



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE **LOJA**

La Universidad Católica de Loja

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DE CIMENTACIONES DE PUENTES CON PILOTES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”

**TRABAJO DE FIN DE
CARRERA PREVIO A
LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

DATOS GENERALES

AUTOR:

Fabián Patricio Tandazo Espinoza

DIRECTOR:

Ing. José Hurtado

LOJA - ECUADOR

2010



Ing. José C. Hurtado Hurtado

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado la tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, realizada por el Profesional en formación: Fabián Patricio Tandazo Espinoza, cuyo título es: “IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DE CIMENTACIONES DE PUENTES CON PILOTES EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (LVIG)”; tema que cumple con las características exigidas por la reglamentación de la Escuela de Ingeniería Civil, por tanto, autorizo su presentación.

Ing. José C. Hurtado Hurtado



AUTORÍA

El contenido en general; conceptos, análisis, criterios, y desarrollo del programa es de exclusiva responsabilidad del autor.

Fabián Patricio Tandazo Espinoza



CESIÓN DE DERECHOS

Yo, *Fabián Patricio Tandazo Espinoza*, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la universidad”.

Fabián Patricio Tandazo Espinoza



AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, y a sus docentes, quienes me han brindado todo su apoyo en el transcurso de mis estudios.

Al Ingeniero José C. Hurtado H., Director de Tesis, por su generosidad científica, paciencia en el traspaso y explicación de conocimientos, y por hacer posible la culminación de este proyecto a través de su guía.

En especial a mis padres que han sido la principal guía en mi desarrollo personal y profesional, y a mis hermanos por brindarme su cariño y estímulo para seguir adelante.

A mis compañeros y muy apreciados amigos, por su apoyo incondicional durante toda la etapa universitaria.

El Autor



DEDICATORIA

A Dios, fuente de luz e inspiración.

A mi mamá Esperanza Espinoza Gutiérrez y a mi papá Francisco Tandazo , por todo el apoyo y confianza depositada durante toda esta etapa de preparación; a mis hermanos Dolores Margarita y Paco Alexander, motivo de superación y los principales autores en mi formación personal, profesional y académica.

A mis familiares y amigos que siempre me han ofrecido su apoyo y cariño.

Fabián Patricio Tandazo Espinoza



RESUMEN

Tandazo E., Fabián. Implementación del diseño de cimentaciones de puentes con pilotes en el laboratorio virtual de ingeniería geotécnica (LVIG). Las cimentaciones de puentes mediante pilotaje, es una de las técnicas más antiguas que el hombre ha utilizado para superar las dificultades de la cimentación debido a la presencia de suelos blandos, debido a que los esfuerzos transmitidos por la estructura no pueden ser distribuidos suficientemente a través de una cimentación superficial, o que el terreno tiende a sufrir grandes variaciones estacionales: por hinchamientos y retracciones.

En la actualidad, gracias a numerosas investigaciones, el pilotaje es una técnica convenientemente aplicable como alternativa de cimentación para un sinnúmero de estructuras, especialmente puentes.

La presente investigación ha permitido desarrollar aplicaciones web para el diseño de cimentaciones de puentes con pilotes, empleando: el lenguaje de programación de *Visual Basic.Net 2005*, distintos controles de *Ajax*, y lenguaje de *Java script*.

Estas aplicaciones permiten reducir considerablemente el tiempo de diseño de cimentaciones profundas. Además, dentro de la escuela de Ingeniería Civil, constituyen un aporte para el entorno enseñanza – aprendizaje, ya que las herramientas pueden ayudar a los estudiantes, a corroborar las metodologías de cálculo para el diseño de cimentaciones con pilotes.

Entre las herramientas desarrolladas tenemos:

- Herramienta “*Capacidad de carga de hundimiento de pilotes*”, permite determinar la capacidad admisible del suelo frente a sollicitaciones de carga axial, la cual se aplica sobre un pilote aislado, para lo cual se determina: la capacidad de carga por punta mediante el método de Vesic, de la Normativa española, o considerando que la punta está empotrada en roca; la capacidad de carga por fricción, para lo cual se emplea el método de Meyerhof, el método α , el método λ , y el método de la normativa española. En caso de que el análisis de hundimiento no sea satisfactorio para el pilote aislado, la herramienta dispone de un método que permite determinar la capacidad de carga de hundimiento para una cimentación compuesta por un grupo de pilotes.



- Herramienta “*Asentamiento del pilote individual*”, permite calcular el asentamiento que presenta un pilote aislado, frente a la aplicación de una carga axial, y a la capacidad admisible del suelo sobre el cual se realizará la cimentación. Para el proceso de cálculo la herramienta dispone del método de Vesic y del método de Bowles.

- Herramienta “*Asentamiento del grupo de pilotes*”, determina el asentamiento que presenta el grupo de pilotes frente a la aplicación de una carga vertical, para lo cual considera, que el grupo de pilotes trabaja como un bloque equivalente, cimentado sobre un tipo de suelo con características elásticas similares. La metodología destinada a determinar el asentamiento de grupo ha sido extraída de la Normativa española.

- Herramienta “*Diseño sísmico de pilotes: metodología DDBD*”, esta herramienta permite determinar el diseño sísmico de un pilote mediante el *método directo basado en desplazamientos*, el cual requiere la predicción de la demanda de ductilidad y del correspondiente nivel de amortiguamiento para un determinado desplazamiento que se toma como objetivo de diseño.

- Herramienta “*Diseño sísmico de pilotes: metodología LRFD*”, permite determinar el diseño sísmico de un pilote aplicando el método *LRFD 2004 (Load and resistance factor design)*, el cual es un método de análisis sísmico basado en fuerzas, en el que se diseña a la estructura para resistir una cierta fuerza sísmica, disminuida según un factor de reducción R, el mismo que depende de la importancia de la obra.

Además se elaboraron manuales de usuario para cada una de las herramientas, para lo cual se ha tomado como referencia diferentes metodologías cuyo proceso de cálculo es de carácter analítico.

Con el fin de hacer más agradable la interfaz visual de las herramientas, y de proporcionar cierta ayuda al usuario durante el ingreso de datos, se han incorporado: esquemas de cimentación para cada una de las aplicaciones, valores recomendados para distintos parámetros, y en algunos casos, enlaces entre herramientas (*links*).

Todas estas aplicaciones han sido satisfactoriamente implementadas en el *Laboratorio virtual de ingeniería geotécnica (LVIG)*. Para poder hacer uso de estas herramientas se debe ingresar gratuitamente, como usuario registrado del LVIG, vía online a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la sección de *DISEÑO/Pilotes*.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA	ii
CESIÓN DE DERECHOS	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
CAPÍTULO I	
PERFIL DEL PROYECTO	
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 SOLUCIÓN	3
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.4.1 General.....	3
1.4.2 Específicos.....	3
1.5 METODOLOGÍA.....	3
CAPÍTULO II	
ESTADO ACTUAL DE HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES CON PILOTES	
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 MEJORAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	6
CAPÍTULO III	
DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE DISEÑO DE PILOTES	
3.1 INTRODUCCIÓN	9
3.2 COMPONENTE INGENIERIL.....	9
3.2.1 Capacidad de carga de hundimiento	9
3.2.2 Capacidad de carga de hundimiento para un grupo de pilotes.....	24
3.2.3 Asentamiento de un pilote individual.....	27
3.2.4 Asentamiento para el grupo de pilotes	31
3.2.5 Diseño sísmico de pilotes.....	35
3.3 COMPONENTE INFORMÁTICA	49
	viii



CAPÍTULO IV

EJEMPLOS DE VERIFICACIÓN

4.1 CAPACIDAD DE CARGA DE HUNDIMIENTO DE PILOTES	53
4.2 ASENTAMIENTO INDIVIDUAL DE PILOTES	68
4.3 ASENTAMIENTO DE UN GRUPO DE PILOTES	74
4.4 DISEÑO SÍSMICO DE PILOTES: METODOLOGÍA DDBD	82
4.5 DISEÑO SÍSMICO: METODOLOGÍA LRFD.....	93

CAPÍTULO V

MANUALES DE USUARIO

5.1 INTRODUCCIÓN	104
5.2 CÁLCULO DE: CAPACIDAD DE CARGA DE HUNDIMIENTO.	104
5.3 CÁLCULO DE: ASENTAMIENTO DEL PILOTE AISLADO.	124
5.4 CÁLCULO DE: ASENTAMIENTO DEL GRUPO DE PILOTES.	131
5.5 DISEÑO SÍSMICO DE PILOTES: MÉTODO DDBD	138
5.6 DISEÑO SÍSMICO DE PILOTES: MÉTODO LRFD.....	152

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.....	165
6.2 RECOMENDACIONES	165

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
---	------------



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Esquema de cargas que intervienen en cimentaciones con pilotes.....	10
Figura 3.2	Compactación de arena cercana a pilotes hincados	15
Figura 3.3	Resistencia por fricción para pilotes en arena.....	16
Figura 3.4	(a) Variación de c_u con la profundidad y (b) Variación del esfuerzo vertical efectivo con la profundidad.....	19
Figura 3.5	Varios tipos de distribución de la resistencia por fricción unitaria a lo largo del fuste del pilote	28
Figura 3.6	Vista en planta y distribución geométrica de un grupo de pilotes.....	32
Figura 3.7	Modelo equivalente para un pilote con cabeza empotrada	35
Figura 3.8	(a) Sistema suelo – pilote y (b) Modelo cantiléver equivalente	44
Figura 4.1	Esquema estratigráfico del suelo de cimentación (Ejemplo 1 de hundimiento) ..	53
Figura 4.2	Esquema estratigráfico del suelo de cimentación (Ejemplo 2 de hundimiento). .	61
Figura 4.3	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el pilote aislado (Ejemplo 2 de asentamiento).....	68
Figura 4.4	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación del pilote aislado (Ejemplo 2 de asentamiento).....	71
Figura 4.5	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el grupo de pilotes (Ejemplo 1 de asentamiento de grupo)	74
Figura 4.6	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el grupo de pilotes (Ejemplo 2 de asentamiento de grupo)	78
Figura 4.7	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante (Ejemplo 1 de diseño sísmico)	82
Figura 4.8	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 2 de diseño sísmico).....	87
Figura 4.9	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 1 de diseño sísmico)	93
Figura 4.10	Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 2 de diseño sísmico)	98

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1	Variación del factor λ con la longitud de empotramiento.....	18
Gráfica 3.2	Espectro de aceleraciones y Espectro de desplazamientos.....	40
Gráfica 3.3	Espectro de aceleraciones	46



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1	Valores de índice de rigidez del suelo.....	13
Cuadro 3.2	Coefficiente de presión efectivo de la tierra en función del tipo de pilote	17
Cuadro 3.3	Valores de α en relación a la cohesión no drenada de una arcilla	20
Cuadro 3.4	Resistencia típica a compresión no confinada de las rocas	24
Cuadro 3.5	Valores típicos del ángulo de fricción ϕ de rocas.....	24
Cuadro 3.6	Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas.....	29
Cuadro 3.7	Valores de α y L_e para pilas en arenas y arcillas	36
Cuadro 3.8	Valores de L_i	37
Cuadro 3.9	Parámetros para modelos de amortiguamiento histerético en sistemas de pilotes prebarrenados de cabeza empotrada	39
Cuadro 3.10	Estado límite de serviciabilidad	39
Cuadro 3.11	Valores de α para pilotes en arenas y arcillas.....	45
Cuadro 3.12	Valores representativos de E_s para arcillas	46
Cuadro 3.13	Valores representativos de n_h para arenas.....	46
Cuadro 4.1	Resumen de resultados de capacidad de carga de hundimiento del pilote individual (Ejemplo 1).....	60
Cuadro 4.2	Resumen de resultados de capacidad de carga de hundimiento del grupo de pilotes (Ejemplo 1).....	60
Cuadro 4.3	Resumen de resultados de capacidad de carga de hundimiento del pilote individual (Ejemplo 2).....	68
Cuadro 4.4	Resumen de resultados de asentamiento del pilote individual (Ejemplo 1)	71
Cuadro 4.5	Resumen de resultados de asentamiento del pilote individual (Ejemplo 2)	73
Cuadro 4.6	Resumen de resultados de asentamiento del grupo de pilotes (Ejemplo 1).....	77
Cuadro 4.7	Resumen de resultados de asentamiento del grupo de pilotes (Ejemplo 2).....	81
Cuadro 4.8	Resumen de resultados del diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 1)	87
Cuadro 4.9	Resumen de resultados del diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 2)	93
Cuadro 4.10	Resumen de resultados del diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 1)	97
Cuadro 4.11	Resumen de resultados del diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 2)	102



CAPÍTULO I

PERFIL DEL PROYECTO



1.1 INTRODUCCIÓN

El pilotaje es una de las técnicas más antiguas que el hombre ha utilizado para superar las dificultades de la cimentación de estructuras en suelos blandos. Antes del siglo XIX, la cimentación más común eran zapatas continuas, y solo si el terreno era incapaz de soportar las presiones que ejercían las zapatas, se utilizaban pilotes, y el diseño de estas cimentaciones estaba basado únicamente en la experiencia (Alva, 2003).

En la actualidad, gracias a numerosas investigaciones, el pilotaje es una técnica convenientemente aplicable como alternativa de cimentación para un sinnúmero de estructuras, como son: edificios, puentes, etc.

Los pilotes son miembros estructurales hechos de acero, concreto o madera y son usados para construir cimentaciones. A pesar del costo, el uso de pilotes es a menudo necesario para garantizar la seguridad estructural.

La cimentación con pilotes se utiliza cuando:

- Los esfuerzos transmitidos por la estructura no pueden ser distribuidos suficientemente a través de una cimentación superficial.
- El terreno tiende a sufrir grandes variaciones estacionales: por hinchamientos y retracciones.
- Los estratos próximos al cimiento pueden provocar asentos imprevisibles y a cierta profundidad, caso que ocurre en terrenos de relleno o de baja calidad.
- En estructuras sobre el agua.
- Para resistir cargas inclinadas.
- Para el recalce de cimientos existentes.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día existen diversas herramientas útiles para realizar diseños y estudios relacionados con las cimentaciones por pilotaje, mejorando así la calidad tanto de enseñanza como de aprendizaje, y además de ello reducen el tiempo de diseño en comparación a métodos convencionales.



En la UCG (Unidad Civil Geología y Minas) de la Universidad Técnica Particular de Loja, se está llevando a cabo la implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería Geotécnica (LVIG), el cual no posee una herramienta para el diseño de cimentaciones con pilotes: siendo esta un medio de gran aporte tecnológico para el entorno de aprendizaje, y además como una herramienta de diseño para los estudiantes universitarios y profesionales en general.

1.3 SOLUCIÓN

Como solución al problema anteriormente planteado se pretende implementar una herramienta de diseño para cimentaciones con pilotes en el laboratorio virtual de ingeniería geotécnica mediante la utilización del software Visual Basic.NET.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 General

Desarrollar una aplicación en Visual Basic.Net para el diseño de Cimentaciones con pilotes y la implementación de la aplicación en el Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica.

1.4.2 Específicos

- Proporcionar una herramienta que permita mejorar el entorno enseñanza – aprendizaje de la Ingeniería de Cimentaciones.
- Aprender el lenguaje de programación para *Visual Basic.net*.
- Diseñar cimentaciones profundas con pilotaje, considerando diferentes condiciones de nivel freático.
- Desarrollar la aplicación del diseño de cimentaciones con pilotes.
- Implementar la aplicación en el Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica.
- Estimular a los estudiantes de la Universidad Técnica Particular de Loja para que sean partícipes del Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica (LVIG).

1.5 METODOLOGÍA

La metodología comprenderá los siguientes puntos:

- Recopilación de información acerca del diseño de cimentaciones con pilotes para puentes.



-
- Capacitación y aprendizaje de programa Visual Basic.net.
 - Estudio de los diseños de cimentaciones con pilotes para diferentes tipos de estratos.
 - Desarrollo de la aplicación de diseño de cimentaciones con pilotes en Visual Basic.net.
 - Implementación de la aplicación del diseño de cimentaciones con pilotes en el Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica.
 - Desarrollo de manuales de uso de la aplicación del diseño de cimentaciones con pilotes.
 - Verificación del correcto funcionamiento de la aplicación del diseño de cimentaciones con pilotes.



