

CAPÍTULO 11. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El primer paso de la presente investigación consistió en evaluar si los factores de carga disponibles son adecuados para utilizar en el diseño geotécnico mediante Factores de Carga y Resistencia (LRFD). Se revisaron los factores de carga propuestos por diferentes Códigos de diseño estructural y de fundaciones. En general, los códigos para diseño de puentes y fundaciones offshore consideran una gran cantidad de estados límites, tipos de cargas y combinaciones de cargas en comparación con los códigos para diseño estructural y de fundaciones en tierra. En este estudio se examinaron y compararon entre sí los factores de carga especificados en los Códigos para los cuatro tipos de cargas principales que determinan la mayoría de los casos de diseño (carga permanente, sobrecarga viva, carga de viento y carga sísmica).

Se implementó un análisis de confiabilidad simple utilizando el método FOSM¹ para hallar rangos apropiados de los valores de los factores de carga para cada una de las cargas consideradas en la presente investigación. El análisis produjo resultados consistentes con todos los Códigos revisados, aunque los valores producidos se encuentran en rangos bastante amplios debido al rango relativamente amplio de los parámetros de entrada. El análisis mostró una concordancia aún mayor con los Códigos cuando se consideraron sólo los Códigos estadounidenses (AASHTO, ACI y AISC). Tal como se resume en la Figura 2.6.1, los valores presentados en los Códigos estadounidenses se encuentran en la parte media del rango aceptable determinado mediante el análisis. Las versiones vigentes tanto del Código ACI como del Código AISC utilizan los factores de carga recomendados en ASCE-7. Por lo tanto, los factores de carga prescritos por ASCE-7 y AASHTO se consideran aceptables para el diseño geotécnico mediante LRFD.

Una vez que establecimos que los factores de carga de los Códigos se pueden utilizar de manera confiable, el siguiente paso consistió en investigar un método para evaluar los factores de resistencia de la manera más satisfactorios desde el punto de vista teórico. Se propuso un marco para desarrollar factores de resistencia de forma objetiva. Este marco está compuesto por varios pasos. Primero, identificar la ecuación correspondiente al estado límite. Segundo, identificar todas las variables que intervienen en la ecuación. Tercero, definir

¹ FOSM: *First-Order Second-Moment*

modelos probabilísticos para las cantidades que presentan incertidumbre en base a los datos disponibles. A continuación, utilizar el análisis de confiabilidad para determinar los valores en estado límite correspondientes a un conjunto de valores de diseño nominales con un índice de confiabilidad especificado. Los factores de resistencia se pueden determinar algebraicamente a partir de los correspondientes valores nominales y en estado límite.

Usando modelos probabilísticos se desarrollaron factores de carga y resistencia óptimos. Para que los resultados de este trabajo fueran compatibles con los factores de carga establecidos en los Códigos fue necesario ajustar los factores de resistencia. En la Sección 3.3 presentamos un método que lo logra de manera satisfactoria.

La Tabla 5.1.1 presenta factores de resistencia recomendados para utilizar con los factores de carga especificados en ASCE-7 (1996) o AASHTO (1998) para sobrecarga viva y carga permanente para el caso de fundaciones superficiales. Estas tablas contienen una guía simplificada basada en los resultados más exhaustivos ilustrados en las Figuras 5.1.1, 5.1.2 y 5.1.4 para los factores de carga de ASCE-7.

Los estados límites de servicio y últimos se deberían tratar de forma separada. Los resultados del presente análisis sugieren que los factores del diseño por tensiones de trabajo tradicional (WSD) pueden ser excesivamente conservadores para el caso de fundaciones superficiales en arcilla. Sin embargo, analizar los factores de seguridad por sí solos no ofrecerá ninguna mejoría respecto de la práctica actual. Un proceso de diseño consistente deberá interpretar datos y utilizar modelos de transformación para desarrollar valores de la resistencia de diseño. En ausencia de criterios consistentes para definir valores de la resistencia de diseño no es posible conocer el margen de seguridad de un diseño ni compararlo con otros diseños. Es factible desarrollar métodos estadísticamente consistentes para seleccionar valores de diseño, como por ejemplo el método CAM descrito en la Sección 5.2, y esto abrirá el camino para poder aprovechar completamente los beneficios del diseño basado en la confiabilidad.

Si se utiliza un enfoque consistente desde el punto de vista estadístico, al diseñar las fundaciones mediante LRFD se obtendrán diseños con confiabilidades consistentes. El método propuesto para establecer una media conservadora para utilizar en el diseño es fácilmente reproducible en la práctica. Se han determinado factores de resistencia que son compatibles con este procedimiento. Este método ofrece tres ventajas. En primer lugar,

debido a que para determinar valores utiliza herramientas estadísticas, se reduce la necesidad de tomar decisiones arbitrarias dentro de una capa de suelo determinada. En segundo lugar, como se trata de una herramienta estadísticamente consistente para evaluar los valores de entrada del diseño, es dable esperar que con el método se obtengan diseños con confiabilidades mucho más consistentes que las que se obtendrían por otros medios. Finalmente, el método ha demostrado ser una herramienta útil para mantener una confiabilidad consistente con respecto a perfiles de suelos con variabilidades que difieren de las usadas para determinar los factores de resistencia. Este resultado es altamente significativo para la implementación práctica de métodos de LRFD en la ingeniería geotécnica, ya que los depósitos de suelo varían significativamente según el lugar en que se encuentre la obra.

