

CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO POR ESTADOS LÍMITE DE LA CAPACIDAD GEOTECNICA DE PILOTES

Gerbaudo, Carlos^a ; Zeballos, Marcelo^b

^aINGROUP Oficina de Proyectos, ingroup@ingroup-op.com.ar

^bSENER, marcelo.zeballos@gmail.com

Palabras clave: pilotes, estados límite, capacidad carga

RESUMEN

En el presente artículo técnico se realiza un estudio y análisis conceptual de las normativas de diseño geotécnico Eurocódigo 7 (EC-7) y AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO), basadas en una formulación de Estados Límite con factores parciales de seguridad o diseño por factores de carga y resistencia (LRFD), presentando una explicación de los diferentes estados límite de una fundación de pilotes y las verificaciones a realizar según las mencionadas normativas.

A continuación, se aplica la metodología a un caso de estudio de un pilote de fundación perforado y hormigonado in situ, sometido a un conjunto de acciones con diferentes relaciones de carga permanente y variable, y luego se consideran un conjunto de parámetros geotécnicos de fricción y punta con diferentes niveles de resistencia, con el objeto de determinar la capacidad geotécnica del pilote por el método LRFD, aplicando EC-7 y AASHTO, y comparar los resultados con los que arroja el método de tensiones admisibles (ASD) utilizado tradicionalmente en Argentina.

Finalmente, en función de los resultados obtenidos, se presenta un análisis de sensibilidad de variación del margen de seguridad del método LRFD y el coeficiente de seguridad global del método ASD frente a diferentes relaciones de carga permanente y variable, y diferentes composiciones de los parámetros resistentes de fricción y punta.

ABSTRACT

This paper presents a study and conceptual analysis of the Eurocode 7 (EC-7) and AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO) application codes, based on a formulation of Limit States or Load and Resistance Factor Design (LRFD) method. It explains the different limit states of a pile foundation and the verifications that must be performed according to the normative.

To continued, the methodology was applied to a study case of a bored pile cast in place, subjected to a set of loads with varying ratios between permanent and live load, and subsequently, a set of geotechnical shaft and base resistant parameters to calculated pile geotechnical capacity for EC-7 and AASHTO LRFD methods. The results obtained were compared with the Allowable Stress Design (ASD) method used in Argentina.

Finally, based on the results, a sensitivity analysis of the safety margin or variation between the LRFD and ASD methods is presented, considering different load ratios and geotechnical shaft and base resistant parameters.

INTRODUCCIÓN

La formulación de los códigos de diseño de fundaciones actuales muestra una marcada tendencia a adoptar una filosofía de diseño basada en el método de los estados límite y la utilización de factores de seguridad parciales tanto para las sollicitaciones como para la resistencia. Este criterio de diseño se plasma, por ejemplo, en las normativas de diseño geotécnico Eurocódigo 7 (EC-7, 2004) y AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO, 2024). Ambas normas indican que los diseños geotécnicos deben verificar condiciones de resistencia y estabilidad en Estados Límite Último (ELU) y complementariamente es necesario realizar las comprobaciones de los Estados Límite de Servicio (ELS). Estos métodos se basan en el empleo de factores parciales de mayoración de las cargas y minoración de la resistencia (LRFD, Load Resistance Factors Design, por sus siglas en inglés).

La imposición normativa de nuevos criterios de diseño para las fundaciones conlleva la necesidad de realizar una revisión comparativa en relación con los métodos frecuentemente empleados en los ambientes locales, basados principalmente en la definición de factores de seguridad globales. Esta tendencia de revisión de los sistemas de diseño de fundaciones ha sido desarrollada o se encuentra en fase de desarrollo, a modo de estado del arte, en distintos países.

Con el objeto de valorar la variabilidad de los resultados que arrojan la aplicación de diferentes criterios normativos, se ha realizado un análisis comparativo de estos métodos sobre el diseño de una cimentación con pilote, del tipo excavado y hormigonado in situ. Para analizar la variación en los resultados obtenidos, se ha aplicado un conjunto de acciones con diferentes relaciones de carga permanente y variable. La componente de resistencia geotécnica se establece según la contribución de fuste y punta, a partir de las cuales se identifica la carga resistente de rotura con el objeto de determinar la capacidad geotécnica del pilote. Estos resultados se comparan con los que arroja el método de tensiones admisibles (ASD, Allowable Stress Design, por sus siglas en inglés) utilizado tradicionalmente en Argentina.

La evaluación de distintas condiciones resistentes de la cimentación ha sido empleada, a modo de análisis de sensibilidad de variación en los resultados, tanto a nivel de la composición de la estructura, como en la definición de un factor de seguridad equivalente dentro del método LRFD. Este último parámetro se emplea para la comparación con resultados obtenidos según el método ASD.

NORMATIVAS DE DISEÑO EN CIMENTACIONES

A continuación, se presentan las principales características de los métodos de diseño de la capacidad geotécnica de pilotes, tanto por el método LRFD de factores parciales como el de tensiones admisibles, y se analiza su aplicación en distintas partes del mundo.

Diseño por método de factores parciales

Los análisis sobre la seguridad de las estructuras, que involucra a las fundaciones, evolucionaron en las últimas décadas, principalmente a partir de los análisis basados en evaluación probabilista de las variables intervinientes. Esto procura ser reflejado en el método LRFD, que aplican muchos de los códigos modernos de diseño. La

función objetivo del método consiste en un “estado limite” último o de servicio, relacionado con el límite de resistencia o de serviciabilidad de la estructura.