CAPÍTULO II

ESTADO ACTUAL DE HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES CON PILOTES.



2.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día se puede encontrar varias herramientas para el Diseño de Cimentaciones con Pilotes. Pero en la mayoría de los casos las licencias de las aplicaciones son muy costosas, y no están sujetas a fines educativos, sino únicamente profesionales. Además, se produce cierta incertidumbre al momento de ingresar datos, ya que en algunos casos el programa requiere parámetros, que para un usuario sin acceso a información especializada y con conocimientos teóricos limitados, serán difíciles de obtener o interpretar, ya que las aplicaciones carecen de ábacos, nomogramas, etc.

En lo que respecta a herramientas web y de código abierto, hasta el momento no se ha desarrollado ninguna aplicación para el diseño de pilotes en el contexto nacional. Por lo tanto esta herramienta constituye un nuevo instrumento de aprendizaje para los estudiantes de Ingeniería Civil de la UTP y para profesionales en general.

2.2 MEJORAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

En la Universidad Técnica Particular de Loja, la Escuela de Ingeniería Civil, ha venido trabajando en la creación del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line, en la cual se encontrarán herramientas de análisis y diseño, las mismas que serán de gran ayuda a los estudiantes y profesionales interesados en temas específicos de carácter geotécnico.

Dentro de este laboratorio virtual se encuentra la herramienta para el diseño de pilotes, la misma que se desarrolló en base a: normativas internacionales (Norma Española, AASHTO LRFD 04-09), a metodologías geotécnicas basadas en distintos textos especializados, como *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* de Braja M. Das, *Foundation Analysis and Design* de Jhosep Bowles, *Bridge Engineering Handbook* de Wai-Fah Chen y Lian Duan, *Diseño Sísmico de pilas con pilotes pre-barrenados incluyendo la interacción suelo-estructura* de Suárez Vinicio y Mervyn Kowalsky, *Recomendaciones del Ministerio de Fomento de España, Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias 2005* (ROM -05), y en cuanto a diseño estructural la metodología se basa en el Código ACI 2008, Código ecuatoriano de la construcción, y AASHTO LRFD 04-09.



Todas las metodologías empleadas para los procesos de cálculo, se describen en el manual respectivo.

Las interfaces web de algunas aplicaciones presentan tablas que permiten al usuario observar valores recomendados para distintos parámetros a ingresarse para el cálculo. Además la herramienta posee un ejercicio que ejemplifica el proceso de diseño y comprueba el correcto funcionamiento de la aplicación.

Finalmente la herramienta *diseño de pilotes* es un instrumento web, que puede ser actualizado continuamente, conforme al avance investigativo y científico de metodologías, normas y técnicas referentes al diseño de cimentaciones pilotadas. También se podrá mejorar la interface visual de acuerdo a las necesidades que surjan.



CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE DISEÑO DE PILOTES



3.1 INTRODUCCIÓN

La presente herramienta de diseño, tiene como finalidad calcular, en base a la geometría del elemento y las características de los materiales en el que se encuentra inmerso, los diferentes parámetros como: *capacidad de carga de hundimiento tanto en pilotes individuales como en grupo, asientos tanto en pilotes individuales como en grupo, y además el Diseño sísmico de pilotes por el método basado en desplazamientos (DDBD) y por el método basado en fuerzas (LRFD).*

Para la realización de esta herramienta se utilizaron dos componentes importantes, como es el componente ingenieril (Ingeniería Civil) y el componente informático (Ingeniería Informática).

3.2 COMPONENTE INGENIERIL

Los cálculos se basan en las metodologías propuestas por: la *Guía de Cimentaciones para obras de carreteras* del “Ministerio de Fomento, España” (MFOM); normativas internacionales (Norma Española, AASHTO LRFD 04-09), textos especializados como *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* de Braja M. Das, *Foundation Analysis and Design* de Bowles, *Bridge Engineering Handbook* de Wai-Fah Chen y Lian Duan, *Diseño Sísmico de pilas con pilotes pre-barrenados incluyendo la interacción suelo-estructura* de Suárez Vinicio y Mervyn Kowalsky, y en cuanto a diseño estructural la metodología se basa en el *Código ACI 2008, Código ecuatoriano de la construcción, y AASHTO LRFD 04 - 09.*

A continuación se describen todas las metodologías que la herramienta utiliza para el diseño de cimentaciones con pilotes.

3.2.1 Capacidad de carga de hundimiento

La capacidad última de carga de un pilote se determina mediante una ecuación que consiste en la suma de la carga tomada en la punta del pilote más la resistencia total por fricción generada en la interfaz suelo-pilote (*Figura 3.1*).

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

Q_u – Capacidad de carga de hundimiento

- Q_p – Resistencia por punta
 Q_s – Resistencia por fuste

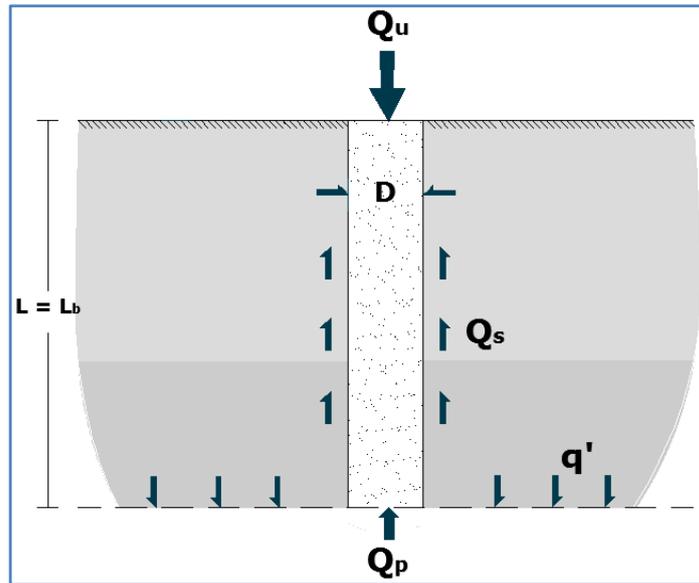


Figura 3.1 Esquema de cargas que intervienen en cimentaciones con pilotes
Fuente: El Autor

3.2.1.1 Capacidad de carga por punta, Q_p

La resistencia última, Q_p , por área unitaria desarrollada en la punta del pilote se expresa por una ecuación similar a la de una cimentación superficial, con la diferencia de que se reemplaza el ancho de zapata, B , por el diámetro del pilote, D , pero los valores de N_c^* , N_q^* y N_γ^* serán diferentes (Braja Das, 2001). (Ecuación 2).

$$Q_u = Q_p = cN_c^* + qN_q^* + \gamma DN_\gamma^* \quad \text{Ec. 2}$$

Como el ancho D de un pilote es relativamente pequeño, el término γDN_γ^* se cancela del lado derecho de la ecuación anterior sin introducir un error considerable.

$$Q_p = cN_c^* + \sigma'_v N_q^* \quad \text{Ec. 3}$$

El valor de presión vertical efectiva q , fue reemplazado por σ'_v en la (Ecuación 4) para indicar un esfuerzo vertical efectivo. Por consiguiente, la carga de punta de pilotes es



$$Q_p = A_p q_p = A_p (c N_c^* + \sigma'_v N_q^*) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- A_p – Área de la punta del pilote
- c – Cohesión del suelo que soporta la punta del pilote
- q_p – Resistencia unitaria por punta
- σ'_v – Esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote
- $N_c^* N_q^*$ – Factores de capacidad de carga

La herramienta *Diseño de Pilotes* dispone de dos métodos para determinar la capacidad de carga por punta, el método de *Vesic* y el de *La Norma Española*, los cuales han sido seleccionados debido a que son procesos analíticos que consideran todas las condiciones presentes en el suelo sobre el cual se va a cimentar.

A continuación se describen los métodos utilizados por la herramienta para determinar la capacidad de carga por punta.

3.2.1.1.1 Método de Vesic

Este método se basa en la teoría de expansión de cavidades y en parámetros de esfuerzo efectivo para estimar la capacidad de carga por punta de un pilote. (*Braja Das, 2001*).

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c N_c^* + \sigma'_o N_{\sigma}^*) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- A_p – Área de la punta del pilote
- σ'_o – Esfuerzo (efectivo) normal medio del terreno al nivel de la punta del pilote
- K_o – Coeficiente de presión de tierra en reposo

El coeficiente K_o se puede determinar mediante la (*Ecuación 6*).

$$K_o = 1 - \text{sen } \phi \quad \text{Ec. 6}$$



Donde:

ϕ – Ángulo de fricción del suelo

El esfuerzo efectivo normal medio se determina mediante la (Ecuación 7).

$$\sigma'_o = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_v \quad \text{Ec. 7}$$

El término σ'_v es la presión vertical efectiva, la cual se determina a través de la (Ecuación 8), donde Z es el espesor del estrato de suelo.

$$\sigma'_v = \gamma Z \quad \text{Ec. 8}$$

Se observa que la (Ecuación 5) es una modificación de la (Ecuación 4), donde intervienen los factores de capacidad N_q^* y N_σ^* , que se determinan mediante las (Ecuaciones 9 y 10) respectivamente.

$$N_q^* = \frac{1+\text{sen}\phi}{1-\text{sen}\phi} e^{\pi \text{tg}\phi} \quad \text{Ec. 9}$$

De acuerdo con la teoría de Vesic, $N_\sigma^* = f(I_r)$ por lo tanto se tiene

$$N_\sigma^* = \frac{3}{3-\text{Sen}\phi} e^{\frac{(90-\phi)\pi}{180}} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) I_r^{\frac{4 \text{ Sen}\phi}{3(1+\text{sen}\phi)}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

I_r – Índice de rigidez del suelo

En la mayoría de los casos la condición que se presenta en los suelos granulares es que se considera al suelo sin cambio de volumen (arena densa o arcilla saturada), es decir que la deformación unitaria promedio en la zona plástica por debajo de la punta del pilote (Δ) es cero, por lo que $I_r = I_{rr}$, entonces

$$N_c^* = \left(\frac{4}{3}\right) [\ln(I_{rr}) + 1] + \left(\frac{\pi}{2}\right) + 1 \quad \text{Ec. 11}$$



Los valores de I_r se obtienen de pruebas de laboratorio para consolidación y triaxiales correspondientes a los niveles apropiados de esfuerzo. Sin embargo, se recomiendan los siguientes valores:

Tipo de suelo	I_r
Arena	70 - 150
Limos y Arcillas (condición drenada)	50 - 100
Arcillas (condición no drenada)	100 - 200

Cuadro 3.1 Valores de índice de rigidez del suelo
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

3.2.1.1.2 Método de la normativa española

Cuando se conozcan las características resistentes del terreno en términos del modelo de *Mohr-Coulomb*, se podrá utilizar la siguiente expresión para el cálculo de la capacidad resistente por punta (*MFOM, 2005*).

$$Q_p = A_p(N_q^* \sigma'_{vo} + N_c^* c) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

- A_p – Área de la punta del pilote
- σ'_{vo} – Presión vertical efectiva al nivel de la punta.
- N_q^*, N_c^* – Factores de capacidad de carga para cimentaciones profundas
- c – Cohesión

Los factores de capacidad de carga se determinan mediante las (Ecuaciones 13 y 14), respectivamente.

$$N_q^* = 1.5 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{\pi \tan \phi} f_D \quad \text{Ec. 13}$$

$$N_c^* = \frac{N_q^* - 1}{\tan \phi} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

- ϕ – Ángulo de rozamiento interno del suelo.
- f_D – Factor de corrección por tamaño del pilote. Se tomará:

$$f_D = 1 - \frac{1}{3} D > \frac{2}{3} \quad \text{Ec. 15}$$



Donde:

D – Diámetro del pilote en metros.

El ángulo de rozamiento ϕ debe obtenerse mediante ensayos de laboratorio realizados con muestras inalteradas sometidas a las altas presiones que suelen existir en la zona de la punta de los pilotes. A falta de ensayos, el ángulo de rozamiento puede deducirse indirectamente mediante correlaciones a partir de los datos disponibles.

Esta aproximación se considera adecuada para profundidades de la punta inferiores o iguales a 20 diámetros ($z_{punta} \leq 20 D$). Para profundidades mayores ($z_{punta} > 20 D$) se utilizará como valor de σ'_{vo} , la presión vertical efectiva a una profundidad igual a veinte diámetros.

Para comprobar las situaciones de corto plazo, en las que se supone que $\phi_{\text{cálculo}} = 0$, el valor de N_c^* dado por las expresiones anteriores, debe tomarse igual a:

$$N_c^*(\phi_{\text{cálculo}}=0) = 9 f_D \quad \text{Ec. 16}$$

Siendo f_D el parámetro anteriormente referido para tener en cuenta el efecto del diámetro del pilote.

3.2.1.2 Capacidad de carga por fricción, Q_s

La resistencia por fricción o superficial de un pilote se expresa como

$$Q_f = \int_0^L f p dz \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

p – Perímetro de la sección del pilote

f – Resistencia unitaria por fuste

z – Profundidad medida desde la superficie del terreno.

En general, la resistencia unitaria por fuste es variable con la profundidad, el cálculo de la misma normalmente requiere la integración indicada en la expresión precedente. En los casos en que la resistencia por fuste sea constante por tramos

y también lo sea el contorno del pilote en cualquier sección horizontal, la resistencia por fuste tiene una expresión más sencilla; sería una sumatoria con un término por cada tramo:

$$Q_f = \Sigma(f A_f) \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

- A_f – Área de contacto entre el fuste del pilote y el terreno en cada tramo.
 f – Resistencia unitaria por fuste en cada tramo.

3.2.1.2.1 Resistencia por fricción en suelos granulares

A. Método de Meyerhof

Según *Meyerhof* la resistencia por fricción Q_s se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_s = \Sigma(p \Delta L f) \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

- ΔL – Espesor del estrato de suelo

La resistencia unitaria por fricción f , es difícil de estimar. Al calcular f deben tenerse en cuenta varios factores importantes, como: La naturaleza de la instalación del pilote. Para los pilotes hincados en arena, la vibración provocada por el hincado del pilote permite la densificación del suelo a su alrededor (*Braja Das, 2001*).

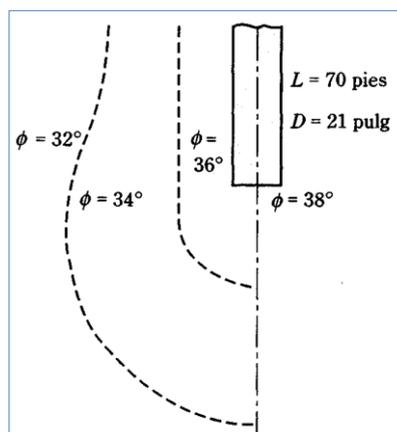


Figura 3.2 Compactación de arena cercana a pilotes hincados
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

En base a observaciones de campo se ha determinado que la fricción unitaria superficial crece con la profundidad casi linealmente, hasta una profundidad de L' y permanece luego constante. La magnitud de la profundidad crítica L' es de entre 15 y 20 diámetros del pilote. Para un diseño conservador se tiene entonces

$$L' = 15 D$$

Ec. 20

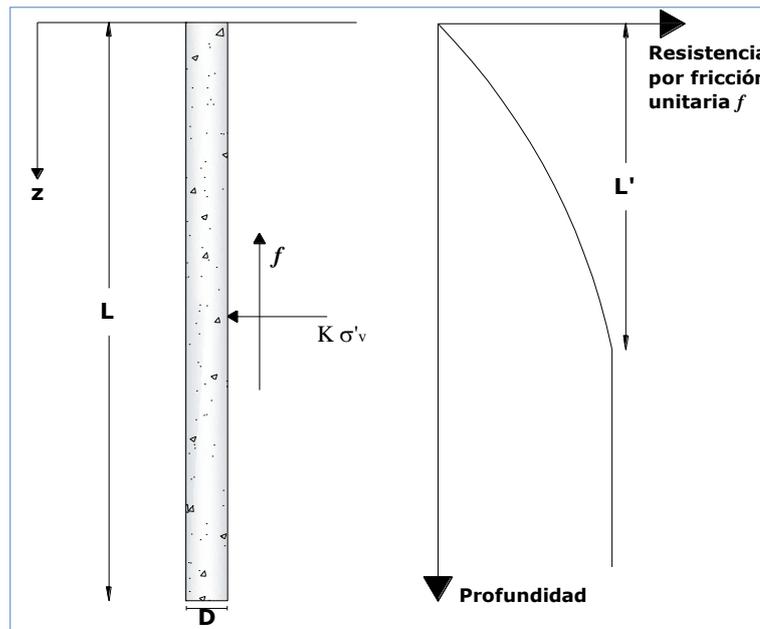


Figura 3.3 Resistencia por fricción para pilotes en arena
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

A profundidades similares, la fricción unitaria superficial en arena suelta es mayor para un pilote de alto desplazamiento que para un pilote de bajo desplazamiento.