Para poder desarrollar un conjunto completo de factores LRFD para utilizar en el diseño en estado límite de las fundaciones superficiales, futuros análisis deberán incorporar las incertidumbres asociadas con los diferentes métodos de ensayo, factores que consideren la inclinación de las cargas, factores que consideren la inclinación de la base y la inclinación del terreno.

Para el diseño de fundaciones profundas hay dos tipos principales de métodos de diseño disponibles: 1) aquellos que utilizan ensayos in situ para determinar directamente una resistencia; y 2) aquellos que para determinar la resistencia utilizan propiedades del suelo determinadas mediante una variedad de ensayos. Una diferencia importante entre los métodos que se basan en las propiedades del suelo y los métodos directos es que los métodos basados en las propiedades del suelo tienden a tener mayor incertidumbre (menor RF), pero se pueden aplicar a casos generales, mientras que los métodos directos tienden a tener menor incertidumbre (mayor RF) pero sólo se aplican a casos específicos en los cuales el tipo de pilotes y suelos se asemejan a aquellos para los cuales fueron desarrollados. Una implicancia de esta diferencia es que puede resultar más riesgoso aplicar un método de diseño directo a una situación de diseño que sea diferente a las contempladas en la base de datos de pilotes sometidos a ensayos de carga a partir de la cual se desarrolló el método, aún cuando en la base de datos éste muestre una excelente concordancia con los valores medidos.

Revisando la literatura existente con frecuencia descubrimos que muchos métodos de diseño tienen una base experimental y teórica incompleta. En consecuencia, es dable esperar que muchos métodos de diseño produzcan desviaciones impredecibles entre las capacidades

de carga medidas y las pronosticadas. Esto significa que para algunos de los métodos de diseño no es posible evaluar racionalmente la incertidumbre dentro del marco establecido en el Capítulo 3. En particular, se halló que los datos disponibles para respaldar los métodos de diseño existentes para pilotes perforados y pilotes hincados en arcilla son limitados.

Las Tablas 8.2.1 y 9.2.1 presentan factores de resistencia recomendados para utilizar con los factores de carga para sobrecarga viva y carga permanente especificados en ASCE-7 (1996) o AASHTO (1998) para fundaciones profundas en arena y arcilla, respectivamente. Estas tablas también contienen un resumen de las ecuaciones de diseño a utilizar con cada factor de resistencia.

Durante el transcurso del presente estudio intentamos investigar los métodos de diseño para fundaciones profundas más promisorios. Sin embargo, cualquier esfuerzo será insuficiente para abarcar todos los casos que podrían surgir en la práctica, ya que sabemos que existen muchos métodos de diseño directo que han sido desarrollados para situaciones de diseño específicas. Por este motivo, el diseñador debe ser capaz de seleccionar factores de resistencia que reflejen la incertidumbre del método de diseño utilizado. Una técnica adecuada consiste en evaluar la incertidumbre de la capacidad total comparando datos pronosticados contra datos medidos mediante ensayos de carga. En la Sección 9.2.1 se presenta una metodología para aplicar esta técnica, la cual se demuestra en el Capítulo 10.

Recomendaciones que surgen del estudio

En esta sección se resumen las diferentes conclusiones que surgen del estudio en cuanto a cómo implementar correctamente el LRFD en aplicaciones de diseño geotécnico. Estas recomendaciones se agrupan según su área de aplicación.

- Selección de factores de carga para utilizar el LRFD en aplicaciones de diseño geotécnico
 - Para utilizar el LRFD en aplicaciones de diseño geotécnico los diseñadores deberían utilizar factores de carga que sean consistentes con el LRFD aplicado al diseño estructural.
- Selección de factores de resistencia para utilizar el LRFD en aplicaciones de diseño geotécnico
 - El análisis de confiabilidad es la técnica más racional disponible para evaluar los

factores de resistencia.