El diseño geotécnico de cimentaciones ha mostrado a lo largo del tiempo una transformación derivada de la evolución de métodos de evaluación de propiedades del terreno, ensayos de las estructuras y modelos de cálculo (Bowles, 1997; Das, 2011). A este proceso se suma, actualmente, la inclusión de enfoques probabilísticos en la definición de las variables del problema. Si bien los mecanismos resistentes en el caso de pilotes sometidos a cargas axiales continúan siendo los mismos (resistencia de punta y por fuste), la forma en que las distintas normativas internacionales tratan la incertidumbre geotécnica presenta variaciones conceptuales importantes (Tomlinson & Woodward, 2015). La filosofía de diseño LRFD procura su sustentación sobre una base racional, basada en fundamentos probabilísticos para evaluar las cargas y las resistencias, incorporando el análisis estadístico de la resistencia de los materiales, la variabilidad y simultaneidad de las cargas aplicadas, la incertidumbre de los modelos mecánicos de falla, aspectos relacionados con la calidad, metodología y confiabilidad de la ejecución, y otros parámetros que influyen en la fiabilidad o seguridad probabilística de la construcción.

Los resultados provenientes de campañas geotécnicas son interpretados para definir valores característicos representativos del comportamiento del terreno, los cuales posteriormente se transforman en valores de cálculo al ser afectados por los correspondientes factores parciales (Bond & Harris, 2008).

El diseño de pilotes para puentes se realiza en muchos países según el AASHTO LRFD Bridge Design Specifications de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2024), constituyendo probablemente el sistema más influyente en infraestructura vial a nivel mundial. Las bases del método en su aplicación para pilotes excavados, y mayores especificidades en su aplicación se muestran en (FHWA, 2018). Los factores de resistencia adoptados dependen del método de cálculo, del tipo de suelo y de la calidad de la investigación geotécnica.

En esta normativa la función general de Estados Límite para el diseño de un componente de una estructura o fundación de un puente, de acuerdo al Apartado 1.3.2 “Limit States” de la a Sección 1, es la indicada en ecuación 1:

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (1)$$

donde:

Q_i = Solicitación o efecto de las acciones correspondiente al Estado de carga i

R_n = Resistencia nominal

η_i = Factor de modificación de las cargas, relacionado con la ductilidad, redundancia e importancia operativa

γ_i = Factor de mayoración de carga, multiplicador aplicado al Estado de carga i

ϕ = Factor de reducción de resistencia, multiplicador aplicado a la resistencia nominal.

En el caso de AASHTO LRFD, los valores de los coeficientes de mayoración de los efectos de las acciones depende del tipo, características y combinación de las cargas, y se definen en la Sección 3 “Cargas y Factores de Carga”, mientras que los

coeficientes de minoración de resistencia son diferentes para cada material y cada tipo de sollicitación y se definen en las Secciones 5 a 12 de esta norma. Los coeficientes parciales han sido calibrados para obtener una probabilidad de falla consistente con las características del escenario analizado, para los distintos tipos de estructuras o fundaciones y la combinación de sollicitaciones propuestas. Este sistema ha sido calibrado probabilísticamente a partir de extensas bases de datos instrumentadas.

En el caso del Eurocódigo 7 (EN 1997-1 (2004)), el procedimiento permite tratar explícitamente la variabilidad espacial del suelo y constituye una de las principales contribuciones conceptuales de este modelo. Este enfoque introduce los denominados Enfoques de Proyecto (Design Approaches), que modifican la forma en que se distribuyen los factores parciales entre acciones, parámetros y resistencias.

La expresión general del diseño de una fundación por el Método de los Estados Límite de acuerdo al Eurocódigo se muestra en la ecuación 2.

$$E_d \leq R_d \quad (2)$$

donde:

E_d = valor de la sollicitación de diseño

R_d = valor de la resistencia de diseño

Los componentes de la ecuación 2, se pueden desarrollar en la forma que se indica en la ecuación 3.

$$E(\gamma_F F_{rep}, X_k/\gamma_M, a_d) \leq \frac{1}{\gamma_R} R(\gamma_F F_{rep}, X_k/\gamma_M, a_d) \quad (3)$$

Donde:

F_{rep} = Valor representativo del efecto de las acciones

X_k = valor característico de las propiedades del material

a_d = valor de cálculo geométrico

γ_F = Coeficiente parcial de las acciones

γ_M = Coeficiente parcial de los parámetros geotécnicos (propiedades del material)

γ_R = Coeficiente parcial de la resistencia

Mientras los aspectos relacionados con los factores de mayoración de las sollicitaciones son definidos en el Eurocódigo Parte 0 “Bases para el diseño estructural” (EN 1990:2002+A1), según las características de las estructuras, el tipo de acciones, su frecuencia y la importancia de la construcción, los factores de afectación de la resistencia se presentan en el Eurocódigo Parte 7 “Diseño geotécnico” (EN 1997-2004), asociado con todos los componentes geotécnicos.

En particular, se destaca que la definición de los coeficientes parciales de seguridad en el caso de EC-7 dependen del “Enfoque de Proyecto”, según se muestra en la Tabla 1, siendo el mayormente utilizado en Europa, y principalmente en España, el Enfoque de Proyecto 2 donde se mejoran las acciones (o los efectos de las acciones) y se

minoran las resistencias, dejando los parámetros geotécnicos con su valor característico ($X_d = X_k/\gamma_M = X_k$).

Enfoque de Proyecto	Mayoración de acciones	Minoración parámetros geotécnicos	Minoración de resistencias	Combinación
1	Combinación 1	X		A1 + M1+ R1
	Combinación 2	X ^(c)	X ^(a)	A2 + M2 + R1 (a) A2 + (M1 ó M2) + R4
2	X ^(b)		X	A1 + M1 + R2
3	X ^(b)	X	X ^(d)	(A1 ó A2) + M2 + R3

Notas: (a) (solo en pilotes cargados axialmente y anclajes)

(b) (o efectos de las acciones)

(c) (solo en acciones variables)

(d) (solo la de fuste en pilotes a tracción)

Simplificación en la nomenclatura realizada por UNE-EN 1997-1:

- A_i: Conjunto de coeficientes parciales de las acciones γ_F (o de los efectos γ_E). (i = 1, 2). El conjunto A1 se aplica a las acciones estructurales y el A2 a las geotécnicas.