Considerando los factores anteriores, se da una relación aproximada para f (Figura 3.3):

Para $z = 0$ a L'

$$f = K \sigma'_v \tan \delta \quad \text{Ec. 21}$$

Y para $z = L'$ a L

$$f = f_z = L' \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

K – Coeficiente de presión efectivo de la tierra

σ'_v – Esfuerzo vertical efectivo a la profundidad bajo consideración



δ – Ángulo de fricción entre suelo y pilote

La magnitud de K varía con la profundidad, y es aproximadamente igual al coeficiente, K_p de presión pasiva de Rankine en la parte superior del pilote y menor que el coeficiente K_0 de la presión en reposo a una profundidad mayor. Con base en los resultados disponibles actualmente, los siguientes valores promedio de K son recomendados para usarse en la (Ecuación 21).

TIPO DE PILOTE	K
Perforado	$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$
Hincado, de bajo desplazamiento	$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ a $1.4 K_0 = 1.4(1 - \text{sen}\phi)$
Hincado, de alto desplazamiento	$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ a $1.8 K_0 = 1.8(1 - \text{sen}\phi)$

Cuadro 3.2 Coeficiente de presión efectivo de la tierra en función del tipo de pilote
Fuente: Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y subterráneas, MFOM, 2005

Los valores de δ dados por distintos investigadores están dentro del rango de 0.5ϕ a 0.8ϕ . Se requiere buen juicio al escoger el valor de δ . Para este cálculo la herramienta trabaja con $2/3\phi$, esto debido a que se desea considerar un valor intermedio de δ .

A partir de las consideraciones anteriores, la (Ecuación 19) puede escribirse de la siguiente manera para determinar la resistencia por fricción para un suelo granular

$$Q_s = K \sigma'_v \tan \delta p \Delta L \quad \text{Ec. 23}$$

3.2.1.2.2 Resistencia por fricción en suelos cohesivos

La estimación de la resistencia por fricción superficial de pilotes en arcilla es casi tan difícil como en arenas debido a la presencia de variables que no son cuantificadas fácilmente. Actualmente se dispone en la literatura técnica de varios métodos para obtener la resistencia unitaria por fricción de pilotes. Los procedimientos utilizados por la herramienta se describen a continuación.

A. Método λ

Según *Vijayvergiya y Focht*, este método se fundamenta en la hipótesis de que el desplazamiento del suelo causado por el hincado del pilote produce una presión lateral pasiva a cualquier profundidad y que la resistencia unitaria superficial promedio se determina mediante la (Ecuación 24). (*Braja Das, 2001*).

$$f_{prom} = \lambda (\overline{\sigma'_v} + 2 \overline{c_u})$$

Ec. 24

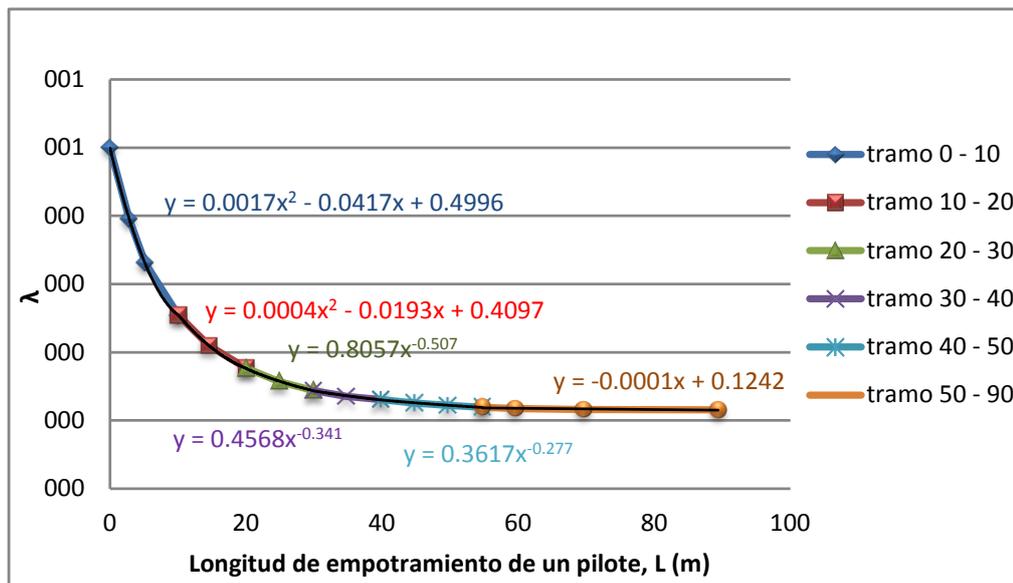
Donde:

$\overline{\sigma'_v}$ – Esfuerzo vertical efectivo medio para toda la longitud de empotramiento

c_u – Resistencia cortante media no drenada ($\phi = 0$)

λ – Coeficiente que varía con la profundidad de empotramiento

Para determinar el valor del coeficiente λ la herramienta dispone de ecuaciones exponenciales basadas en la (Gráfica 3.1).



Gráfica 3.1 Variación del factor λ con la longitud de empotramiento

Fuente: El Autor

Tales ecuaciones han sido obtenidas para distintos rangos de longitud de empotramiento, entonces se tiene

Rango de 0 a 10 m

$$\lambda = 0.0017L^2 - 0.0417L + 0.4996$$

Ec. 25

Rango de 10 – 20 m

$$\lambda = 0.0004L^2 - 0.0193L + 0.4097$$

Ec. 26

Rango de 20 – 30 m

$$\lambda = 0.8057L^{-0.507}$$

Ec. 27

Rango de 30 – 40 m

$$\lambda = 0.4568L^{-0.341}$$

Ec. 28

Rango de 40 – 50 m

$$\lambda = 0.3617L^{-0.277} \quad \text{Ec. 29}$$

Rango de 50 – 90 m

$$\lambda = -0.0001L + 0.1242 \quad \text{Ec. 30}$$

Para obtener los valores de $\bar{\sigma}'_v$ en suelos estratificados se emplea la (Ecuación 31).

$$\bar{\sigma}'_v = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{L} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

A_1, A_2, A_3, \dots – Áreas de los diagramas del esfuerzo vertical efectivo. Figura 3.4b

L – Longitud total de empotramiento

El valor de \bar{c}_u en suelos estratificados se explica en la (Figura 3.4a), de ahí que se deduce que la cohesión media se puede obtener con la expresión siguiente

$$\bar{c}_u = \frac{c_{u(1)} L_1 + c_{u(2)} L_2 + \dots}{L} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

$c_{u1,2,\dots}$ – Cohesión no drenada de cada estrato de suelo

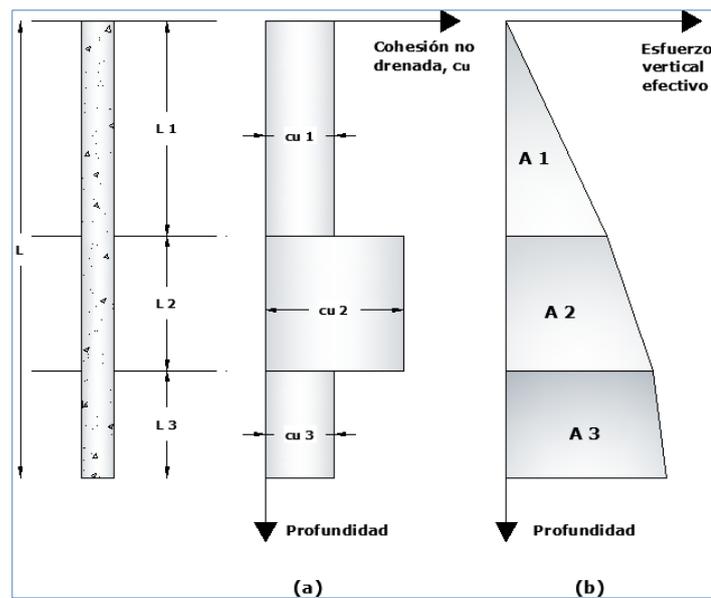


Figura 3.4 (a) Variación de c_u con la profundidad y (b) Variación del esfuerzo vertical efectivo con la profundidad

Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



Obtenida la resistencia por fricción unitaria, se procede a determinar la resistencia total por fricción de acuerdo a la (Ecuación 33).

$$Q_s = p L f_{prom} \quad \text{Ec. 33}$$

B. Método α

De acuerdo a éste método, la resistencia unitaria superficial en suelos arcillosos se representa por la (Ecuación 34).

$$f = \alpha c_u \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

- α – Factor empírico de adhesión
- c_u – Cohesión no drenada del suelo

Valores aproximados de α se muestran en el (Cuadro 3.3). Se observa además que para arcillas normalmente consolidadas con $c_u < \text{aprox. } 50 \text{ KN/m}^2$, $\alpha = 1$.

Cu (KPa)	α
0	1
50	0.95
100	0.8
150	0.65
200	0.6
250	0.55
300	0.5

Cuadro 3.3 Valores de α en relación a la cohesión no drenada de una arcilla
Fuente: Foundation Engineering Handbook, Manjriker Gunaratne, 2006

Al igual que con el factor λ , la herramienta dispone de una ecuación para determinar el valor de α , esta es

$$\alpha = 0.000003c_u^2 - 0.0028c_u + 1.031 \quad \text{Ec. 35}$$

Dicha ecuación ha sido determinada en base al (Cuadro 3.3).

De acuerdo a las consideraciones anteriores, la capacidad de carga por fricción se obtiene empleando la (Ecuación 36).



$$Q_s = \sum(\alpha c_u p \Delta L)$$

Ec. 36

Donde:

ΔL – Espesor del estrato

C. Método de la Normativa Española

Esta metodología permite determinar la resistencia por fricción en suelos granulares, cohesivos, o en suelos combinados, es decir que presenten cohesión y ángulo de fricción

- Suelos Granulares

La resistencia friccional unitaria en suelos granulares se estimará con la (Ecuación 37).

$$f = \sigma'_v K F \tan \phi$$

Ec. 37

Donde:

σ'_v – Presión vertical efectiva al nivel considerado.

K – Coeficiente de empuje empírico.

F – Factor de reducción del rozamiento del fuste.

ϕ – Ángulo de rozamiento interno del suelo granular.

Para pilotes hincados se tomará $K=0.75$ y para pilotes perforados se tomará $K=0.5$. Para pilotes híbridos, se tomará un valor intermedio en función de los valores antes mencionados.

Para pilotes de hormigón *in situ* o de madera se tomará $F = 1$. Para pilotes prefabricados de hormigón se tomará $F = 1$ y para pilotes de acero en el fuste se tomará $F = 0.9$.

El valor de f , además, no sobrepasará los siguientes límites:

- Pilotes hincados $f < 125 \text{ KPa}$
- Pilotes excavados $f < 90 \text{ KPa}$



- Suelos Cohesivos

La resistencia por fricción unitaria será:

$$f = \frac{100s_u}{100+s_u} \quad (f \text{ y } s_u \text{ en KPa}) \quad \text{Ec. 38}$$

La resistencia al corte sin drenaje del suelo, s_u , se puede deducir mediante ensayos de campo y laboratorio.

Una vez determinada la resistencia por fricción unitaria f se procede a determinar la resistencia por fricción total utilizando la expresión siguiente

$$Q_s = \sum(f p \Delta L) \quad \text{Ec. 39}$$

3.2.1.3 Capacidad admisible

Determinada la capacidad de carga por punta Q_p y la resistencia por fuste Q_s , se procede a calcular la capacidad de carga de hundimiento última mediante la (Ecuación 1), entonces

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Debe considerarse además un factor de seguridad razonable para obtener la carga total admisible del pilote. (Ecuación 40)

$$Q_{adm} = \frac{Q_u}{FS} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

Q_{adm} – Capacidad admisible de carga para cada pilote

Q_u – Capacidad de carga última

FS – Factor de seguridad

El factor de seguridad FS generalmente varía entre 3 y 4 (MFOM, 2005), dependiendo de las incertidumbres del cálculo de la carga última.

En caso de que no se verifique que la capacidad admisible Q_{adm} no supera la carga axial aplicada al pilote P , se presentan dos alternativas para el rediseño de



la cimentación. La primera es aumentar el diámetro del pilote, y la segunda es considerar el efecto de grupo, para lo cual se determina un número recomendado de pilotes mediante la relación entre la carga axial P y la carga admisible Q_{adm} .

3.2.1.4 Capacidad de carga por punta sobre roca

En ciertas ocasiones los pilotes se hincan hasta un estrato subyacente rocoso. Por lo tanto, se debe evaluar la capacidad de carga de la roca. La resistencia unitaria última de punta en roca es aproximadamente

$$Q_p = q_u (N_\phi + 1) \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

q_u – Resistencia a compresión no confinada de la roca

ϕ – Ángulo de fricción drenado de la roca

N_ϕ – Factor de capacidad de carga (Ecuación 42)

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi / 2) \quad \text{Ec. 42}$$

La resistencia a compresión no confinada de la roca se determina por medio de pruebas en laboratorio sobre especímenes de roca obtenidos durante investigaciones de campo.

Se debe considerar además, el efecto de escala que se produce por fracturas pequeñas y grandes distribuidas aleatoriamente y también por rupturas progresivas a lo largo de planos de deslizamiento. Dicho efecto se basa en el hecho de que si el diámetro del espécimen crece, la resistencia a compresión no confinada decrece. Para especímenes mayores que 1 m de diámetro, el valor de q_u permanece aproximadamente constante. Aproximadamente existe una reducción de cuatro a cinco veces la magnitud de q_u en este proceso. Por lo tanto, se recomienda utilizar la (Ecuación 43).

$$q_{u(diseño)} = \frac{q_{u(lab)}}{5} \quad \text{Ec. 43}$$



El (Cuadro 3.4) proporciona valores (de laboratorio) representativos de resistencias a compresión no confinada de rocas. Y el (Cuadro 3.5) da valores representativos del ángulo ϕ , de fricción de rocas.

TIPO DE ROCA	q_u (MN/m ²)
Arenisca	70 - 140
Caliza	105 - 210
Lutita	35 - 70
Granito	140 - 210
Mármol	60 - 70

Cuadro 3.4 Resistencia típica a compresión no confinada de las rocas
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

TIPO DE ROCA	ÁNGULO DE FRICCIÓN, ϕ (grados)
Arenisca	27 - 45
Caliza	30 - 40
Lutita	10 - 20
Granito	40 - 50
Mármol	25 - 30

Cuadro 3.5 Valores típicos del ángulo de fricción ϕ de rocas
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Debe usarse un factor de seguridad FS de por lo menos 3 para determinar la capacidad de carga admisible de punta en pilotes sobre roca. Entonces se tiene

$$Q_p = \frac{(q_{u(diseño)} (N_{\phi} + 1)) A_p}{FS} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

A_p – Área de la sección transversal del pilote

3.2.2 Capacidad de carga de hundimiento para un grupo de pilotes

Normalmente los pilotes se agrupan para formar cimentaciones a las que se da continuidad mediante el encepado. Dicho encepado es un elemento estructural cuya misión es transmitir las cargas a los pilotes y no al terreno. De hecho, su apoyo al terreno será débil o inexistente debido a la elevada rigidez de los pilotes. La separación entre pilotes es una variable fundamental tanto para el



comportamiento del terreno como para la distribución de cargas en el grupo. Dicha separación d suele estar en el rango de $2.5 D$ a $4 D$ (Braja Das, 2001).

El cálculo de la capacidad de carga de grupos de pilotes es sumamente complicado, y hasta la actualidad el desarrollo de este cálculo todavía no se ha completado.

