West Lafayette, Indiana: Universidad de Purdue.

Gaceta Oficial del distrito Federal. (6 de Octubre de 2004). *Normas Técnicas. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones*. Mexico D.F., Mexico: Gaceta Oficial del distrito Federal.

Gonzalez, A. (1999). *Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT*. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería Colombiana - SCI-SCG-1999, (pág. 12). Bogotá.

Hidalgo, C., & Pacheco de Asis, A. (2011). *Herramientas para análisis por confiabilidad en geotécnica*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242011000100008&script=sci_arttext#t1: <http://www.scielo.org.co>

<http://concepto.de/probabilidad/>. (s.f.). Obtenido de Portal Educativo. Concepto.de: www.concepto.de

<http://diarioadn.co/bogot%C3%A1/mi-ciudad/fallas-en-la-construcci%C3%B3n-de-vivienda-1.82698>. (Octubre de 2013). Obtenido de [www.http://diarioadn.co](http://diarioadn.co).

http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_154_179_106_1463.pdf. (s.f.). Obtenido de <http://www.biblioteca.udep.edu.pe/>.

<http://www.cdoconstructora.com/proyectos-construidos/>. (Mayo de 2014). Obtenido de <http://www.cdoconstructora.com/>.

<http://www.elespectador.com/noticias/bogota/articulo117257-multas-210-constructoras-bogota-fallas-edificaciones>. (Febrero de 2009). Obtenido de <http://www.elespectador.com/>.

<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13929475>. (Mayo de 2014). Obtenido de <http://www.eltiempo.com/>.

<http://www.importancia.org/probabilidad.php>. (s.f.). Obtenido de www.importancia.org.

Instituto Nacional de Vías. (2012). *Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras. Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras*. Bogotá, Colombia.

Meyerhof, G. (1994). *Evolution of safety factors and geotechnical limit state design*. The Second Spencer J.

Buchanan Lecture. Texas. Estados Unidos: Texas A&M University, U.S.A.

Muñoz, E. y. (2004). *Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 4(2) 125, 16.

NSR-010. Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. NSR-10. Título H. Estudios geotécnicos. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. (1998). Bogotá: AIS. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Sabino, C. (1992). *El Proceso de Investigación*. Caracas: Ed. Panapo.

Spiegel, M. R. (1975). *Probabilidad y Estadística*. Mexico: McGraw-Hill de Mexico S.A. de C.V.

U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. (2001). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Substructures. Reference Manual and Participant Workbook*. Estados Unidos: FHWA.

Withiam, J. L. (2003). *Implementation of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications for Substructure Design*.