- M_j: Conjunto de coef. parciales de los parámetros geotécnicos γ_M . (j = 1, 2).

El conjunto M1 se emplea para el cálculo de las resistencias de los pilotes o anclajes y el M2 se emplea para la determinación de las acciones desfavorables en pilotes debidas al rozamiento negativo o a las cargas transversales.

- R_k: Conjunto de coef. parciales de las resistencias γ_R . (k = 1, 2, 3 y 4).

- "+": significa "combinado con".

Tabla 1. Aplicación de los coeficientes parciales de seguridad de acuerdo a los Enfoques de Proyecto según EC-7. Fuente: CEDEX.

Metodología de diseño por tensiones admisibles

En el método de Diseño por Tensiones Admisibles ASD (Allowable Stress Design), definida la resistencia última o capacidad geotécnica del pilote y establecidas las acciones externas de servicio solicitantes, surge el factor de seguridad del conjunto como la relación entre la Resistencia y la Solicitación. De igual forma, el análisis puede ser realizado minorando las resistencias unitarias por un factor de seguridad global, o por factores de seguridad para cada componente, debiéndose verificar la ecuación 4.

$$\frac{Q_u}{FS} \geq S \quad (4)$$

$$\frac{Qp_u}{FS_p} + \frac{Qf_u}{FS_f} \geq S$$

donde:

Q_u = Resistencia última geotécnica del pilote

S = Solicitación externa o solicitación de servicio

Qp_u = Resistencia última de punta

Qf_u = Resistencia última de fricción

FS = factor de seguridad global

FS_p = factor de seguridad para la resistencia de punta

FS_f = factor de seguridad para la resistencia a fricción.

Se pueden efectuar las siguientes consideraciones respecto del método de diseño ASD:

La metodología de diseño geotécnico por tensiones admisibles se aplica en Argentina hace más de 60 años, utilizando un factor de seguridad global comprendido entre 2 y 4. Leoni (2024), en su trabajo técnico sobre comparación de métodos de diseño de fundaciones, indica que en función de la experiencia práctica un factor de seguridad global de 3 es adecuado, tanto para evaluar la resistencia como controlar la magnitud de los asentamientos, mostrando resultados confiables en el diseño geotécnico de fundaciones para suelos del sector de la pampa húmeda.

La Dirección Nacional de Vialidad (DNV), establece a través de sus especificaciones técnicas los requerimientos para el diseño y verificación de cimentaciones profundas con pilotes en puentes viales. En este marco, la capacidad portante del pilote debe evaluarse considerando los mecanismos resistentes del suelo, principalmente la resistencia por fricción lateral del fuste y la resistencia por punta o base, de acuerdo a la ecuación 2, y la carga admisible del pilote se obtiene aplicando factores de seguridad adecuados respecto de la capacidad última, los cuales deben ser justificados en el estudio geotécnico y por el Proyectista.

En la práctica utilizada en proyectos de puentes viales bajo jurisdicción de la DNV, el cálculo de la carga admisible suele realizarse aplicando factores de seguridad diferenciados para cada componente resistente, debido a la distinta confiabilidad y comportamiento de cada mecanismo de resistencia, de acuerdo a la Ecuación 4, y de acuerdo a la experiencia práctica, se adoptan habitualmente un factor de seguridad de 3 para la resistencia por punta y 2 para la resistencia por fuste. Esta diferenciación se fundamenta en que la resistencia de punta depende en gran medida de las condiciones del estrato portante ubicado en la base del pilote y puede presentar mayor incertidumbre y sensibilidad a los asentamientos, mientras que la fricción lateral suele movilizarse de manera más progresiva, con bajos niveles de desplazamiento y presenta mayor fiabilidad.

Las limitaciones del método de las tensiones admisibles ASD en el caso de los suelos se centran principalmente en que la relación carga-deformación de un pilote es marcadamente no lineal. La definición de factores de seguridad globales y únicos pueden no contemplar situaciones singulares, como por ejemplo el método constructivo, la certidumbre en el conocimiento de la interacción suelo – estructura, entre otros factores.

Uso de Métodos de Diseño de Fundaciones

Como se ha indicado los métodos de diseño con factores parciales tiene una amplia difusión tanto en Estados Unidos de Norteamérica, como en los países de Europa Occidental. Se presentan a continuación comentarios respecto de los métodos empleados en otras partes del mundo.

Canadá utiliza metodologías similares a las empleadas por Estados Unidos, tal como se muestra en el Canadian Highway Bridge Design Code (CSA, 2019). Sin embargo, las particularidades climáticas y geológicas canadienses ha derivado en ajustes específicos relacionados con condiciones de congelamiento, comportamiento de suelos sensibles y cargas ambientales extremas (Becker, 1996). Es una práctica

frecuente en estas regiones la utilización intensiva de ensayos de caracterización del terreno del tipo CPT (Cone Penetration Tests) y de pilotes instrumentados para calibración de modelos resistentes (Lunne et al., 1997).

Australia ha desarrollado metodologías fuertemente influenciadas por los sistemas británicos y norteamericanos, adoptando criterios de estados límite compatibles con enfoques probabilísticos (AS 2159, 2009). Las condiciones geológicas australianas, caracterizadas frecuentemente por suelos residuales y perfiles altamente meteorizados, impulsaron una importante evolución de los métodos de caracterización geotécnica. El uso intensivo de ensayos de caracterización del terreno del tipo CPT constituye una característica distintiva de la práctica australiana.