En pilotes cimentados sobre **suelos granulares** existe una mejora de la resistencia de hundimiento debido a la compactación del suelo en las inmediaciones del grupo. El máximo efecto se observa para $d = 3.5 D$. Para valores muy superiores ($d \gg 3.5 D$) los pilotes se comportarán como aislados y la mejora por efecto grupo será despreciable. Para valores muy inferiores ($d \cong 2 D$) queda poco suelo entre los pilotes y se pierde eficiencia. (MFOM, 2005)

La eficiencia de la capacidad de carga de grupo se define de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{Q_{(u)}} \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

η – Eficiencia de grupo

$Q_{g(u)}$ – Capacidad última de carga del grupo de pilotes

$Q_{(u)}$ – Capacidad última de carga de cada pilote considerado aisladamente

En base a los espaciamientos dentro del grupo, los pilotes actúan de dos formas:

a) Como un *bloque* cuyas dimensiones son $L_g \times B_g \times L$.

En este caso la capacidad por fricción se define como $[f_{prom} p_g L]$, siendo p_g el perímetro del bloque $[p_g = 2(n_1 + n_2 - 2) d + 4D]$ donde: $n_1 =$ número de pilotes por fila y $n_2 =$ número de pilotes por columna y $[f_{prom} =$ resistencia por fricción unitaria].

El número de los pilotes en el grupo es $= n_1 \times n_2$

Si $L_g \geq B_g$ entonces

$$L_g = (n_1 - 1)d + 2\left(\frac{D}{2}\right) \quad \text{Ec. 46}$$

$$B_g = (n_2 - 1)d + 2\left(\frac{D}{2}\right) \quad \text{Ec. 47}$$



b) Como pilotes individuales, en donde $Q_u \approx p L f_{prom}$ (p es el perímetro de la sección transversal del pilote)

Se tiene entonces:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} = \frac{f_{prom} [2(n_1+n_2-2) d+4D] L}{p n_1 n_2 L f_{prom}} = \frac{2(n_1+n_2-2) d+4D}{p n_1 n_2} \quad Ec. 48$$

Por lo tanto,

$$Q_{g(u)} = \left[\frac{2(n_1+n_2-2) d+4D}{p n_1 n_2} \right] \sum Q_u \quad Ec. 49$$

Si el espaciamiento d (entre ejes de los pilotes) es suficientemente grande la eficiencia resulta superior a 1 ($\eta > 1$), entonces los pilotes actúan como pilotes individuales. En la práctica se tiene

Si $\eta < 1$,

$$Q_{g(u)} = \eta \sum Q_u \quad Ec. 50$$

Y si $\eta \geq 1$,

$$Q_{g(u)} = \sum Q_u \quad Ec. 51$$

En pilotes cimentados sobre **suelos arcillosos**, independientemente de la forma de ejecución, se produce remoldeo de la arcilla lo que suele reducir la eficiencia del grupo de pilotes. Normalmente se puede expresar como la (Ecuación 50), es decir:

$$Q_{g(u)} = \eta \sum Q_u$$

En la que η recibe el nombre de coeficiente de eficiencia. Dicho coeficiente se puede calcular mediante el *Coficiente de grupo de Los Ángeles* (Ecuación 52).

$$\eta = 1 - \frac{\beta}{\pi} \left(\frac{n_1 (n_2-1) + n_2 (n_1-1) + \sqrt{2} (n_1-1) (n_2-1)}{n_1 n_2} \right) \quad Ec. 52$$

Donde:

$$\beta = \arctan \left(\frac{D}{2} \right) \quad Ec. 53$$

n_1 es el número de pilotes por fila y n_2 es el número de pilotes por columna del grupo.

En el caso de arcillas, para separaciones pequeñas ($d < 2D$) no debe descartarse



la posible rotura en bloque del grupo como si de una cimentación semiprofunda se tratara. En este caso puede llegarse a:

$$Q_{g(u)} < 0.65 \sum Q_u \quad \text{Ec. 54}$$

Lo que normalmente requeriría de un cálculo en presiones de hundimiento suponiendo rotura global del conjunto (cimentación superficial con planta la del grupo y empotramiento igual a la profundidad de los pilotes).

En el caso de grupos de pilotes en roca se puede llegar a tener separaciones pequeñas de hasta $d = 1.5D$ sin reducción de las cargas de hundimiento.

3.2.3 Asentamiento de un pilote individual

En cuanto al asentamiento de pilotes, la herramienta dispone de dos métodos para su cálculo, los cuales se describen a continuación

3.2.3.1 Método de Vesic

Según Vesic, el asentamiento de un pilote S , sometido a una carga de trabajo vertical Q_w , se debe a la sumatoria de tres componentes (Ecuación 55).

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

- S – Asentamiento total del pilote
- S_1 – Asentamiento elástico del pilote
- S_2 – Asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote
- S_3 – Asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote

- Asentamiento elástico del pilote S_1

Este se determina cuando el material del pilote se supone elástico, entonces la deformación del fuste se evalúa usando los principios fundamentales de la mecánica de materiales, mediante la (Ecuación 56).

$$S_1 = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L}{A_p E_p} \quad \text{Ec. 56}$$

Donde:

- Q_{wp} – Carga en la punta del pilote bajo condición de carga de trabajo
- Q_{ws} – Carga por resistencia de fricción (superficial) bajo condición de carga de trabajo
- A_p – Área de la sección transversal del pilote
- L – Longitud del pilote
- E_p – Módulo de elasticidad del material del pilote
- ξ – Coeficiente que depende de la distribución de la resistencia por fricción

La magnitud de ξ varía según la distribución de la resistencia por fricción (superficial) unitaria a lo largo del fuste. Cuando la distribución de f es uniforme o parabólica, como muestran las (Figuras 3.5a y 3.5b), $\xi = 0.5$. Y, para una distribución triangular de f (Figura 3.5c), la magnitud de ξ es aproximadamente de 0.67 (Braja Das, 2001).

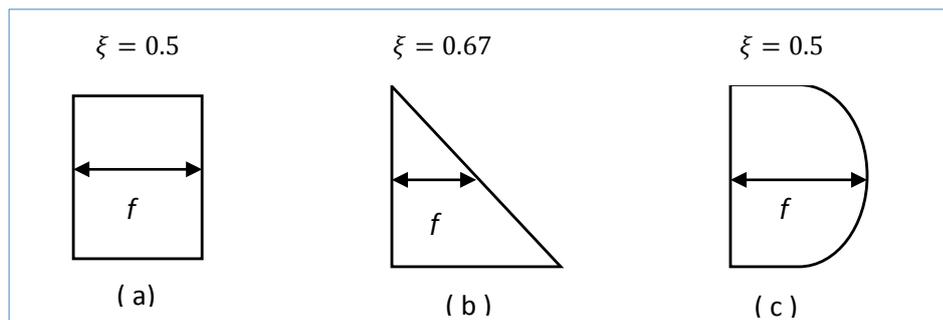


Figura 3.5 Varios tipos de distribución de la resistencia por fricción unitaria a lo largo del fuste del pilote

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

- Asentamiento debido a cargas transmitidas a la punta del pilote S_2

Al igual que en cimentaciones superficiales, el asentamiento de un pilote causado por la carga en la punta se expresa de la siguiente manera (Braja Das, 2001), (Ecuación 57).

$$S_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad \text{Ec. 57}$$

Donde:

- D – Ancho o diámetro del pilote
- q_{wp} – Carga puntal por área unitaria en la punta del pilote = Q_{wp}/A_p
- E_s – Módulo de elasticidad del suelo en o bajo la punta del pilote



- μ_s – Relación de Poisson del suelo
 I_{wp} – Factor de influencia = 0.85

El (Cuadro 3.6) presenta valores recomendados, de módulos de elasticidad y coeficientes de Poisson, para distintos tipos de suelo.

TIPO DE SUELO	Rango de valores típicos	Coeficiente de Poisson, ν (adimensional)	Estimación de E_s a partir de N	
	Módulo de Young, E_s (MPa)		Tipo de suelo	E_s (MPa)
Arcilla:				
Blanda sensible	2.4 - 15	0.4 - 0.5 (no drenada)	Limos, limos arenosos, mezclas levemente cohesivas.	0.4 N1
Medianamente rígida a rígida	15 - 50		Arenas limpias finas a medias y arenas levemente limosas.	0.7 N1
Muy rígida	50 - 100		Arenas gruesas y arenas con poca grava.	1.0 N1
			grava arenosa y gravas.	1.1 N1
Loes	15 - 60	0.1 - 0.3	grava arenosa y gravas	1.1 N1
Limo	2 - 20	0.3 - 0.35		
			Estimación de E_s a partir de S_u	
Arena fina:		0.25	Arcilla blanda sensible.	400Su - 1000Su
Suelta	7.5 - 10			
Medianamente densa	10 - 20			
Densa	20 - 25		Arcilla medianamente rígida a rígida.	1500Su - 2400Su
Arena:		0.20 - 0.35	Arcilla muy rígida.	3000Su - 4000Su
Suelta	10 - 25			
Medianamente densa	25 - 50			
Densa	50 - 75	0.30 - 0.40		
			Estimación de E_s a partir de q_c	
Grava:			Suelos arenosos.	4 q_c
Suelta	25 - 75	0.20 - 0.35		
Medianamente densa	75 - 100			
Densa	100 - 200	0.30 - 0.40		

Cuadro 3.6 Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas
Fuente: U.S. Department of the Navy y Bowles, 1988

- **Asentamiento debido a cargas transmitidas en el fuste del pilote S_3**

El asentamiento de un pilote provocado por la carga producida por el fuste se describe mediante la (Ecuación 58).

$$S_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad \text{Ec. 58}$$



Donde:

- p – Perímetro del pilote
- L – Longitud empotrada del pilote
- I_{ws} – Factor de influencia

El factor de influencia, I_{ws} tiene una relación empírica simple (Braja Das, 2001)

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad \text{Ec. 59}$$

3.2.3.2 Método de Bowles

El asentamiento del pilote puede estimarse siguiendo el procedimiento que se presenta a continuación:

- a. Calcular la fuerza axial promedio sobre el pilote para, el área promedio de la sección transversal A_p , y el módulo de elasticidad del pilote E_p , con estos datos se procede a determinar el asiento causado por la fuerza axial aplicada sobre el elemento (Ecuación 60).

$$S_1 = \Delta H_a = \frac{P_{av} \Delta L}{A_p E_p} \quad \text{Ec. 60}$$

Donde:

- P_{av} – Carga aplicada al pilote
- ΔH_a – Asentamiento causado por la carga axial aplicada al pilote = S_1
- A_p – Área de la sección transversal del pilote
- E_p – Módulo de elasticidad del pilote
- ΔL – Segmento de longitud del pilote, en este caso $\Delta L = L$

- b. Calcular el asentamiento debido a la carga en la punta del pilote mediante la (Ecuación 61).

$$S_2 = \Delta H_{pt} = \Delta q D \frac{1-\mu^2}{E_s} m I_s I_F F_1 \quad \text{Ec. 61}$$

Donde:

- $m I_s$ – Factor de diseño para pilotes = 1
- I_F – Factor de empotramiento



		$I_F = 0.55$ si $L/D \leq 5$
		$I_F = 0.50$ si $L/D > 5$
D	–	Diámetro del pilote
μ	–	Relación de Poisson del suelo
Δq	–	Presión de apoyo sobre la punta = P_{av}/A_p
E_s	–	Módulo de elasticidad del suelo
F_1	–	Factor de reducción
		0.25 si la resistencia por fricción axial reduce la carga por punta $P_p \leq 0$
		0.50 si la carga por punta es predominante $P_p > 0$
		0.75 si la resistencia por fricción es predominante

El factor F_1 es usado para explicar que, la zona de la punta se desplaza hacia abajo, como resultado de la carga actuante sobre la punta, y el asentamiento causado por la resistencia a fricción a lo largo del fuste que empuja el sistema hacia abajo.

c. Sumar el asentamiento debido a la carga axial y de punta para obtener el asentamiento total del pilote.

$$S = \Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt} \quad \text{Ec. 62}$$

Donde

$$\Delta H_p = S \quad \text{–} \quad \text{Asentamiento total del pilote}$$

3.2.4 Asentamiento para el grupo de pilotes

Para determinar el asentamiento de un grupo de pilotes se ha implementado en la herramienta el método propuesto por la *Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras del Ministerio de Fomento de España*.

Según esta guía el asiento, S_g , de un grupo de pilotes depende de varios factores, tales como:

- La carga vertical que actúa sobre el grupo.
- Las características geométricas del grupo.
- La deformabilidad general del terreno en la zona de apoyo.
- La deformabilidad local del terreno, en la zona próxima al contacto del terreno con los pilotes (zona de máxima deformación, que tiene unos pocos centímetros de amplitud).

La carga vertical que actúa sobre el grupo, P , puede representarse por el valor que mejor se asimile a la situación de proyecto en cuestión.

El grupo de pilotes puede quedar representado por una malla con un número de filas, n_1 , y un número de columnas, n_2 , en cuyos vértices se ubican los pilotes con diámetro D , longitud L y con separación, d , entre filas y columnas. En ese caso el ancho (dimensión menor en planta) y la longitud (dimensión mayor en planta) del grupo serían: $[B_g = (n_1 - 1)d + D]$ y $[L_g = (n_2 - 1)d + D]$

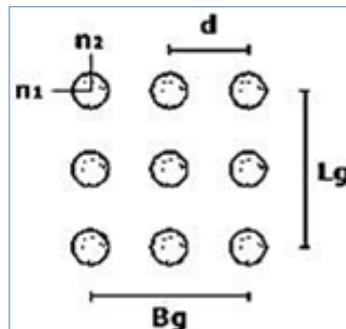


Figura 3.6 Vista en planta y distribución geométrica de un grupo de pilotes
Fuente: El Autor

La deformabilidad local del terreno no se puede definir fácilmente y por ello su efecto se considerará de manera indirecta.

Para la definición de la deformabilidad global del terreno, se recomienda el uso de las aproximaciones a partir de las cuales se obtiene unos parámetros de modelo elástico del terreno, definido por el valor medio de E y de ν en la zona de interés, que resulta ser el volumen de terreno comprendido entre dos niveles los cuales se indican a continuación:

- Por encima de las puntas, hasta una altura igual a un tercio de la longitud enterrada de los pilotes. Si los pilotes están empotrados en roca una altura menor, se considerará únicamente la zona de empotramiento en roca. Esta altura se denominará H_1 .
- Por debajo de las puntas, a una profundidad igual al ancho del grupo, B_g , salvo que a mayor profundidad existan suelos especialmente blandos, en cuyo caso se ampliará esta profundidad hasta dos veces el ancho del grupo.

El asiento de los grupos de pilotes es similar al de las cimentaciones superficiales equivalentes cuyo plano de apoyo se encuentra ubicado prácticamente en la zona de las puntas, con dimensiones en planta algo mayores que las del grupo, para



tener en cuenta el reparto lateral de compresiones transmitidas por el fuste. Con esta equivalencia pueden utilizarse los métodos de cálculo indicados para el caso de las cimentaciones superficiales (MFOM, 2005).

En consecuencia, el asiento del grupo de pilotes puede estimarse mediante la expresión siguiente

$$S_g = S_o + 0.8 \frac{P(1-\nu^2)}{E(B_g+H_1)(L_g+H_1)} \quad \text{Ec. 63}$$

Donde:

- S_o** – Asiento que tendría un pilote, considerado como pilote aislado y sometido a una carga axial igual a la media de las que corresponden a cada uno de los pilotes del grupo
- B_g** – Dimensión menor en planta (ancho)
- L_g** – Dimensión mayor en planta (largo)
- P** – Carga vertical que actúa sobre el grupo
- E_{equiv}** – Valor medio del módulo de elasticidad equivalente del suelo en la zona de interés
- ν** – Valor medio de la relación de Poisson equivalente del suelo en la zona de interés
- H₁** – Distancia igual a un tercio de la longitud enterrada de los pilotes

Esta expresión está indicada para grupos de pilotes con formas no muy alargadas, la relación longitud/anchura del grupo debe ser en todo caso menor o igual que cinco ($L_g / B_g \leq 5$). Para determinar el valor del módulo de elasticidad medio equivalente, se emplea la (Ecuación 64).

$$E_{equiv} = \frac{\sum \Delta\sigma_i h_i}{\sum \left(\frac{\Delta\sigma_i}{E_i}\right) h_i} \quad \text{Ec. 64}$$

Donde:

- E** – Módulo de elasticidad medio equivalente.
- E_i** – Módulo de elasticidad del estrato *i*.
- h_i** – Espesor del estrato *i*.
- Δσ_i** – Incremento de la presión vertical total, en el centro del estrato *i*, en la vertical del centro de la cimentación, creado por la carga aplicada sobre la misma.



