



# Resumen Técnico

Información para transferencia de tecnología e implementación del proyecto

INDOT Research

Código Temático TRB: 62-1 Suelos de fundación  
Publicación No.: FHWA/IN/JTRP-2004/21, SPR-2406

Diciembre 2004  
Informe Final

## ***Diseño de Fundaciones Profundas por Estados Límites***

### **Introducción**

Diseñar fundaciones consiste en seleccionar y dimensionar las fundaciones de manera tal de evitar los estados límites. Hay dos tipos de estados límites: Estados Límites Últimos (ULS) y Estados Límites de Servicio (SLS). Los Estados Límites Últimos están relacionados con situaciones de riesgo que pueden involucrar consecuencias tales como el colapso estructural. Los Estados Límites de Servicio están relacionados con la pérdida de funcionalidad, y en el diseño de fundaciones muchas veces son provocados por asentamientos excesivos. El diseño en base a la confiabilidad (RBD) es una filosofía de diseño cuyo objetivo es mantener la probabilidad de alcanzar los estados límites por debajo de algún valor límite. Consecuentemente, el RBD permite una evaluación directa del riesgo, evaluación que no es posible con el diseño tradicional en base a las tensiones de trabajo. Salvo que se trate de un proyecto de gran presupuesto, el RBD no se puede aplicar en forma directa y resulta laborioso para los diseñadores. El Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) es una metodología de diseño que comparte la mayor parte de los beneficios del RBD, pero es mucho más fácil de aplicar. Tradicionalmente el LRFD se ha utilizado para verificar los Estados Límites Últimos de las estructuras, pero recientemente los Estados Límites de Servicio se han incorporado al marco del LRFD (AASHTO 1998).

El Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) es un método de diseño en el cual las cargas de diseño se mayoran y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores que la unidad, respectivamente. En este método las fundaciones se dimensionan de modo que las cargas mayoradas sean menores o iguales que las resistencias minoradas.

Para que el diseño de las fundaciones sea consistente con las prácticas actualmente utilizadas para el diseño estructural sería necesario utilizar las mismas cargas, factores de carga y combinaciones de

cargas. En el presente estudio repasamos los factores de carga presentados en diferentes Códigos para LRFD de Estados Unidos, Canadá y Europa. Se implementa un análisis de confiabilidad simple utilizando el método FOSM<sup>1</sup> para hallar rangos apropiados de los valores de los factores de carga. Estos factores se comparan con los factores propuestos en los Códigos.

Para que el LRFD logre ser aceptado en el campo de la ingeniería geotécnica se necesita un marco que permita evaluar los factores de resistencia de forma objetiva. En el presente estudio se propone un marco de este tipo, basado en el análisis de confiabilidad. Para el análisis se requieren Funciones de Densidad de Probabilidad (PDF) que representen las incertidumbres de las variables que intervienen en el diseño. Se presenta un enfoque sistemático para seleccionar estas PDF. Dicho procedimiento es un prerrequisito crítico para un análisis probabilístico racional en el desarrollo de métodos de LRFD aplicables en ingeniería geotécnica. Además, para aprovechar las ventajas del LRFD y lograr diseños de confiabilidad más consistente, los métodos utilizados para ejecutar un diseño deben ser consistentes con los métodos supuestos al desarrollar los factores para el LRFD. En el presente estudio se propone una metodología para estimar los parámetros del suelo a utilizar en las ecuaciones de diseño que debería permitir mayor consistencia estadística entre las variables de entrada que la que sería posible lograr en los métodos tradicionales.

El principal objetivo de este estudio es proponer un método para Diseño por Estados Límites para fundaciones superficiales y profundas basado en la investigación racional de los métodos de diseño en base a la probabilidad. En particular, para facilitar la metodología del Diseño por Estados Límites se

<sup>1</sup> FOSM: *First-Order Second-Moment*

utiliza el Diseño por Factores de Carga y Resistencia. Específicamente, los objetivos del estudio son 1) proporcionar lineamientos para seleccionar valores para los factores de carga; 2) desarrollar recomendaciones acerca de cómo determinar las resistencias características de los

suelos bajo diferentes situaciones de diseño; 3) desarrollar factores de resistencia compatibles con los factores de carga y el método utilizado para determinar la resistencia característica.

## Hallazgos

Esta investigación permitió desarrollar un marco sistemático para evaluar los factores de resistencia para LRFD en aplicaciones geotécnicas. Este marco está compuesto por varios pasos: a) identificar las ecuaciones utilizadas para el diseño; b) descomponer todas las variables que aparecen en las ecuaciones de diseño a fin de identificar todas las cantidades mensurables que intervienen; c) desarrollar modelos probabilísticos para las cantidades que tienen incertidumbre usando todos los datos disponibles; d) usar análisis de confiabilidad para determinar valores en estado límite correspondientes a un índice de confiabilidad determinado; e) determinar los factores de resistencia algebraicamente a partir de los correspondientes valores nominales y en estado límite.