Japón representa uno de los sistemas más avanzados en diseño geotécnico de pilotes. Su desarrollo ha sido influido por la combinación de elevada sismicidad, complejidad geológica y altos requerimientos de desempeño estructural. La práctica japonesa integra procedimientos determinísticos tradicionales con metodologías probabilísticas avanzadas y enfoques explícitos de diseño basado en desempeño (Architectural Institute of Japan, 2001). Los análisis dinámicos, la interacción suelo-estructura y el monitoreo instrumental durante construcción y operación forman parte habitual del proceso de diseño (Tokimatsu & Suzuki, 2004). En consecuencia, el sistema japonés evolucionó hacia metodologías altamente sofisticadas donde la seguridad no depende únicamente de coeficientes globales, sino también de criterios de deformabilidad, ductilidad y comportamiento sísmico no lineal.

En México, la práctica geotécnica presenta un esquema híbrido. En proyectos de infraestructura mayor, particularmente puentes y obras financiadas internacionalmente, predominan enfoques compatibles con AASHTO. Sin embargo, en numerosas aplicaciones convencionales continúan empleándose metodologías ASD tradicionales. Esta coexistencia refleja una transición progresiva entre sistemas determinísticos clásicos y enfoques modernos basados en confiabilidad. Una situación similar puede observarse en gran parte de América del Sur.

En Brasil, el diseño de cimentaciones profundas se rige principalmente por la ABNT NBR 6122, norma históricamente basada en tensiones admisibles, aunque en sus revisiones más recientes incorporó conceptos compatibles con estados límite (ABNT, 2019). Brasil desarrolló además una importante experiencia regional en correlaciones CPT-pilotes y en interpretación geotécnica basada en ensayos de penetración (Décourt & Quaresma, 1978). Chile presenta probablemente uno de los escenarios más avanzados de América Latina en términos de integración entre metodologías tradicionales y modernas. La elevada actividad sísmica impulsó el desarrollo de enfoques más sofisticados relacionados con interacción suelo-estructura y diseño basado en desempeño. En consecuencia, numerosos proyectos combinan criterios derivados de AASHTO LRFD con conceptos próximos al Eurocódigo (NCh3206, 2010). Aunque los métodos ASD continúan utilizándose ampliamente, existe una creciente adopción de enfoques semiprobabilísticos y análisis dinámicos avanzados.

Perú mantiene actualmente un sistema mixto donde coexisten procedimientos ASD tradicionales con una creciente incorporación de metodologías LRFD en proyectos de gran infraestructura. La influencia norteamericana resulta particularmente visible en proyectos de puentes y corredores viales estratégicos, donde suelen adoptarse criterios compatibles con AASHTO (MTC Perú, 2018). En términos prácticos,

continúan utilizándose factores de seguridad clásicos similares a los observados en otros países latinoamericanos, aunque con una transición gradual hacia enfoques de estados límite.

En Colombia, la evolución hacia sistemas LRFD es más marcada. La normativa nacional y numerosos proyectos de puentes adoptan explícitamente criterios compatibles con AASHTO, incluyendo factores de minoración calibrados según tipo de suelo y método constructivo (INVIAS, 2015). Colombia presenta además una creciente incorporación de ensayos CPT y de procedimientos avanzados de control experimental, particularmente en cimentaciones profundas asociadas a infraestructura vial y energética.

La tendencia internacional actual muestra una convergencia progresiva hacia metodologías basadas en confiabilidad, análisis probabilísticos y diseño basado en desempeño (Honjo et al., 2010). El desarrollo de bases de datos geotécnicas regionales, el uso masivo de CPT instrumentados, la incorporación de modelos numéricos avanzados y la aplicación creciente de técnicas de monitoreo en tiempo real probablemente profundizarán esta evolución durante las próximas décadas. En este contexto, el diseño geotécnico de pilotes para puentes continuará transitando desde enfoques empíricos y determinísticos hacia sistemas integrados capaces de representar de manera más realista la complejidad del comportamiento suelo-estructura.

CASO DE ANALISIS

Evaluación de la Resistencia Geotécnica

Se ha realizado una evaluación comparativa de los diseños resultantes para tres condiciones de cimentación típicas en estructuras. Las condiciones propuestas se vinculan los siguientes escenarios de disposición de los pilotes:

- a. Pilote flotante, o con una fracción dominante de la carga soportada por el fuste,
- b. Pilotes intermedios, en los que la carga es resistida en forma conjunta por el fuste y la punta, y
- c. Pilotes de punta, o con una fracción predominante de la resistencia brindada por la punta del pilote.

La disposición de los diferentes mecanismos de resistencia de los pilotes se muestra en la Figura 1.

A continuación, se describen los criterios de cálculo empleados para cada uno de los componentes de la resistencia de un pilote.

En general, el primer paso de los métodos de análisis de la resistencia geotécnica de un pilote consiste en la determinación de la resistencia unitaria última, tanto en la punta como a lo largo del fuste del pilote, denominadas q_u y f_u , respectivamente. Para esto, las formulaciones o métodos de cálculo son variados, tal como se muestra en la bibliografía específica (Das, 2010, Tomlinson & Woodward, 2015).

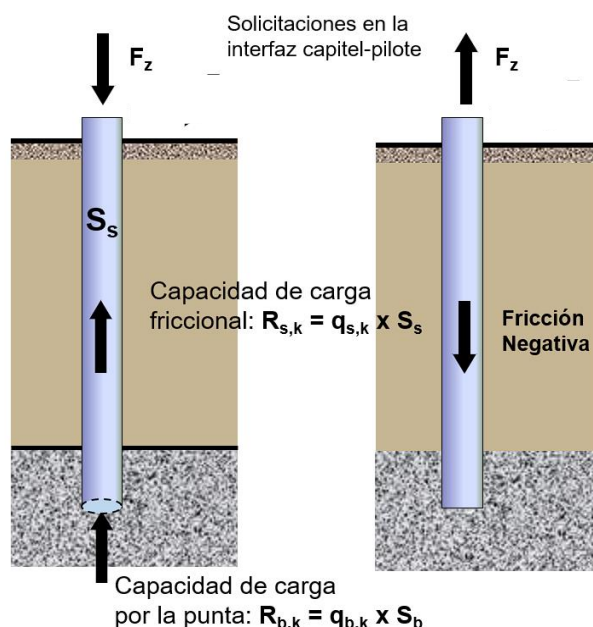


Figura 1. Mecanismos de resistencia de pilotes a compresión y tracción

La elección de los métodos de cálculo se define a partir de una combinación de factores, tales como: el tipo de pilote y su método constructivo (en particular reconociendo una marcada diferencia entre los análisis para pilotes excavados respecto de aquellos por desplazamiento), las características del perfil geotécnico (especialmente considerando la variación de comportamiento entre ambientes de suelos friccionales, cohesivos o rocas), la naturaleza, cantidad y confiabilidad de los datos (asociados con el tipo de ensayos realizado, su repetitividad y representativa de las condiciones del ambiente afectado), los parámetros intrínsecos de resistencia de los diferentes estratos que conforman el suelo de fundación (obtenidos, o deducidos, a partir de los ensayos de campo y laboratorio).