Para estimar los valores de $\Delta\sigma_i$ a utilizar en la expresión anterior, se debe utilizar la solución de la teoría de la elasticidad correspondiente. En general y a efectos de realizar la ponderación que se menciona, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\Delta\sigma_i = p (1 - \cos^3\alpha) \quad \text{Ec. 65}$$

Donde:

p – presión media transmitida por la cimentación.

α – **arctan (a/z)**, expresado en radianes.

a – radio de la cimentación circular equivalente, $a = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

A – área de apoyo de la cimentación.

z – Profundidad del punto en cuestión, bajo el plano de apoyo del cimientto.

Para aquellos casos en los que la cimentación sea muy alargada (relaciones $L/B \geq 10$), se puede utilizar la (Ecuación 66).

$$\Delta\sigma = p \frac{2\varepsilon + \text{sen}(2\varepsilon)}{\pi} \quad \text{Ec. 66}$$

Donde:

E – **arctan (B/2z)**, expresado en radianes.

B – Ancho de la zona cargada.

Para estimar el módulo de Poisson equivalente se puede tomar el valor de la media ponderada, utilizando como pesos de ponderación los mismos valores $\Delta\sigma_i$ antes indicados. Entonces

$$\nu_{equiv} = \frac{\sum \nu_i h_i \Delta\sigma_i}{\sum h_i \Delta\sigma_i} \quad \text{Ec. 67}$$

Donde:

ν – Relación de Poisson del suelo

3.2.5 Diseño sísmico de pilotes

3.2.5.1 Método de desplazamientos (DDBD)

La herramienta *Diseño Sísmico de Pilotes: Método de Desplazamientos* sigue la metodología *DDBD (Método directo basado en desplazamientos)*, en la que se diseña a la estructura para que su capacidad de deformarse sea mayor o igual a la demandada por una acción sísmica, que puede expresarse en términos de desplazamiento objetivo o meta. Para tener en cuenta la interacción suelo estructura se emplea un modelo equivalente en el que, al sistema normal se lo reemplaza por una columna de longitud de empotramiento (L_e) cuya rigidez toma en cuenta, la rigidez que el suelo añade a la estructura, y un desplazamiento de fluencia. Este método considera también el amortiguamiento viscoso equivalente, que permite calcular la ductilidad de desplazamiento. Además la metodología *DDBD* modela al sistema pila-suelo con una longitud de empotramiento que se encuentra en el punto de máximo momento.

- Modelo equivalente

La herramienta permite reemplazar a los pilotes pre-barrenados, con cabeza empotrada, por un sistema equivalente de longitud L_e que esta empotrado en su base y soportado por rodillos en su cabeza, restringiendo su rotación (*Figura 3.7*). Además el punto de empotramiento coincide con el de máximo momento en el sistema suelo-pilote.

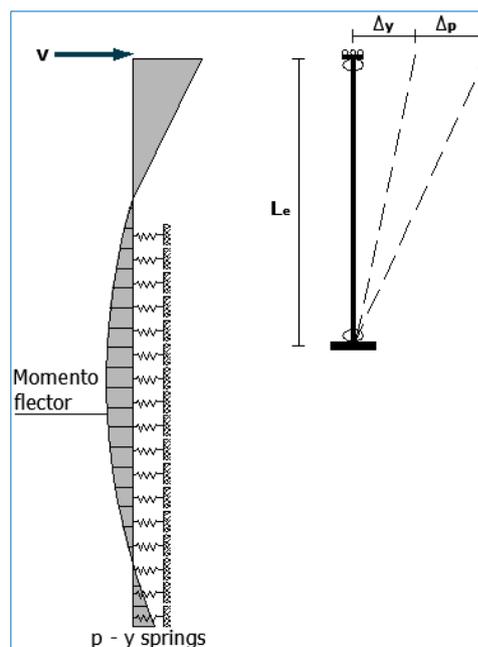


Figura 3.7 Modelo equivalente para un pilote con cabeza empotrada
Fuente: El Autor



Los parámetros necesarios para desarrollar este proceso se determinan utilizando las siguientes consideraciones:

La curvatura de fluencia resulta de la ecuación (Priestley, 1996).

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_y}{D} \quad \text{Ec. 68}$$

Donde:

- ϵ_y – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002
- D – Diámetro del pilote.

Donde ϵ_y es la deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002, y D es diámetro del pilote. El desplazamiento de fluencia del sistema equivalente es calculado con la siguiente ecuación:

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_e^2}{6} \quad \text{Ec. 69}$$

Donde:

- ϕ_y – Curvatura de fluencia
- L_e – Longitud efectiva.
- α – Coeficiente de amplificación de desplazamiento

α es un coeficiente que amplifica el desplazamiento de fluencia de la columna equivalente y considera además la rotación elástica que existe bajo el punto de máximo momento y la mayor área del diagrama de curvatura en el sistema no lineal suelo-pilote. Valores aproximados de α y de L_e se estiman de acuerdo a la (Cuadro 3.7).

Tipo de suelo	Coeficiente de amplificación	Longitud efectiva L_e
Arcilla $S_u = 20$ KPa	$\alpha = 2.84 - 0.38 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 6.38D + 0.69La$
Arcilla $S_u = 40$ KPa	$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 4.96D + 0.71La$
Arena $\Phi = 30^\circ$	$\alpha = 1.88 - 0.16 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 4.39D + 0.82La$
Arena $\Phi = 37^\circ$	$\alpha = 1.86 - 0.18 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 3.40D + 0.84La$

Cuadro 3.7 Valores de α y L_e para pilas en arenas y arcillas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005



Desplazamientos más allá de este punto resultan de una combinación del desplazamiento elástico y plástico proveniente de la rótula plástica en la cabeza del pilote.

El desplazamiento plástico después de que la rótula de la cabeza se formó puede ser estimado como el producto de la rotación plástica en la rótula y una fracción de la longitud equivalente L_e .

$$\Delta_p = \phi_p L_p \beta L_e \quad \text{Ec. 70}$$

Donde:

- ϕ_p – Rotación plástica
- L_p – Longitud de la rótula plástica.
- L_e – Longitud efectiva.
- β – El método sugiere $\beta = 1.68$ para pilotes en arena y $\beta = 1.54$ en arcilla.

La longitud de la rótula plástica L_p en la cabeza del pilote puede ser calculada con la siguiente ecuación (Priestley, 1996).

$$L_p = 0.008 L_i + 0.022 f_y d_{bl} \quad \text{Ec. 71}$$

Donde:

- L_i – Distancia desde la rótula plástica al punto de inflexión
- f_y – Resistencia del acero en MPa
- d_{bl} – Diámetro de varilla longitudinal en metros

Valores aproximados de L_i se presentan en la (Cuadro 3.8).

L_i	$0.59 L_e$	Arcillas
L_i	$0.52 L_e$	Arenas

Cuadro 3.8 Valores de L_i

Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

- Ductilidad de desplazamiento

La aplicación de *DDBD* requiere el cálculo de la ductilidad de desplazamiento, entonces, dado el desempeño en términos de una curvatura límite para la sección, μ_Δ es obtenida a partir de la (Ecuación 72).



$$\mu_{\Delta} = 1 + \frac{(\phi_{CD} - \phi_y) \beta L_p L_e}{\Delta_y} \quad \text{Ec. 72}$$

Donde:

- ϕ_{CD} – Curvatura de control de daño
- ϕ_y – Curvatura de fluencia
- L_p – Longitud de la rótula plástica.
- L_e – Longitud efectiva.
- β – El método sugiere $\beta = 1.68$ para pilotes en arena y $\beta = 1.54$ en arcilla

La curvatura de control de daño ϕ_{CD} resulta de la relación entre la deformación unitaria del estado límite especificado en el objetivo de diseño, y la distancia al eje neutro c de la sección del pilote.

$$\phi_{CD} = \frac{\epsilon_c}{c} \quad \text{Ec. 73}$$

Donde:

- ϵ_c – Deformación del concreto para nivel servicio requerido. (Cuadro 3.10)
- c – Distancia al eje neutro de la sección del pilote. Se determina mediante (Ecuación 74)

$$c = 0.2D \left(1 + 3.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right) \quad \text{Ec. 74}$$

Donde:

- P – Carga axial que soporta el elemento
- D – Diámetro del pilote
- A_g – Área gruesa de la sección

- Amortiguamiento viscoso equivalente

Durante los sismos, los pilotes pre-barrenadas disipan energía a través de la deformación inelástica en el suelo y del desarrollo de rótulas plásticas en los pilotes. *DDBD* usa el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente para modelar la energía disipada en la estructura.

El amortiguamiento viscoso ξ_v puede ser combinado con el amortiguamiento histórico $\xi_{eq,h}$ para conseguir un valor de diseño de amortiguamiento viscoso equivalente ξ_{eq} (Priestley and Grant 2005). (Ecuación 75).



$$\xi_{eq} = \xi_v \mu_{\Delta}^{-0.378} + \xi_h \quad \mu \geq 1 \quad \text{Ec. 75}$$

Donde:

- ξ_v – Amortiguamiento viscoso
- μ_{Δ} – Ductilidad de desplazamiento
- $\xi_{eq,h}$ – Amortiguamiento histerético

El amortiguamiento histerético $\xi_{eq,h}$ se determina como una función de la ductilidad en el pilote pre barrenado.

$$\xi_{eq,h} = p + q \frac{\mu_{\Delta} - 1}{\mu_{\Delta}} \quad \mu \geq 1 \quad \text{Ec. 76}$$

Donde:

- p y q – Parámetros para modelos de amortiguamiento histerético

Los valores de p y q pueden ser tomados de la (Cuadro 3.9).

Suelo	p	q
Arcilla-20	6.7	8.1
Arcilla-40	5.6	8.7
Arena-30	2.4	10.2
Arena-37	2	9.6

Cuadro 3.9 Parámetros para modelos de amortiguamiento histerético en sistemas de pilotes prebarrenados de cabeza empotrada
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

- **Estados límite de diseño**

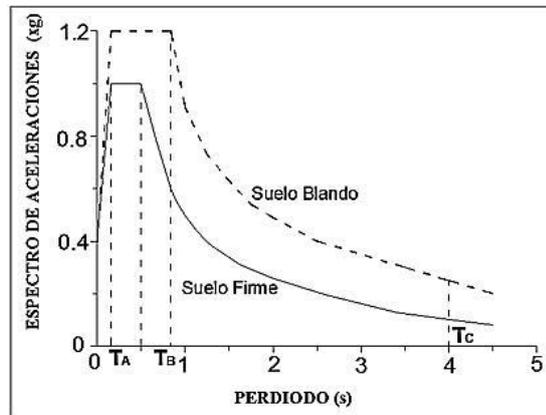
Según Kowalsky (2000), estos límites son dos: Serviciabilidad y de Control de Daño. El estado límite de Serviciabilidad indica que no se requiere de reparación alguna después de la acción del sismo, mientras que el de Control de Daño requiere de reparación después del sismo, siendo esta reparación económica, estos estados límites se basan en los límites de deformación del concreto y del acero (Cuadro 3.10).

Estado límite de diseño	ϵ_c (Concreto)	ϵ_s (Acero)
Serviciabilidad (SC)	0.004	0.015
Control de daño (CD)	0.018	0.06

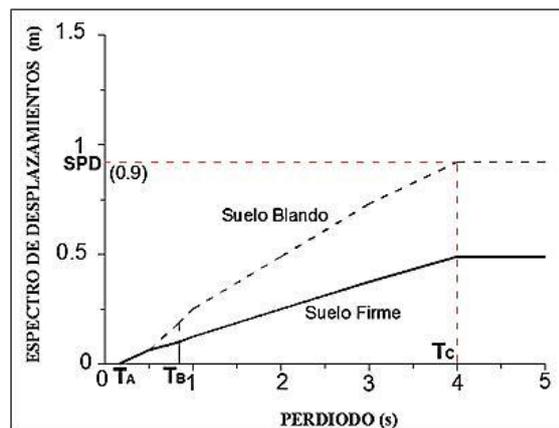
Cuadro 3.10 Estado límite de serviciabilidad
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

- **Demanda sísmica**

La Demanda sísmica es dada por un espectro de diseño caracterizado como categoría *SDC_D*.



(a) Espectro de aceleraciones



(b) Espectro de desplazamientos

Gráfica 3.2 Espectro de aceleraciones y Espectro de desplazamientos
Fuente: El Autor

Los parámetros necesarios para el funcionamiento de la herramienta son el periodo de esquina (T_c), la pseudo-aceleración espectral (S_a), y el máximo desplazamiento espectral (PSD).

- **Proceso de diseño**

A partir del desplazamiento de fluencia y de la ductilidad de desplazamiento se obtiene la demanda de desplazamiento o desplazamiento de diseño por medio de la (Ecuación 77).

$$\Delta_D = \Delta_y \mu_\Delta$$

Ec. 77



Considerando estos parámetros se procede a determinar el factor de reducción espectral (R_{ξ}) mediante la (Ecuación 78).

$$R_{\xi} = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi_{eq}}} \quad \text{Ec. 78}$$

Donde:

ξ_{eq} – Amortiguamiento viscoso equivalente

A continuación se determina el periodo efectivo (T_{eff}) en segundos. (Ecuación 79)

$$T_{eff} = \frac{T_c \Delta_D}{(PSD)(R_{\xi})} \quad \text{Ec. 79}$$

Donde:

T_c – Periodo de esquina

Δ_D – Desplazamiento de diseño

R_{ξ} – Factor de reducción espectral

PSD – Máximo desplazamiento espectral

Seguidamente se procede a determinar la rigidez secante

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 m_{eff}}{T_{eff}^2} \quad \text{Ec. 80}$$

Donde:

T_{eff} – Periodo efectivo

m_{eff} – Masa efectiva

La masa efectiva se determina utilizando la siguiente expresión

$$m_{eff} = \frac{P}{g} \quad \text{Ec. 81}$$

Donde:

P – Carga axial aplicada al elemento

g – Aceleración de la gravedad



Una vez que se ha obtenido la rigidez del sistema equivalente y el desplazamiento de diseño, se procede a determinar el cortante total (V_T) mediante la (Ecuación 82).

$$V_T = K_{eff} \Delta_D \quad \text{Ec. 82}$$

Donde:

- K_{eff} – Rigidez equivalente
 Δ_D – Desplazamiento de diseño

A continuación se determina el momento de diseño (M), considerando el cortante total y la distancia al punto de inflexión. (Ecuación 83).

$$M_T = V_T L_i \quad \text{Ec. 83}$$

Donde:

- V_T – Cortante total
 L_i – Distancia desde la rótula plástica al punto de inflexión

Se verifica que el momento $P - \Delta$ generado en el nivel de desplazamiento máximo, equivale o es menor a un 22% de la capacidad de momento requerida para la sección.

$$P - \Delta = \frac{P \times \Delta_D}{M} * 100 \quad \text{Ec. 84}$$

Donde:

- P – Carga axial aplicada al elemento
 M – Momento de diseño

En caso de que la verificación no sea satisfactoria se debe ingresar un nuevo valor de ductilidad de desplazamiento y realizar un nuevo diseño.

Finalmente, en el diseño directo basado en desplazamientos el refuerzo a flexión es diseñado, usando un análisis momento curvatura, que proporciona la resistencia requerida para un nivel de curvatura, compatible con la demanda de ductilidad del elemento. Se determina el refuerzo longitudinal y transversal para



el pilote, el cual está dentro de la cuantía (1- 4) % que recomiendan los códigos de diseño sísmico *AASHTO 2004*.

Para el proceso descrito anteriormente la herramienta se enlaza a una aplicación, existente en el *LVIG*, la cual realiza un modelo del comportamiento no lineal del concreto confinado y no confinado, y de las barras de reforzamiento, para obtener la respuesta Momento - Curvatura ($M - C$). A partir de la gráfica $M - C$ se puede identificar la respuesta de diferentes estados límites. La respuesta $M - C$ y de la resistencia al corte se acoplan para mostrar si el momento o el corte controlará la falla de la sección.