Para aprovechar las ventajas del LRFD y lograr diseños de confiabilidad más consistente, los métodos utilizados para ejecutar un diseño deben ser consistentes con los métodos supuestos al desarrollar los factores para el LRFD. En el presente estudio se propone una metodología para estimar los parámetros del suelo a utilizar en las ecuaciones de diseño que debería permitir mayor consistencia estadística entre las variables de entrada que la que sería posible lograr en los métodos tradicionales. Esta metodología – llamada método de la media evaluada conservadoramente (método CAM) se define de manera tal que el 80% de los valores medidos de una propiedad específica probablemente se encontrarán por encima del valor de la CAM.

Pudimos demostrar que el procedimiento de la CAM tiende a estabilizar la confiabilidad de las verificaciones de diseño realizadas utilizando valores particulares de  $RF$ , aún cuando la incertidumbre del suelo in situ sea diferente a la supuesta en el análisis.

El principal objetivo de este estudio es proponer un método de LRFD para fundaciones superficiales y profundas basado en la investigación racional de los métodos de diseño en base a la probabilidad. Debido a que los valores del factor de resistencia dependen de los valores de los factores de carga utilizados, se presenta un método para ajustar los factores de resistencia que toma en cuenta los factores de carga especificados por los códigos. Luego los factores de resistencia para la capacidad de carga última se calculan usando análisis de confiabilidad para fundaciones superficiales y profundas tanto en arena como en arcilla, a utilizar con los factores de carga de ASCE-7 (1996) y AASHTO (1998). Los diferentes métodos considerados obtienen sus parámetros de entrada de ensayos CPT o SPT o bien de ensayos realizados en laboratorio. Finalmente, es posible que los diseñadores deseen utilizar métodos de diseño que no han sido considerados en este estudio. Para ello el diseñador necesita poder seleccionar factores de resistencia que reflejen la incertidumbre del método de diseño elegido. En el presente estudio se propone una metodología para hacerlo de manera que sea consistente con el marco presentado.

## Implementación

Los factores de resistencia obtenidos como resultado del presente estudio se podrían utilizar para desarrollar en el futuro códigos de LRFD para aplicaciones geotécnicas. Como primer paso hacia su implementación, la Universidad de Purdue y el INDOT están organizando un taller para educar a los diseñadores sobre los principios y aplicación de los factores de resistencia y los métodos de diseño asociados. Este taller formará la base para que los diseñadores del INDOT exploren el uso de estos métodos en apoyo del desarrollo de códigos. Es importante observar que, para aprovechar las ventajas del LRFD y lograr diseños de confiabilidad más consistente, los estudios de suelos en los cuales

se basa el diseño geotécnico deben ser consistentes con los métodos de interpretación supuestos al desarrollar los factores para LRFD. En consecuencia, como primer componente de la metodología del LRFD se debe implementar el concepto del método CAM. La implementación del método CAM no requeriría esfuerzos mayores que los que ya son habituales en los estudios de suelos. Este método es de fácil aplicación, y el presente informe incluye ejemplos de diseño.

En resumen, las áreas claves para la implementación son las siguientes:

- realizar un taller sobre LRFD para introducir a los ingenieros geotécnico a la aplicación del LRFD al diseño de fundaciones
- usar el procedimiento de la Media Evaluada Conservadoramente para mejorar la repetitibilidad de la evaluación de las propiedades del suelo
- pasar a utilizar cargas mayoradas y factores de resistencia para evaluar la resistencia de diseño de las fundaciones.

## **Contactos**

*Por mayor información dirigirse a:*

**Prof. Rodrigo Salgado**  
 Investigador Principal  
 Escuela de Ingeniería Civil  
 Universidad de Purdue  
 West Lafayette IN 47907  
 TE: (765) 494-5030  
 Fax: (765) 496-1364  
 E-mail: rodrigo@ecn.purdue.edu

### **Departamento de Transporte de Indiana**

División Investigaciones  
 1205 Montgomery Street  
 P.O. Box 2279  
 West Lafayette, IN 47906  
 TE: (765) 463-1521  
 Fax: (765) 497-1665

### **Universidad de Purdue**

Programa Conjunto de Investigación sobre  
 Transporte  
 Escuela de Ingeniería Civil  
 West Lafayette, IN 47907-1284  
 TE: (765) 494-9310  
 Fax: (765) 496-7996