Una vez obtenidas la resistencia unitaria de punta y fuste, a partir del criterio y modelo de cálculo adoptado, se define la resistencia geotécnica última del pilote, aplicando los valores unitarios sobre las respectivas superficies de afectación (punta y fuste). De esta forma, la resistencia última total del pilote es la suma de estos dos componentes, tal como se muestra en la ecuación 5.

$$Q_u = Qp_u + Qf_u \quad (5)$$

donde:

Q_u = Resistencia última geotécnica del pilote

Qp_u = Resistencia última de punta

Qf_u = Resistencia última de fuste.

En relación al peso propio del pilote, para los criterios de diseño basados en LRFD se considera como una acción o carga externa mayorada por el factor correspondiente a las cargas permanentes. En los métodos basados en tensiones admisibles, es

posible evaluar la resistencia geotécnica admisible del pilote restando el peso propio del pilote, de forma que la sollicitación de servicio es independiente del peso del pilote.

A continuación, se desarrollan los diferentes métodos de diseño de pilotes, que presentan variaciones en su análisis y cálculo de acuerdo al criterio de diseño adoptado.

Análisis según método global

El método global de evaluación de la capacidad geotécnica de un pilote, se basa en el método de las tensiones admisibles, utiliza la formulación de clásica de reducir la resistencia última de punta y de fuste por un factor de seguridad global. En el caso en estudio, teniendo en cuenta el desarrollo e interacción de la resistencia de un pilote aportado por cada mecanismo resistente, se utiliza un factor de seguridad global para la punta igual a 3,0 y un factor de seguridad global para el fuste de 2,0.

Análisis según conceptos de Eurocódigo

El Eurocódigo 7 establece disposiciones generales, que se complementan con las disposiciones específicas establecidas por cada país. En este análisis se siguen los lineamientos correspondientes al Anejo Nacional Español.

La normativa de España adopta para este tipo de verificaciones el denominado Enfoque de Proyecto 2 (Design Approach 2, DA-2), caracterizado por la aplicación simultánea de factores parciales a las acciones y a las resistencias. A diferencia de otros enfoques contemplados por el Eurocódigo 7, en este procedimiento los parámetros resistentes del terreno utilizados para el cálculo permanecen inalterados, siendo las resistencias obtenidas las que posteriormente se someten a minoración mediante coeficientes específicos.

La primera etapa del proceso consiste en la determinación de las acciones de cálculo que actúan sobre el pilote. Estas acciones derivan de las cargas transmitidas por la superestructura y por los elementos de cimentación asociados. A partir de los valores característicos de las acciones permanentes (P) y variables (Q), se aplican los coeficientes parciales establecidos en la normativa estructural para situaciones persistentes o transitorias. En términos generales, las acciones permanentes desfavorables se mayoran mediante un coeficiente de 1,35 (γ_g), mientras que la acción variable principal se mayoran mediante un coeficiente de 1,50 (γ_q). La combinación resultante proporciona el esfuerzo axial de cálculo que deberá ser resistido por el pilote. La sollicitación de diseño correspondiente a las acciones mayoradas, para el caso de combinación de carga permanente con sobrecarga variable se expresan según la Ecuación 6.

$$E_d = P \gamma_g + Q \gamma_q \quad (6)$$

Para la valoración de los componentes de resistencia, y con objeto de incorporar al proceso de diseño, las incertidumbres propias de la caracterización geotécnica, la norma establece la aplicación de coeficientes parciales específicos sobre cada mecanismo resistente. En el caso de pilotes excavados calculados mediante métodos analíticos, la resistencia por punta se minoran mediante el coeficiente (γ_b), mientras que la resistencia por fuste se minoran mediante el coeficiente (γ_s). La existencia de coeficientes diferenciados responde al distinto nivel de variabilidad y fiabilidad

asociado a cada mecanismo. En general, la resistencia de punta presenta una mayor dispersión debido a la sensibilidad del comportamiento frente a las condiciones locales del terreno existente bajo la base del pilote, mientras que la resistencia por fuste suele desarrollarse de manera más gradual y predecible a lo largo de una superficie extensa de contacto.

La principal singularidad de este procedimiento es la introducción de un factor adicional denominado factor de modelo ($\gamma_{R,d}$). Este coeficiente constituye una herramienta destinada a considerar explícitamente la incertidumbre asociada al procedimiento de cálculo empleado para estimar la capacidad portante del pilote. El factor de modelo refleja la posible discrepancia entre la resistencia real que desarrollará el pilote durante su funcionamiento y la resistencia estimada mediante fórmulas analíticas o correlaciones empíricas. Aunque dos proyectos dispongan de campañas geotécnicas de calidad similar, la capacidad portante obtenida puede variar significativamente en función del método de predicción utilizado. Diferentes formulaciones pueden conducir a resultados distintos debido a las hipótesis simplificadoras adoptadas, a la base experimental utilizada para su calibración o a las condiciones particulares para las que fueron desarrolladas. La resistencia de diseño se expresa de acuerdo a la Ecuación 7.

$$R_d = \frac{R_b}{\gamma_b \gamma_{Rd}} + \frac{R_s}{\gamma_s \gamma_{Rd}} \quad (7)$$

Análisis según conceptos de AASHTO

El enfoque de diseño de pilotes por el método LRFD (AASHTO 2024) evalúa explícitamente las incertidumbres asociadas a las acciones externas y a la resistencia del sistema mediante la aplicación de factores parciales diferenciados, con el objetivo de garantizar niveles uniformes de seguridad y fiabilidad estructural.