3.2.5.2 Método LRFD (Load and Resistance Factor Design)

La herramienta “Diseño Sísmico de Pilotes: Método de Fuerzas” sigue la metodología del *LRFD*, el cual es un método de análisis sísmico basado en fuerzas, en el que se diseña a la estructura para resistir una cierta fuerza sísmica, disminuida según un factor de reducción R , el mismo que depende de la importancia de la obra.

Para tener en cuenta la interacción suelo estructura se emplea un modelo equivalente en el que al sistema normal se lo reemplaza por una columna de longitud de empotramiento L_f (*Figura 3.10b*) cuya rigidez toma en cuenta la rigidez que el suelo añade a la estructura y un desplazamiento de fluencia.

- **Modelo equivalente**

La herramienta permite reemplazar a los pilotes pre-barrenados, con cabeza empotrada, por un sistema equivalente, de longitud L_f que esta empotrado en su base y soportado por rodillos en su cabeza, restringiendo su rotación. Además el punto de empotramiento coincide con el de máximo momento en el sistema suelo-pilote.

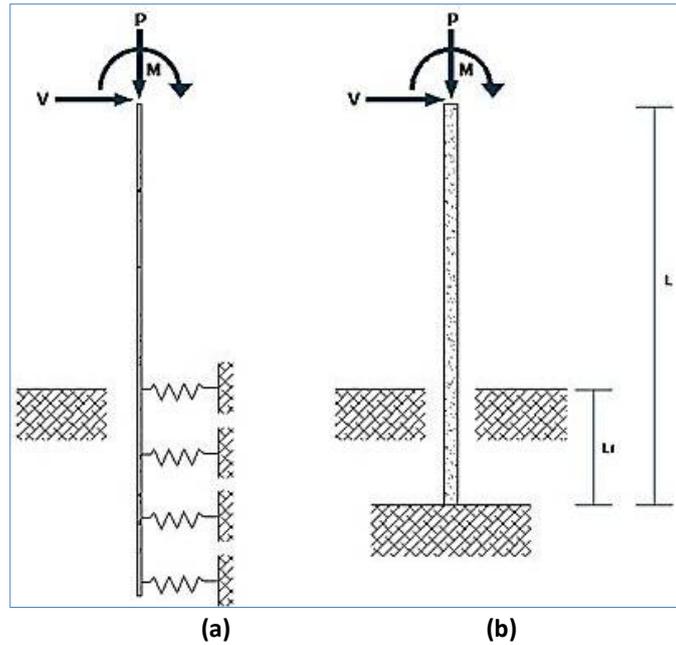


Figura 3.8 (a) Sistema suelo – pilote y (b) Modelo cantiléver equivalente
Fuente: El Autor

Los parámetros necesarios para desarrollar este proceso se determinan utilizando las siguientes consideraciones:

La curvatura de fluencia resulta de la (Ecuación 67), es decir

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_y}{D}$$

Donde:

ϵ_y – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002

D – Diámetro del pilote.

El desplazamiento de fluencia del sistema equivalente se puede obtener mediante la (Ecuación 68), es decir:

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_f^2}{6}$$

Donde:

ϕ_y – curvatura de fluencia

L_f – Longitud de empotramiento.

α – Coeficiente de amplificación de desplazamiento,



El coeficiente α es el mismo que interviene en la metodología *DDBD*, para el cálculo del desplazamiento de fluencia. Valores aproximados de α se estiman de acuerdo al (Cuadro 3.11).

Tipo de suelo	Coefficiente de amplificación
Arcilla $S_u = 20$ KPa	$\alpha = 2.84 - 0.38 \ln \frac{La}{D}$
Arcilla $S_u = 40$ KPa	$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln \frac{La}{D}$
Arena $\Phi = 30^\circ$	$\alpha = 1.88 - 0.16 \ln \frac{La}{D}$
Arena $\Phi = 37^\circ$	$\alpha = 1.86 - 0.18 \ln \frac{La}{D}$

Cuadro 3.11 Valores de α para pilotes en arenas y arcillas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

La longitud de empotramiento L_f se determina de acuerdo al tipo de suelo sobre el cual se va a cimentar, *Kowalsky* sugiere las siguientes expresiones para determinar esta longitud:

Para arcillas

$$L_f = 1.4 \left[\frac{E_p I_{py}}{E_s} \right]^{0.25} \quad \text{Ec. 85}$$

Para arenas

$$L_f = 1.8 \left[\frac{E_p I_{py}}{n_h} \right]^{0.20} \quad \text{Ec. 86}$$

En dichas ecuaciones, E_p es el módulo de elasticidad del pilote y I_{py} es la inercia del pilote.

Para calcular la inercia gruesa del pilote circular se emplea la siguiente expresión

$$I_{py} = \frac{\pi D^4}{64} \quad \text{Ec. 87}$$

El módulo de elasticidad del pilote se determina de acuerdo a la (Ecuación 88).

$$E_p = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 88}$$

Donde:

f'_c – Resistencia a la compresión del hormigón en MPa

Y. Chen recomienda valores, tanto para E_s como para n_h , de acuerdo al tipo de suelo y las condiciones en las que este se encuentra. (Cuadro 3.12 - 3.13).

TIPO DE ARCILLA	S_u (KPa)	E_s (KPa)
Blanda	23.94	1603.989
Media blanda	45.007	3006.88
Dura	77.566	5209.372
Muy dura	140.768	9432.411

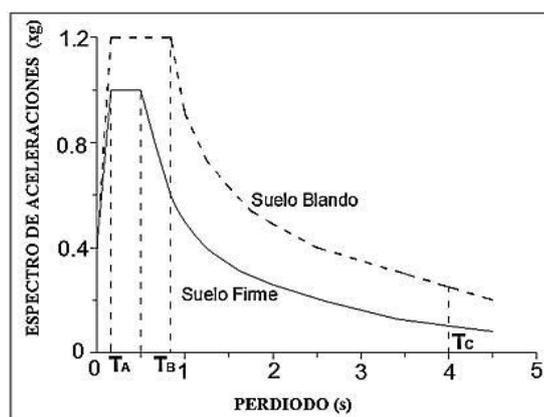
Cuadro 3.12 Valores representativos de E_s para arcillas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

TIPO DE ARENA	CONDICION DE SATURACION	n_h (KPa/m)
Suelta	Húmedo/seco	9425.295
	Sumergida	4712.655
Media suelta	Húmedo/seco	25134.16
	Sumergida	12567.08
Densa	Húmedo/seco	62835.4
	Sumergida	31417.7

Cuadro 3.13 Valores representativos de n_h para arenas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

- **Demanda sísmica**

La Demanda sísmica es dada por un espectro de diseño caracterizado como categoría SDC D.



Gráfica 3.3 Espectro de aceleraciones
Fuente: El Autor

Los parámetros necesarios para el funcionamiento de la herramienta son la pseudo-aceleración espectral (S_a), y el factor de reducción que varía de acuerdo a



la importancia de la obra, la AASHTO recomienda para pilotes, valores de factor de reducción entre 2 y 4.

- **Proceso de diseño**

Una vez determinada la inercia del pilote, el módulo de elasticidad del pilote, y la longitud de empotramiento L_f se procede a determinar la rigidez del sistema K , (Ecuación 89).

$$K = \frac{3E_p I_{py}}{L_f^3} \quad \text{Ec. 89}$$

Donde:

- E_{py} – Módulo de elasticidad del pilote
- I_{py} – Inercia gruesa de la sección
- L_f – Longitud de empotramiento.

Seguidamente se determina el periodo de vibración T , (Ecuación 90).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{g * K}} \quad \text{Ec. 90}$$

Donde:

- P – Carga axial aplicada al pilote
- g – Aceleración de la gravedad
- K – Rigidez del sistema.

A continuación se obtiene el desplazamiento de fluencia utilizando la expresión siguiente:

$$\Delta_D = \frac{s_a g T^2}{4 \pi^2} \quad \text{Ec. 91}$$

Donde:

- S_a – Pseudo-aceleración espectral
- g – Aceleración de la gravedad
- T – Periodo de vibración.

Una vez que se ha determinado la rigidez del sistema equivalente y el periodo de vibración, se procede a determinar el cortante basal V , (Ecuación 92).



$$V = \frac{S_a * P}{R} \quad \text{Ec. 92}$$

Donde:

- R** – Factor de reducción
P – Carga axial aplicada al elemento

Con el cortante y la longitud de empotramiento se calcula el momento de diseño M , (Ecuación 93).

$$M = V L_f \quad \text{Ec. 93}$$

Donde:

- L_f** – Longitud de empotramiento.

Luego se verifica que el momento $P - \Delta$ generado en el nivel de desplazamiento máximo, equivale o es menor a un 22% de la capacidad de momento requerida para la sección. (Ecuación 94).

$$P - \Delta = \frac{V \times R}{K} \times P \times 100 \quad \text{Ec. 94}$$

Donde:

- V** – Cortante basal.
R – Factor de reducción de acuerdo a la importancia de la obra.
K – Rigidez del sistema.
M – Momento de diseño.

En caso de que la verificación no sea satisfactoria se debe ingresar nuevos parámetros de diseño, hasta que los resultados se verifiquen correctamente.

Finalmente, en el diseño por el método de fuerzas, el refuerzo a flexión es diseñado, usando un análisis momento curvatura, que proporciona la resistencia requerida para un nivel de curvatura, compatible con la demanda de ductilidad del elemento. Se determina el refuerzo longitudinal y transversal para el pilote, el cual está dentro de la cuantía (1- 4) % que recomiendan los códigos de diseño sísmico AASHTO 2004.



Para el proceso descrito anteriormente la herramienta se enlaza a una aplicación existente en el *LVIG*, la cual realiza un modelo del comportamiento no lineal del concreto confinado y no confinado, y de las barras de reforzamiento, para obtener la respuesta *Momento - Curvatura (M - C)*. A partir de la gráfica *M - C* se puede identificar la respuesta de diferentes estados límites. La respuesta *M - C* y de la resistencia al corte se acoplan para mostrar si el momento o el corte controlará la falla de la sección.

3.3 COMPONENTE INFORMÁTICA

El desarrollo de aplicaciones usando protocolos de internet, se ha convertido en forma más popular a nivel mundial de incrementar la productividad académica, científica y tecnológica. Por esta razón la herramienta *Diseño de pilotes* ha sido desarrollada mediante la plataforma de *Visual Basic.Net 2005*, debido a que es la mejor alternativa para el desarrollo de una aplicación *web asp, aspx y javascript*.

El Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica consta de varias aplicaciones que permite realizar análisis y diseño de diferentes estructuras de cimentación, para la realización de este laboratorio virtual se utilizó los lenguajes de programación *Visual Basic.Net 2005*, *AJAX Extensión 1.0* y *JavaScript*, de servidor Web se escogió el *Internet Information Server 6.0 (IIS)*. Todas estas aplicaciones funcionan únicamente en plataforma Windows.

La presente herramienta ha sido desarrollada utilizando el lenguaje de programación de *Visual Basic.Net 2005*. Con este lenguaje se implementó todos los componentes de la aplicación y sus respectivas capas (capa de presentación, lógica de negocios y capa de acceso a datos). Este lenguaje de programación viene integrado con el programa *Visual Studio 2005*, y el *framework 2.0*. *JavaScript* se implementó para ejecutar en el cliente y presentar mensajes de los eventos producidos por las excepciones que se producen al realizar cálculos con parámetros inadecuados. *AJAX* se utilizó para hacer a la aplicación lo más eficiente en los diferentes eventos que son enviados hacia el servidor y disminuir los tiempos de procesamiento.



El servidor utilizado es *Internet Information Server (IIS)*, desarrollado por *Microsoft*, este servidor permite consumir servicios de *Http, Https, FTP, SMTP* y ejecutar contenido *asp, aspx, javascript*.

Para desarrollar las aplicaciones se utilizaron diferentes controles incorporados en el programa *Visual Basic.Net 2005*, tales como:

Tables, se utilizan para organizar los controles que se emplean durante la creación de la interface de la aplicación.

Textbox, que sirven para ingresar datos, presentar resultados, o mensajes de información.

Labels, se utilizan para presentar etiquetas de texto, y también para presentar mensajes de información.

Images, permiten presentar gráficos en la interface de la aplicación, con el fin de dar a conocer esquemas y tablas con valores recomendados para el ingreso de datos.

Buttons, estos controles son empleados para ejecutar cualquier tipo de evento, es decir se pueden utilizar para cargar un ejemplo, ejecutar un proceso de cálculo, etc.

Checkbox, sirven para activar o desactivar opciones que se desee considerar para cualquier proceso.

DropDownList, este control se utiliza para escoger el evento se requiera emplear para el proceso de cálculo.

LinkButtons, permiten crear un enlace entre distintas aplicaciones.

Panels, se emplean como una tabla, con el fin de aplicar un evento, que permita habilitar o deshabilitar visualmente los controles que el programador requiera para el desarrollo de la aplicación.

Además se utilizaron controles de *AJAX* con el fin de crear un interface visual agradable al usuario. Se usaron controles como: el *PopupControlExtender*, que se



utiliza para hacer visible o no una imagen; el *FilteredTextBoxExtender* se utiliza para ampliar automáticamente el ancho de un *TextBox* según el contenido que se ingrese o que se presente. También se emplearon *UpdatePanels* para actualizar únicamente los *Panels* que se requiera, esto con el fin de no actualizar la aplicación completa.



CAPÍTULO IV

EJEMPLOS DE VERIFICACIÓN

4.1 CAPACIDAD DE CARGA DE HUNDIMIENTO DE PILOTES

Ejemplo 1. Determinar la capacidad de carga de hundimiento de un pilote de hormigón sometido a una carga axial $P = 3600 \text{ KN}$, y cuyo diámetro es $D = 1.25 \text{ m}$. Para determinar la capacidad admisible se considera un factor de seguridad $FS = 3$. Los datos geométricos y geotécnicos del suelo se presentan en el esquema de la (Figura 4.1).

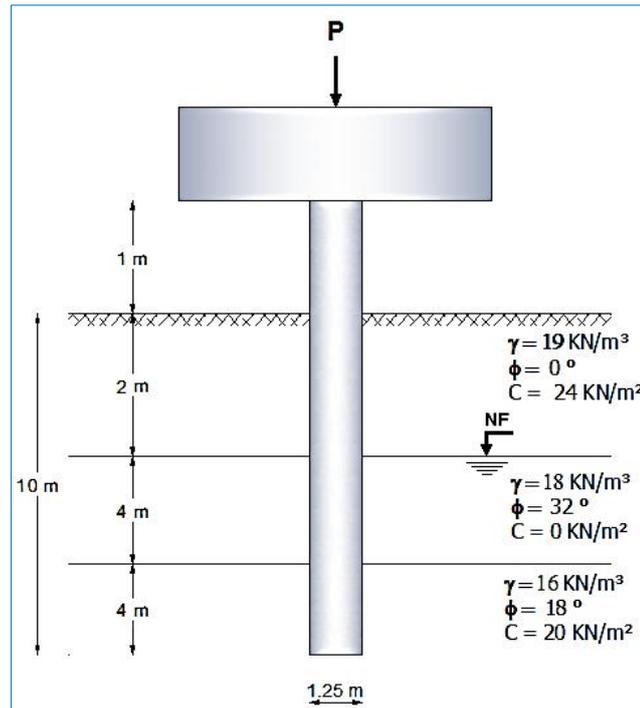


Figura 4.1 Esquema estratigráfico del suelo de cimentación (Ejemplo 1 de hundimiento)
Fuente: El Autor

Capacidad de carga por punta.

Para determinar la resistencia por punta se utilizará el método de Vesic.

ESTRATO DE APOYO

$\Delta L =$	4 m
$\gamma =$	16 KN/m ³
$\phi =$	18 °
$C =$	20 KN/m ²

La capacidad de carga por punta se obtiene mediante la (Ecuación 5).