- El proceso de especificar en el código factores de resistencia con los cuales se obtengan diseños de iguales dimensiones que los obtenidos con los factores de seguridad utilizados anteriormente se conoce como “calibración”. Esta calibración es útil como primer paso para implementar el LRFD, y actualmente es el método más utilizado.
- Para las fundaciones superficiales se debería utilizar el enfoque del factor de resistencia único “combinado”.
- El enfoque de múltiples factores permite un mejor control de la incertidumbre del diseño de un pilote. Sin embargo, para algunos diseños no habrá suficientes datos disponibles que respalden este enfoque, por lo cual será necesario utilizar el enfoque del factor “combinado”.
- Hay una diferencia significativa entre los diseños que se apoyan en un programa de verificación mediante ensayos de carga y aquellos que no lo hacen. Para los casos en los cuales no se realizan verificaciones mediante ensayos de carga se llevó a cabo un ensayo de confiabilidad para respaldar los valores de RF recomendados. Necesariamente los RF para los diseños verificados son más elevados.
- En caso de diseñar pilotes mediante métodos de diseño directos no cubiertos en el presente informe, los diseñadores pueden determinar su propio factor de resistencia utilizando las figuras provistas. Esto es posible cuando tienen acceso a datos de ensayos de carga que respalden un método de diseño correspondiente a circunstancias de diseño suficientemente similares a las circunstancias de diseño consideradas. Esto significa que los resultados del presente informe se pueden aplicar más allá de los casos específicos considerados.
- Desarrollo de factores de resistencia usando análisis de confiabilidad
 - El análisis de confiabilidad es la técnica más racional disponible para evaluar los factores de resistencia.
 - Es importante utilizar un enfoque sistemático para evaluar la incertidumbre de las variables que intervienen en el diseño.
 - Para desarrollar los factores de resistencia se debería utilizar el marco propuesto en

la Sección 3.1, ya que este enfoque es racional, sistemático y creíble.

- Para investigar exhaustivamente la incertidumbre de las variables que intervienen en el diseño se recomienda aplicar métodos de integración numérica a las PDF fundamentales para manejar la transformación a PDF dependientes, en lugar de utilizar la simulación de Monte Carlo o aproximaciones de primer orden.
- Es útil desarrollar índices de confiabilidad objetivo en base a las prácticas actualmente aceptables para así permitir un ajuste cauto y gradual de los niveles de confiabilidad (índices de confiabilidad y diseños resultantes) con el transcurso del tiempo.
- Para evaluar los índices de confiabilidad actualmente aceptables se pueden calcular los índices de confiabilidad partiendo de los factores de seguridad existentes.
- En este informe se han producido factores de resistencia para un índice de confiabilidad objetivo igual a 3.0. La práctica existente o el nivel de riesgo aceptable podrían variar, y también se podrían utilizar índices de confiabilidad objetivo alternativos. Para el caso de los pilotes hincados se han proporcionado herramientas que permiten hacer esto de forma limitada. Para un ajuste más exhaustivo se requieren análisis de confiabilidad más completos.
- El proceso de especificar en el código factores de resistencia con los cuales se obtengan diseños de iguales dimensiones que los obtenidos con los factores de seguridad utilizados anteriormente se conoce como “calibración”. Esta calibración es útil como primer paso para implementar el LRFD, y actualmente es el método más utilizado.
- Selección de valores de resistencia característicos para el diseño
 - Para aprovechar todo el potencial de los métodos de diseño basados en la confiabilidad es vital determinar la resistencia característica de una manera reproducible.
 - Es necesario usar el procedimiento de la Media Evaluada Conservadoramente (CAM) descrito en el Capítulo 5 para lograr valores de entrada más uniformes para el diseño y así aprovechar los beneficios del LRFD. El procedimiento CAM se demuestra en los Capítulos 6 y 10.

- Los sondeos y otros ensayos realizados in situ se deberían agrupar para su análisis cuando se sabe que corresponden a mediciones realizadas en el mismo suelo o capa de suelo. Los ensayos de materiales diferentes y los sondeos que revelan la existencia de diferentes características en un mismo predio necesariamente se deben mantener separados.
- La variabilidad espacial en dirección vertical se puede tomar en cuenta fácilmente realizando algunos ensayos in situ. Sin embargo, la variabilidad espacial en dirección horizontal es imposible de determinar de manera rutinaria y la mejor manera de tratar este problema consiste en emplear el “peor” sondeo o grupo de sondeos aplicable.
- Educación sobre LRFD
 - Es necesario educar a los ingenieros sobre los argumentos en los cuales se basa el lograr valores correctos y consistentes de los factores de resistencia RF , los factores de carga LF , y la resistencia característica dentro del LRFD.
 - Para poder adaptarse y aceptar el LRFD, los ingenieros se deberán familiarizar con un número de factores diferentes.
- Recomendaciones generales respecto del diseño de fundaciones profundas
 - Para este estudio se seleccionaron varios métodos de diseño en base a lo completo de los datos en los cuales se basan dichos métodos. Éstos son los que se deberían utilizar en el diseño, ya que los datos que los respaldan son adecuados.
 - Hay varios aspectos del diseño de pilotes que requieren mayor investigación, ya que en este momento los datos disponibles son insuficientes.
 - Para el diseño de pilotes en base a las propiedades del suelo, el valor de K_0 seleccionado para utilizar en el diseño friccional es extremadamente importante: se trata de un parámetro altamente relevante que debe ser seleccionado muy cuidadosamente.