La determinación de las acciones de diseño se realiza mediante las combinaciones de carga establecidas por AASHTO para los distintos estados límite. En el caso de la capacidad geotécnica axial, las verificaciones suelen desarrollarse bajo las combinaciones correspondientes al Estado Límite de Resistencia, donde intervienen cargas permanentes, sobrecargas de tránsito y otras acciones relevantes para la estructura. Los factores de carga aplicados dependen del tipo de acción y de la combinación considerada, reflejando la incertidumbre asociada a la estimación de las solicitaciones.

La resistencia nominal del pilote puede estimarse mediante métodos analíticos basados en parámetros geotécnicos, correlaciones derivadas de ensayos de campo o procedimientos calibrados a partir de bases de datos experimentales. La resistencia nominal calculada representa la estimación de la capacidad portante del pilote antes de la aplicación de factores de seguridad.

A diferencia de la metodología empleada en el Eurocódigo 7, AASHTO no introduce coeficientes parciales independientes para cada componente resistente ni un factor específico asociado al modelo de cálculo. En su lugar, todas las fuentes de incertidumbre se integran en el factor de minoración resistencia (ϕ), cuyo valor depende del método utilizado para determinar la capacidad portante. De este modo,

procedimientos con mayor respaldo experimental o con verificación mediante ensayos de carga reciben factores de resistencia más elevados, mientras que métodos con mayor incertidumbre se asocian a valores más conservadores.

Esta filosofía reconoce que la fiabilidad de la predicción geotécnica depende no sólo de la calidad de la caracterización del terreno, sino también de la capacidad del método de cálculo para reproducir el comportamiento real de la cimentación. Como consecuencia, el valor del coeficiente de minoración de resistencia (ϕ) constituye el principal mecanismo mediante el cual AASHTO LRFD incorpora la incertidumbre global del proceso de diseño.

La Tabla 2 sintetiza los valores recomendados para los factores parciales de seguridad de Eurocódigo 7 y AASHTO LRFD.

Concepto	Eurocódigo 7 + Anejo Nacional Español	AASHTO LRFD 2024
Acción permanente desfavorable	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_{DC} \approx 1,25$
Acción permanente favorable	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_{DC} \approx 1,00$
Acción variable principal	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_{LL} = 1,75$
Resistencia por punta	$\gamma_b = 1,35$	Incluido en ϕ
Resistencia por fuste	$\gamma_s = 1,10$	Incluido en ϕ
Factor de modelo	$\gamma_{R,d} = 1,40$	Incluido en ϕ
Factor global de resistencia geotécnica	No aplica	$\phi \approx 0,45 - 0,65$
Modificador de carga por ductilidad, redundancia e importancia operativa	No aplica	$\eta = \eta_d \cdot \eta_r \cdot \eta_i$
Modificador de ductilidad	No aplica	$\eta_D = 1,00$ (habitual)
Modificador de redundancia	No aplica	$\eta_R = 1,00$ (habitual)
Modificador de importancia operativa	No aplica	$\eta_I = 1,00$ (habitual)

Tabla 2. Factores parciales de seguridad de acuerdo a Eurocódigo 7 y AASHTO LRFD

Modelaciones Realizadas y Resultados Obtenidos

Se ha considerado una carga externa del sistema de 1.330 kN, de los cuales 1.000 kN se corresponden con carga de peso propio y permanentes, y el resto de 330 kN corresponde a las cargas variables.

Para cada condición geotécnica planteada se ha identificado la geometría de pilote que satisface el diseño en cada uno de los métodos. A partir de los resultados obtenidos se han comparado la resistencia efectiva del pilote con las solicitaciones para la evaluación de un “factor de seguridad global”. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 3, 4 y 5.

Estos resultados han sido representados en forma gráfica en las Figuras 2 y 3.

Condición de Cálculo	Solicitaciones		Solic de Cálculo	Capacidad de Carga			Factor Seg Global	Dimensión del Pilote	
	P	Q		Fuste	Punta	Total		Diámetro	Longitud
	(kN)	(kN)		(kN)	(kN)	(kN)		(m)	(m)
Global	1,000	330	1,330	1,272	170	1,442	2.30	0.90	15.00
Eurocódigo	1,000	330	1,845	1,666	319	1,985	2.56	1.05	15.00
AASHTO	1,000	330	1,828	1,626	332	1,958	2.86	1.15	15.00

Tabla 3. Diseño de un pilote flotante

Condición de Cálculo	Solicitaciones		Solic de Cálculo	Capacidad de Carga			Factor Seg Global	Dimensión del Pilote	
	P	Q		Fuste	Punta	Total		Diámetro	Longitud
	(kN)	(kN)		(kN)	(kN)	(kN)		(m)	(m)
Global	1,000	330	1,330	919	487	1,406	2.48	0.65	15.00
Eurocódigo	1,000	330	1,845	1,110	780	1,891	2.69	0.70	15.00
AASHTO	1,000	330	1,828	1,131	885	2,016	3.05	0.80	15.00

Tabla 4. Diseño de un pilote mixto

Condición de Cálculo	Solicitaciones		Solic de Cálculo	Capacidad de Carga			Factor Seg Global	Dimensión del Pilote	
	P	Q		Fuste	Punta	Total		Diámetro	Longitud
	(kN)	(kN)		(kN)	(kN)	(kN)		(m)	(m)
Global	1,000	330	1,330	77	1,327	1,404	3.11	0.65	15.00
Eurocódigo	1,000	330	1,845	86	1,835	1,921	2.99	0.65	15.00
AASHTO	1,000	330	1,828	82	1,847	1,930	3.41	0.70	15.00