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c N_c^* + \sigma'_o N_\sigma^*)$$

El área del pilote será

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} = 1.23 \text{ m}^2$$



El esfuerzo normal medio se obtiene mediante la (Ecuación 7).

$$\sigma'_o = \frac{1 + 2K_o}{3} \sigma'_v$$

El esfuerzo vertical efectivo σ'_v , se determina de la siguiente manera:

$$\sigma'_v = \sum(\gamma \Delta L) = (19 \times 2) + (18 - 9.81)(4) + (16 - 9.81)(4)$$

$$\sigma'_v = 95.52 \frac{KN}{m^2}$$

El coeficiente de presión de Rankine se calcula a través de la (Ecuación 6).

$$K_o = 1 - \text{sen } \phi = 1 - \text{sen}(18^\circ) = 0.69$$

Por lo tanto el esfuerzo normal medio es

$$\sigma'_o = \frac{1 + 2(0.69)}{3} (95.52)$$

$$\sigma'_o = 75.84 \frac{KN}{m^2}$$

Para determinar los factores de capacidad de carga se emplean las (Ecuaciones 10 y 11).

$$N_\sigma^* = \frac{3}{3 - \text{Sen}\phi} e^{\frac{(90-\phi)\pi}{180}} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) I_{rr}^{\frac{4 \text{ Sen}\phi}{3(1+\text{sen}\phi)}}$$

$$N_\sigma^* = \frac{3}{3 - \text{Sen}(18)} e^{\frac{(90-18)\pi}{180}} \tan^2 \left(45 + \frac{18}{2} \right) (80)^{\frac{4 \text{ Sen}(18)}{3(1+\text{sen}(18))}}$$

$$N_\sigma^* = 29.47$$

$$N_c^* = \frac{4}{3} (\ln(I_{rr}) + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

Del (Cuadro 3.1) se estima un valor de índice de rigidez $I_{rr} = 80$, entonces

$$N_c^* = \frac{4}{3} (\ln(80) + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

$$N_c^* = 9.75$$

Finalmente se calcula la capacidad de carga por punta

$$Q_p = 1.23((20)(9.75) + (75.84)(5.25))$$

$$Q_p = 2988.91 \text{ KN}$$



Capacidad de carga por fricción

Para determinar la carga por fricción se va a emplear la metodología de *Meyerhof* para suelos granulares y el *método α* para suelos cohesivos.

Se procede a determinar la resistencia por fuste de cada estrato de suelo. El primer estrato es un suelo cohesivo, ya que posee cohesión y carece de ángulo de fricción, por lo tanto para determinar la resistencia por fuste se emplea el *método α* .

ESTRATO 1

$\Delta L =$	2 m
$\gamma =$	19 KN/m ³
$\phi =$	0 °
C =	24 KN/m ²

El perímetro de la sección transversal del pilote es

$$p = \pi D = \pi(1.25m)$$

$$p = 3.93 m$$

El valor de α se obtiene aplicando la siguiente expresión

$$\alpha = 0.000003c_u^2 - 0.0028c_u + 1.091$$

$$\alpha = 1.03$$

Entonces se procede a determinar la resistencia por fricción para el primer estrato utilizando la (*Ecuación 35*).

$$Q_{s1} = \alpha c_u p \Delta L = (1.03)(24)(3.93)(2)$$

$$Q_{s1} = 193.92 KN$$

El segundo estrato no posee cohesión pero si tiene ángulo de fricción, por lo tanto es un suelo granular, por lo que se aplicará el método de *Meyerhof* para determinar su resistencia por fuste.

ESTRATO 2

$\Delta L =$	4 m
$\gamma =$	18 KN/m ³
$\phi =$	32 °
C =	0 KN/m ²



Se procede a determinar la longitud crítica de acuerdo a la (Ecuación 20).

$$L' = 15 D = (15)(1.25) m$$

$$L' = 18.75 m$$

$z = 10 m < 18.75 m$, por lo tanto proseguimos con el cálculo

Se estima el coeficiente de presión efectivo mediante el (Cuadro 3.2).

$$K_o = 1.4(1 - \text{sen}\phi)$$

$$K_o = 1.4(1 - \text{sen}(32^\circ))$$

$$K_o = 0.66$$

A continuación se considera $2/3$ del ángulo de fricción para obtener el ángulo δ

$$\delta = \frac{2}{3} \phi = \frac{2}{3} (32^\circ)$$

$$\delta = 21.33^\circ$$

Con los resultados anteriores se calcula la resistencia por fricción unitaria mediante la (Ecuación 21).

$$f = K \sigma'_v \tan \delta$$

$$f = (0.66)(70.76)(\tan(21.33^\circ))$$

$$f = 18.24 \frac{KN}{m^2}$$

De acuerdo a la (Ecuación 19), la resistencia por fuste del segundo estrato es

$$Q_{s2} = (3.93)(4)(18.24)$$

$$Q_{s2} = 286.68 KN$$

El tercer estrato presenta características físicas combinadas, es decir que posee ángulo de fricción y también posee cohesión. Para determinar la resistencia por fuste se empleará el *método α* y el *método de Meyerhof*.



ESTRATO 3

$\Delta L =$	4 m
$\gamma =$	16 KN/m ³
$\varphi =$	18 °
$C =$	20 KN/m ²

Método α

Se estima el coeficiente α mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = 0.000003C_u^2 - 0.0028C_u + 1.091$$

$$\alpha = 1.04$$

De acuerdo a la (Ecuación 35) se determina la resistencia por fricción del estrato en consideración

$$Q_{s3} = (3.93)(4)(20)(1.04)$$

$$Q_{s3} = 326.98 \text{ KN}$$

Método de Meyerhof

Se obtiene el valor de la longitud crítica

$$L' = 15 D = (15)(1.25) \text{ m}$$

$$L' = 18.75 \text{ m}$$

$z = 10 \text{ m} < 18.75 \text{ m}$, Por lo tanto proseguimos con el cálculo

Se estima el coeficiente de presión efectivo mediante el (Cuadro 3.2).

$$K_o = (1.4)(1 - \text{sen}(18^\circ))$$

$$K_o = 0.97$$

Se procede a determinar el valor de δ

$$\delta = \frac{2}{3}\phi = \frac{2}{3}(18)$$

$$\delta = 12^\circ$$

A continuación se obtiene la resistencia por fricción unitaria

$$f = (0.97)(95.52)(\text{tan}(12^\circ))$$



$$f = 19.69 \frac{KN}{m^2}$$

Seguidamente se procede a determinar la resistencia por fuste del estrato, mediante la (Ecuación 19).

$$Q_{s3} = (3.93)(4)(19.69)$$

$$Q_{s3} = 309.59 \text{ KN}$$

Por lo tanto la resistencia por fuste para el *Estrato 3* es

$$Q_{s3} = 326.98 + 309.59$$

$$Q_{s3} = 636.57 \text{ KN}$$

Finalmente se obtiene la capacidad de carga por fricción total mediante la suma de los tres valores de resistencia por fuste obtenidos

$$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3}$$

$$Q_s = 193.92 + 286.68 + 636.57$$

$$Q_s = 1117.17 \text{ KN}$$

Capacidad de carga de hundimiento del pilote

La capacidad de carga de hundimiento del pilote se determina a partir de la (Ecuación 1), es decir

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

$$Q_u = 2988.91 + 1117.17$$

$$Q_u = 4106.08 \text{ KN}$$

Capacidad admisible

$$Q_{ad} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{4106.08}{3}$$

$$Q_{ad} = 1368.69 \text{ KN}$$

$$Q_{ad} \geq P$$

$$1368.69 \text{ KN} \not\geq 3600 \text{ KN} \quad \mathbf{NO}$$



Debido a que los requisitos por capacidad admisible nos son satisfactorios, se va a realizar el diseño considerando el efecto de grupo. Entonces el número de pilotes es

$$N_{\text{pilotes}} = \frac{P}{Q_{ad}} = \frac{3600}{1368.69} = 2.63 \approx 3 \text{ pilotes}$$

Capacidad de carga de hundimiento para el grupo de pilotes

Se considera un factor para determinar el espaciamiento entre pilotes de 3.5.

Entonces

$$d = 3.5D = (3.5)(1.25 \text{ m})$$

$$d = 4.38 \text{ m}$$

El número de pilotes a considerarse es de tres, distribuidos 2 pilotes por fila y 1 por columna.

$$n_1 = 2$$

$$n_2 = 1$$

Se procede a determinar el largo y ancho del grupo mediante las (Ecuaciones 45 y 46).

$$L_g = (n_1 - 1)d + 2\left(\frac{D}{2}\right) = (2 - 1)(4.38) + 2\left(\frac{1.25}{2}\right)$$

$$L_g = 5.63 \text{ m}$$

$$B_g = (n_2 - 1)d + 2\left(\frac{D}{2}\right) = (1 - 1)(4.38) + 2\left(\frac{1.25}{2}\right)$$

$$B_g = 1.25 \text{ m}$$

A continuación se obtiene la eficiencia del grupo mediante el uso de la (Ecuación 47).

$$\eta = \frac{(2)(2+1-2)(4.38)+(4)(1.25)}{(\pi)(1.25)(1)(2)}$$

$$\eta = 1.75$$



$\eta \geq 1$. Entonces la capacidad de carga de hundimiento para el grupo de pilotes será igual a la sumatoria de las capacidades de carga de hundimiento de cada pilote individual. En este caso será

$$\sum Q_u = (n_1 + n_2) Q_u = (2 + 1)(1368.69)$$

$$\sum Q_u = 4106.07 \text{ KN}$$

$$Q_{ad} \geq P$$

4106.07 KN \geq 3600 KN **OK** el diseño es satisfactorio.

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

	CALCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
Q_{s1}	193.92	193.77	KN
Q_{s2}	286.88	285.69	KN
Q_{s3}	636.57	635.25	KN
Q_p	2988.91	2982.49	KN

Cuadro 4.1 Resumen de resultados de capacidad de carga de hundimiento del pilote individual (Ejemplo 1)
Fuente: El Autor

Para la capacidad de carga para el grupo de pilotes se obtiene el siguiente resumen

	CALCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_g	5.63	5.62	m
B_g	1.25	1.25	m
η	1.75	1.80	
Q_g	4106.07	4097.19	KN

Cuadro 4.2 Resumen de resultados de capacidad de carga de hundimiento del grupo de pilotes (Ejemplo 1)
Fuente: El Autor

Ejemplo 2. Determinar la capacidad de carga de hundimiento de un pilote de hormigón sometido a una carga axial $P = 1000 \text{ KN}$, y cuyo diámetro es $D = 0.60 \text{ m}$. Para determinar la capacidad admisible se considera un factor de seguridad $FS = 1$. Los datos geométricos y geotécnicos del suelo se presentan en el esquema de la (Figura 4.2).

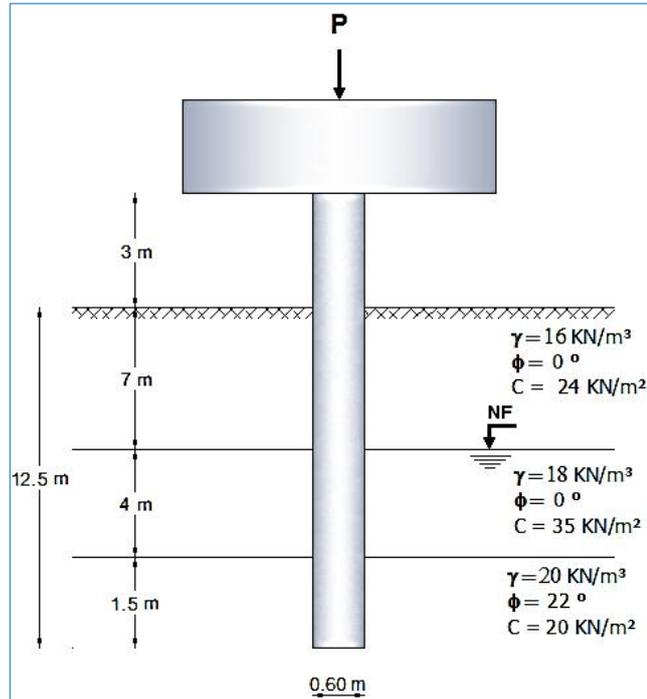


Figura 4.2 Esquema estratigráfico del suelo de cimentación (Ejemplo 2 de hundimiento).
Fuente: El Autor

Capacidad de carga por punta.

Para determinar la resistencia por punta se utilizará el método de *la normativa española*.

ESTRATO DE APOYO

$\Delta L =$	1.5 m
$\gamma =$	20 KN/m ³
$\phi =$	22 °
$C =$	20 KN/m ²

La capacidad de carga por punta según la *normativa española* se obtiene mediante la (*Ecuación 12*).

$$Q_p = A_p(N_q^* \sigma'_{vo} + N_c^* c)$$

El área del pilote será

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} = 0.283 \text{ m}^2$$

El esfuerzo vertical efectivo se determina de la siguiente manera:

$$\sigma'_{vo} = \sum(\gamma \Delta L) = (16 \times 7) + (18 - 9.81)(4) + (20 - 9.81)(1.5)$$



$$\sigma'_{vo} = 160.05 \frac{KN}{m^2}$$

Para determinar los factores de capacidad de carga se emplean las (Ecuaciones 13 y 14), entonces

$$N_q^* = 1.5 \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} e^{\pi \text{tg}\phi} f_D$$

El factor de corrección por tamaño del pilote f_D se determina mediante la (Ecuación 15)

$$f_D = 1 - \frac{1}{3}(0.6) = 0.80$$

$$N_q^* = 1.5 \frac{1 + \text{sen}(22^\circ)}{1 - \text{sen}(22^\circ)} e^{\pi \text{tg}(22^\circ)}(0.80)$$

$$N_q^* = 9.385$$

$$N_c^* = \frac{N_q^* - 1}{\text{tan}\phi}$$

$$N_c^* = \frac{9.385 - 1}{\text{tan}(22^\circ)}$$

$$N_c^* = 20.75$$

A continuación se procede a determinar la capacidad de carga por punta

$$Q_p = (0.283)((9.385)(160.05) + (20.75)(20))$$

$$Q_p = 542.53 \text{ KN}$$

Capacidad de carga por fricción

Para determinar la carga por fricción se va a emplear la metodología de *Meyerhof* para suelos granulares y el *método λ* para suelos cohesivos.

Se procede a determinar la resistencia por fuste de cada estrato de suelo. El primer estrato es un suelo cohesivo, ya que posee cohesión y carece de ángulo de fricción, por lo tanto para determinar la resistencia por fuste se emplea el *método λ* .



ESTRATO 1

$\Delta L =$	7 m
$\gamma =$	16 KN/m ³
$\varphi =$	0 °
$C =$	24 KN/m ²

El perímetro de la sección transversal del pilote es

$$p = \pi D = \pi(0.60m)$$

$$p = 1.89 m$$

Con la (Ecuación 26) se obtiene el valor de λ

$$\lambda = 0.0004(12.5)^2 - 0.0193(12.5) + 0.4097$$

$$\lambda = 0.231$$

La resistencia unitaria superficial promedio se determina mediante la (Ecuación 24).

$$f_{prom} = \lambda (\sigma'_v + 2 c_u)$$

Se determina la presión vertical efectiva

$$\sigma'_{v1} = 16 (7) = 112 \frac{KN}{m^2}$$

$$\overline{\sigma'_v} = \frac{A_1}{L} = \frac{112(7)}{12.5}$$

$$\overline{\sigma'_v} = 31.36 \frac{KN}{m^2}$$

A continuación se obtiene la cohesión media

$$\overline{c_u} = \frac{c_{u1}L_1}{L} = \frac{24(7)}{12.5}$$

$$\overline{c_u} = 13.44 \frac{KN}{m^2}$$

$$f_{prom} = 0.231(31.36 + 2(13.44))$$

$$f_{prom} = 13.45 \frac{KN}{m^2}$$



Obtenida la resistencia por fricción unitaria, se procede a determinar la resistencia total por fricción de acuerdo a la (Ecuación 33).

$$Q_s = p L f_{prom}$$

$$Q_{s1} = (1.89)(7)(32.08)$$

$$Q_{s1} = 177.99 \text{ KN}$$

El segundo estrato posee cohesión pero no ángulo de fricción, por lo tanto es un suelo cohesivo, por lo que se aplicará el método λ para determinar su resistencia por fuste.