Tabla 5. Diseño de un pilote de punta con método LRFD

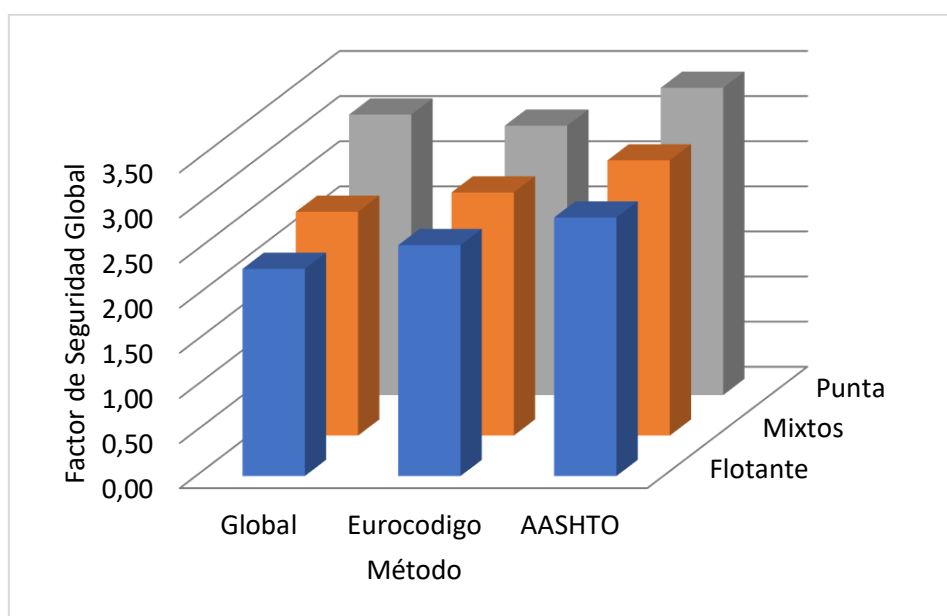


Figura 2. Factor de seguridad global para diferentes métodos de diseño y tipo de pilotes

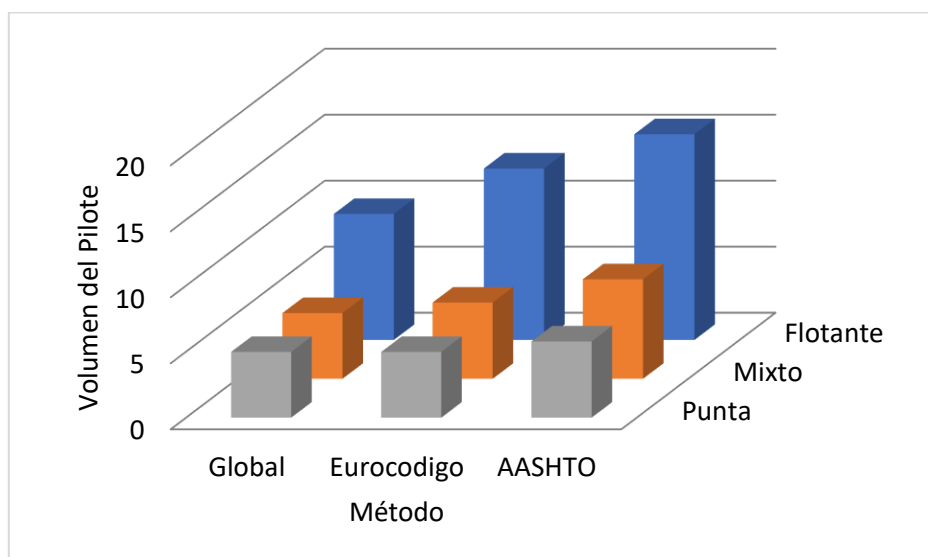


Figura3. Incidencia de volumen de pilote para diferentes métodos de diseño y tipología de pilotes para el caso de estudio

Los resultados permiten formular las siguientes observaciones.

- En el grupo de los pilotes “flotantes”, el método global de diseño muestra un condicionamiento de la capacidad geotécnica por el fuste, por lo que resulta un factor de seguridad único que tiende a un valor próximo a 2.0. La falta de diferenciación en el factor de minoración de resistencia de AASHTO determina que el factor de seguridad global para este caso se encuentre cercano a 3.0, mientras que el Eurocódigo alcanza un valor intermedio entre los anteriores. Esta definición incide igualmente en la geometría del pilote, adoptando una longitud constante, demanda un diámetro menor para el sistema del método global, intermedio para el Eurocódigo y el mayor diámetro y volumen de pilote resulta para el método AASHTO, según se observa en la Figura 3.
- Una tendencia similar se aprecia para los otros dos grupos de pilotes analizados en este trabajo. En el caso de los pilotes con resistencia mixta, el factor de seguridad global se localiza en el orden de 2.5, mientras que, en el grupo de los pilotes de punta, el factor global tiende a 3.0. Los volúmenes definidos para cada método muestran una variación incremental desde valores mínimos del método global, intermedios para el diseño según Eurocódigo y volúmenes máximos para el método AASHTO, según se observa en la Figura 3.
- En términos generales, los factores de seguridad globales calculados en los casos planteados no muestran diferencias sensibles, según se aprecia en la Figura 2.

CONSIDERACIONES FINALES

En función de los estudios y análisis realizados es posible formular a las siguientes consideraciones finales:

- Los métodos ASD integran en un único concepto, denominado factor de seguridad global, la variabilidad de las solicitaciones y las resistencias, para un escenario de simulación determinado. Esta condición se procura diferenciar en los métodos LRFD, utilizando factores parciales de mayoración de las solicitaciones y coeficientes de minoración de las resistencias basados en conceptos de fiabilidad. Particularmente, estos coeficientes tienen su mayor impacto en las verificaciones de resistencia en estado límite último (ULS).
- En efecto, en los métodos LRFD se pueden fijar factores de mayoración diferenciados sobre las solicitaciones, tanto según el tipo de carga, como la combinación de estados de carga correspondiente al caso en análisis. Estos factores pueden mostrar diferencias significativas según el escenario de carga considerado, pero también según el método de diseño empleado, AASHTO o Eurocódigo.
- En los métodos LRFD las minoraciones de resistencia pueden diferenciarse según se trate del aporte del mecanismo resistente del fuste o de la punta. Adicionalmente, estos factores pueden variar según el método de cálculo que se aplique, o las fuentes de identificación de los parámetros geotécnicos que dan lugar a las resistencias. Se puede destacar que los factores de minoración de resistencia se pueden incrementar cuando se cuenta con resultados de ensayos de campo del comportamiento de pilotes.
- En relación con el análisis de solicitaciones y resistencias globales, el factor de seguridad único o global no muestra una diferencia significativa entre los distintos métodos de diseño de pilotes. En el caso del método ASD los valores del coeficiente de seguridad global para los casos en estudio del presente trabajo se encuentran entre 2.30 y 3.11, dependiendo de una mayor participación en la capacidad geotécnica del fuste o la punta respectivamente.
- En el caso de los dos métodos LRFD analizados en el presente trabajo, los valores del coeficiente de seguridad global para los casos en estudio se encuentran en un rango comprendido entre 2.56 y 3.41, es decir un valor medio de 2.99, o 3.0 a los fines prácticos, lo que implica que en general, para diseños convencionales de pilotes, los métodos LRFD reproducen los valores de seguridad global resultantes de la aplicación de los métodos ASD, coincidente con los criterios de calibración de los factores parciales de seguridad que utilizan tanto AASHTO como Eurocódigo.
- Sin embargo, las soluciones obtenidas para cada método de diseño aplicado pueden demandar cimentaciones con variación en las dimensiones de los pilotes de cierta importancia según el caso.
- Al respecto, mediante el método “global” mostrado en el presente trabajo se obtienen las soluciones geotécnicas de fundaciones de menor volumen respecto a los métodos de diseño de estados límite o LRFD. Esta conclusión no puede entenderse como una afirmación respecto de que los métodos ASD generan

soluciones optimizadas o más eficientes respecto de los métodos LRFD. En todo caso, deben interpretarse como una tendencia de análisis que pone el énfasis en que los métodos LRFD presentan una mejor interpretación de las variables intervinientes en el problema, y en la posibilidad de su caracterización en términos probabilísticos.

- Si bien la experiencia y la práctica profesional muestra que los diseños realizados siguiendo un método de diseño ASD o método “global” presentan un adecuado comportamiento, tanto en resistencia como en control de asentamientos, los diseños realizados mediante un enfoque LRFD brindan mayores herramientas para el diseño de fundaciones, arrojando coeficientes de fiabilidad homogéneos para diferentes casos de aplicación. La mayor parte de las reglamentaciones basadas en LRFD insisten en la importancia de la calibración “local” de los factores de minoración de resistencia, a fin de ajustar los diseños a los resultados satisfactorios comprobados en cada región en las que se emplee.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO (2024). LFRD Bridge Design Specifications. 10th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials. ISBN: 978-1-56051-738-2.

ABNT (2019). NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Norma Brasileira. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Architectural Institute of Japan (AIJ) (2001) Recommendations for the Design of Building Foundations. Tokyo.

AS 2159, (2009). Piling, Design and Installation. Australian Standard. Committee C-018.

Becker, D.E. (1996). An overview of the foundation design process. Part I. Eighteenth Canadian Geotechnical Colloquium: Limit States Design For Foundations. Canadian Geotechnical Journal. December 1996. <https://doi.org/10.1139/t96-124>

Bowles, J.E. (1997). Foundations Analysis and Design. Fifth Edition. Mc-Graw Hills Ed.

Bond & Harris, (2008). Decoding Eurocode 7. CRC Press. ISBN 0203937724, 9780203937723.

CEDEX, “Anejo Nacional Español del Eurocódigo 7” y Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: Bases del proyecto geotécnico.

CSA (2019). Technical Guide: Design and construction considerations for foundations in permafrost regions. Canadian Standard Association.

Das, B.M. (2011). Principles of Foundation Engineering, SI. Seventh Edition

Décourt, L., Quaresma, A. R. (1978). Capacidad de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. VI COBRAMSEF – 6o Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia De Fundações, Rio de Janeiro.

EN 1990 (2002) Eurocode: Basis of structural design. ICS 91.010.30. Ref. code: EN 1990:2002+A1.

EN 1997-1 (2004). Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1 to 3. European standard codes. ICS 91.060.01; 91.120.20. Ref code: EN 1997-2004.

Honjo, Y., Kikuchi, Y., Shirato, M., (2010). Development of the design codes grounded on the performance based design concept in japan. Soils Found. 50, 983–1000. <https://doi.org/10.3208/sandf.50.983>.

Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M, (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. E&FN Spon.

FHWA (2018). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. Geotechnical Engineering Circular No. 10 (GEC 10).

INVIAS, 2015. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14.

Leoni, A.J. (2024). “Diseño de fundaciones mediante método tradicional con coeficientes de seguridad global y comparación con método LRFD”.

NCh3206, (2010). Manual de Carreteras, Volumen 3: Instrucciones de Diseño.

MTC Perú, (2018). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Puentes.

SCT (2016). Manual de Proyecto de Puentes.

Tokimatsu, K., Suzuki, H., (2004). Pore water pressure response around pile and its effects on p-y behavior during soil liquefaction. Soils Found. 44 (6), 101–110.

Tomlinson M. & Woodward, J. (2015). Pile Design and Construction Practice. Fifth Edition. Taylor and Francis.