ESTRATO 2

$\Delta L =$	4 m
$\gamma =$	18 KN/m ³
$\phi =$	0 °
$C =$	35 KN/m ²

El valor de λ es constante para toda la cimentación, debido a que se encuentra en función únicamente de la longitud de empotramiento total. Por lo tanto

$$\lambda = 0.231$$

La resistencia unitaria superficial promedio se determina mediante la (Ecuación 24)

$$f_{prom} = \lambda (\sigma'_v + 2 c_u)$$

Se determina la presión vertical efectiva

$$\sigma'_{v1} = (18 - 9.81)(4) + 112 = 144.76 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$\overline{\sigma'_v} = \frac{A_2}{L} = \frac{(112 + 144.76)(4)}{12.5}$$

$$\overline{\sigma'_v} = 41.08 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$\overline{c_u} = \frac{c_{u2}L_2}{L} = \frac{35(4)}{12.5}$$

$$\overline{c_u} = 11.20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$f_{prom} = 0.231(41.08 + 2(11.20))$$



$$f_{prom} = 14.66 \frac{KN}{m^2}$$

Obtenida la resistencia por fricción unitaria, se procede a determinar la resistencia total por fricción de acuerdo a la (Ecuación 33).

$$Q_s = p L f_{prom}$$

$$Q_{s2} = (1.89)(4)(14.66)$$

$$Q_{s2} = 110.86 \text{ KN}$$

El tercer estrato presenta características físicas combinadas, es decir que posee ángulo de fricción y también posee cohesión. Para determinar la resistencia por fuste se empleará el *método λ* y el *método de Meyerhof*.

ESTRATO 3

$\Delta L =$	1.5 m
$\gamma =$	20 KN/m ³
$\phi =$	22 °
$C =$	20 KN/m ²

Método λ

$$\lambda = 0.231$$

La resistencia unitaria superficial promedio se determina mediante la (Ecuación 24).

$$f_{prom} = \lambda (\sigma'_v + 2 c_u)$$

Se determina la presión vertical efectiva

$$\sigma'_{v1} = (18 - 9.81)(4) + 112 + (20 - 9.81)(1.5)$$

$$\sigma'_{v1} = 160.05 \frac{KN}{m^2}$$

$$\overline{\sigma'_v} = \frac{A_2}{L} = \frac{(160.05 + 144.76)(1.5)}{12.5}$$

$$\overline{\sigma'_v} = 18.29 \frac{KN}{m^2}$$

$$\overline{c_u} = \frac{c_{u2}L_2}{L} = \frac{20(1.5)}{12.5}$$

$$\overline{c_u} = 2.40 \frac{KN}{m^2}$$



$$f_{prom} = 0.231(18.29 + 2(2.40))$$

$$f_{prom} = 5.33 \frac{KN}{m^2}$$

Obtenida la resistencia por fricción unitaria, se procede a determinar la resistencia total por fricción de acuerdo a la (Ecuación 33).

$$Q_s = p L f_{prom}$$

$$Q_{s1} = (1.89)(1.5)(5.33)$$

$$Q_{s1} = 15.11 KN$$

Método de Meyerhof

Determinamos la longitud crítica

$$L' = 15 D = (15)(0.60) m$$

$$L' = 9 m$$

$$z = 12.5 m < 9 m \text{ **NO**}$$

Se determina la presión vertical efectiva para el nivel considerado

$$\sigma'_{v1} = 112 + (18 - 9.81)(4) + (20 - 9.81)(1.5)$$

$$\sigma'_{v1} = 160.05 \frac{KN}{m^2}$$

Se estima el coeficiente de presión efectivo mediante el (Cuadro 3.2).

$$K_o = 1.4(1 - \text{sen}(22^\circ))$$

$$K_o = 0.88$$

Se procede a determinar el valor de δ

$$\delta = \frac{2}{3}\phi = \frac{2}{3}(22)$$

$$\delta = 14.67^\circ$$

A continuación se obtiene la resistencia por fricción unitaria

$$f = (0.88)(160.05)(\text{tan}(14.67^\circ))$$

$$f = 36.87 \frac{KN}{m^2}$$

Seguidamente se procede a determinar la resistencia por fuste del estrato, mediante la (Ecuación 19).



$$Q_{s3} = (1.88)(1.5)(36.87)$$

$$Q_{s3} = 103.97 \text{ KN}$$

De acuerdo a los resultados calculados, por los dos métodos, se toma el mayor, la suma de los dos o si el diseñador lo requiere puede tomar la media entre los dos valores, en este caso se tomará como valor de capacidad de carga de fricción para el tercer estrato, la suma de los valores obtenidos por los dos métodos.

$$Q_{s3} = 103.97 + 15.11$$

$$Q_{s3} = 119.08 \text{ KN}$$

Finalmente se obtiene la capacidad de carga por fricción total mediante la suma de los tres valores de resistencia por fuste obtenidos

$$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3}$$

$$Q_s = 177.99 + 110.86 + 119.08$$

$$Q_s = 407.93 \text{ KN}$$

Capacidad de carga de hundimiento del pilote

La capacidad de carga de hundimiento del pilote se determina a partir de la (Ecuación 1), es decir

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

$$Q_u = 542.53 + 407.93$$

$$Q_u = 950.46 \text{ KN}$$

Capacidad admisible

Debido a que el factor de seguridad para el diseño es 1 la capacidad admisible es igual a la capacidad de carga de hundimiento del pilote.

$$Q_{ad} \geq P : 950.46 \text{ KN} \approx 1000 \text{ KN} \quad \mathbf{OK}$$

Por lo tanto no es necesario realizar la cimentación en grupo. Pero se podría rediseñar la cimentación aumentando el diámetro del pilote.

A continuación se presenta un resumen de resultados de hundimiento para el pilote individual. Los cuales han sido determinados mediante cálculo aritmético y mediante el uso de la herramienta *capacidad de carga de hundimiento*.

	CALCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
Q_{s1}	177.99	177.48	KN
Q_{s2}	110.86	110.54	KN
Q_{s3}	119.08	118.77	KN
Q_p	542.43	542.07	KN

Cuadro 4.3 Resumen de resultados de capacidad de carga de hundimiento del pilote individual (Ejemplo 2)
Fuente: El Autor

4.2 ASENTAMIENTO INDIVIDUAL DE PILOTES

Ejemplo 1. Determinar el asentamiento para un pilote de hormigón, cuya capacidad de carga por punta (Q_{wp}) es de 231 KN, capacidad de carga por fricción (Q_{ws}) es de 389.99 KN. Además se conoce que el diámetro del pilote es $D = 1.25m$. Los datos geométricos y geotécnicos del suelo se presentan en el esquema de la (Figura 4.3).

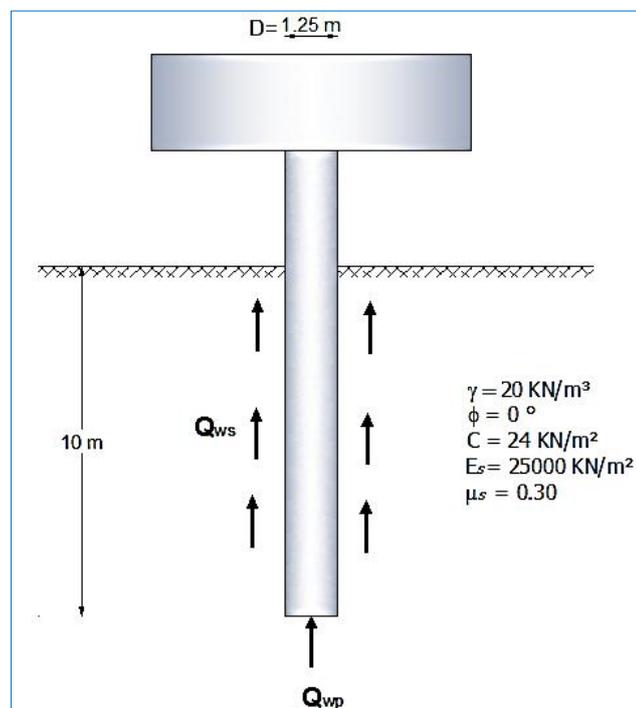


Figura 4.3 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el pilote aislado (Ejemplo 2 de asentamiento)
Fuente: El Autor



Para la determinación del asentamiento se empleará la metodología propuesta por Vesic.

Según Vesic el asentamiento total que se produce en un pilote se determina de acuerdo a la (Ecuación 55).

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

$$Q_{wp} = 231 \text{ KN}$$

$$Q_{ws} = 389.99 \text{ KN}$$

El área del pilote es

$$A_p = \frac{\pi D^4}{4} = 1.23 \text{ m}^2$$

Las características del suelo están dadas por el módulo de elasticidad E_s y por la relación de Poisson μ_s

$$\mu_s = 0.30$$

$$E_s = 25000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Las características del pilote están definidas por su longitud L y por el módulo de elasticidad del pilote de hormigón E_p

$$L = 10 \text{ m}$$

$$E_p = 21000000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

De la (Figura 3.5) obtenemos el valor de $\xi = 0.67$

Entonces el *asentamiento elástico del pilote* S_1 es determinado por la (Ecuación 56).

$$S_1 = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L}{A_p \cdot E_p}$$

$$S_1 = \frac{(231 + (0.67)(389.99)) (10)}{(1.23)(21000000)}$$

$$S_1 = 0.000191 \text{ m} = 0.191 \text{ mm}$$

Para determinar el *Asentamiento debido a la capacidad de carga por punta* S_2 se emplea la (Ecuación 57), para lo cual se emplea el factor de influencia

$$I_{wp} = 0.85$$



$$S_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

La resistencia de punta por área unitaria se determina de acuerdo a la relación entre la capacidad de carga por punta Q_{wp} y el área de la sección transversal del pilote A_p , entonces

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_p} = \frac{231}{1.23}$$

$$q_{wp} = 187.80 \frac{KN}{m^2}$$

Por lo tanto S_2 será

$$S_2 = \frac{(187.80)(1.25)}{(25000)} (1 - (0.30))(0.85) = 0.007263 m = 7.26 mm$$

El asentamiento debido a la carga por fuste se determina con la (Ecuación 58).

$$S_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

Donde p es el perímetro de la sección transversal del pilote, y I_{ws} es el factor de influencia según Vesic se obtiene mediante la (Ecuación 59).

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \sqrt{\frac{L}{D}}$$

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \sqrt{\frac{10}{1.25}}$$

$$I_{ws} = 2.99$$

$$p = \pi D = \pi(1.25)$$

$$p = 3.927 m$$

Por lo tanto S_3 será

$$S_3 = \left(\frac{389.99}{(3.927)(10)} \right) \left(\frac{1.25}{25000} \right) (1 - (0.3)^2)(2.99)$$

$$S_3 = 0.001351 m = 1.35 mm$$

Finalmente se calcula el asentamiento total S

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = (0.000191 + 0.007263 + 0.001351)$$

$$S = 0.008805 \text{ m} = 8.805 \text{ mm}$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta de diseño.

ASENTAMIENTO	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
S1	0.19	0.20	mm
S2	7.23	7.30	mm
S3	1.35	1.40	mm
S	8.81	8.90	mm

Cuadro 4.4 Resumen de resultados de asentamiento del pilote individual (Ejemplo 1)
Fuente: El Autor

Ejemplo 2. Determinar el asentamiento para un pilote de hormigón sometido a una carga axial de compresión $P = 2600 \text{ KN}$. Además se conoce que el diámetro del pilote es $D = 1 \text{ m}$ y que el pilote se encuentra sumergido en arena medianamente densa. Los datos geométricos y geotécnicos del suelo se presentan en el esquema de la (Figura 4.4).

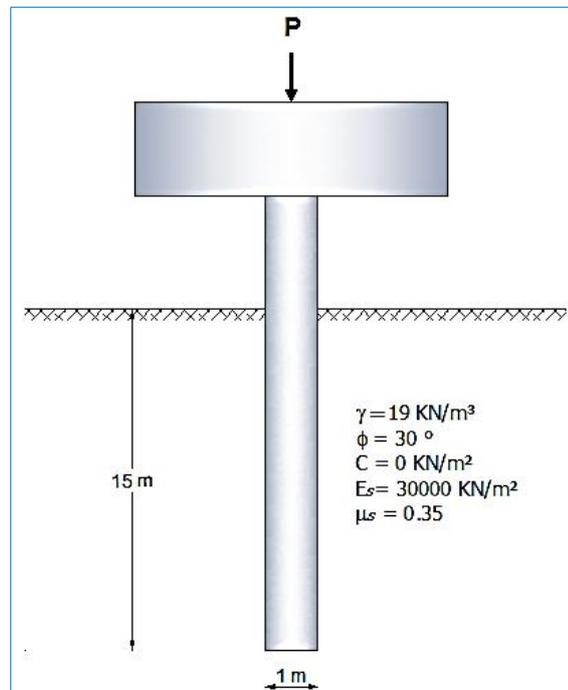


Figura 4.4 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación del pilote aislado (Ejemplo 2 de asentamiento)
Fuente: El Autor



Para determinar el asentamiento del pilote individual se emplea la metodología de *Bowles* debido a los datos que se posee (carga axial).

Los datos se organizan de la siguiente manera:

La carga axial aplicada al elemento es $P_{sv} = P = 2600 \text{ KN}$

El diámetro del pilote es $D = 1 \text{ m}$, y su longitud es $L = 15 \text{ m}$

El módulo de elasticidad del pilote es $E_p = 21000000 \text{ KN/m}^2$

El módulo de elasticidad del suelo es $E_s = 30000 \text{ KN/m}^2$

La relación de Poisson del suelo es $u_s = 0.35$

Según *Bowles* el asentamiento total de un pilote aislado sometido a una carga axial se calcula sumando el asentamiento debido a la carga axial con el asentamiento debido a la punta del pilote, esto se expresa mediante la (Ecuación 62)

$$\Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt}$$

Para determinar el asentamiento debido a la carga axial se utiliza la (Ecuación 60).

$$S_1 = \Delta H_a = \frac{P_{av} \Delta L}{A_p E_p}$$

ΔL es igual a la longitud del pilote L . Y el área del pilote es

$$A_p = 0.25 \pi D^2 = (0.25)(\pi)(1^2)$$

$$A_p = 0.785 \text{ m}^2$$

De acuerdo a lo considerado anteriormente se procede a determinar el *Asentamiento debido a la carga axial*

$$S_1 = \Delta H_a = \frac{(2600)(15)}{(0.785)(21000000)}$$

$$S_1 = \Delta H_a = 0.002366 \text{ m}$$

Para calcular el *Asentamiento debido a la carga por punta* se emplea la (Ecuación 61).



$$S_2 = \Delta H_{pt} = \Delta q D \frac{1 - \mu^2}{E_s} mI_s I_F F_1$$

El factor de diseño mI_s para pilotes según *Bowles* es igual a 1. De igual manera el factor de empotramiento $I_F = 0.5$. El suelo sobre el cual se asienta el pilote es granular, entonces el factor de reducción F_1 es igual a 0.5, ya que la resistencia por punta es predominante.

La presión de apoyo Δq sobre la punta se obtiene de la relación entre la carga axial aplicada y el área de la punta, es decir

$$\Delta q = \frac{P_{av}}{A_p} = \frac{2600}{0.785}$$

$$\Delta q = 3312.10 \text{ KN/m}^2$$

Con estos antecedentes se procede a determinar

$$S_2 = \Delta H_{pt} = (3312.10)(1) \left(\frac{1 - (0.35)^2}{30000} \right) (1)(0.5)(0.5)$$

$$S_2 = 0.024220 \text{ m}$$

Finalmente se determina el asentamiento total

$$S = \Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt} = S_1 + S_2$$

$$S = \Delta H_p = 0.002366 \text{ m} + 0.024220 \text{ m}$$

$$S = 0.026586 \text{ m}$$

$$S = 26.59 \text{ mm}$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

ASENTAMIENTO	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
S1	24.22	24.2	mm
S2	2.37	2.40	mm
S	26.59	26.57	mm

Cuadro 4.5 Resumen de resultados de asentamiento del pilote individual (Ejemplo 2)
Fuente: El Autor

4.3 ASENTAMIENTO DE UN GRUPO DE PILOTES

Ejemplo 1. Determinar el asentamiento para un grupo de pilotes de 2x3, cuya longitud es $L = 17m$, sometidos a una carga $P = 5866 KN$. El diámetro de cada pilote es $D = 1.5m$. Los datos geométricos y geotécnicos del suelo se presentan en el esquema de la (Figura 4.5). Se conoce además que el asentamiento de un pilote individual es de $82.9 mm$.

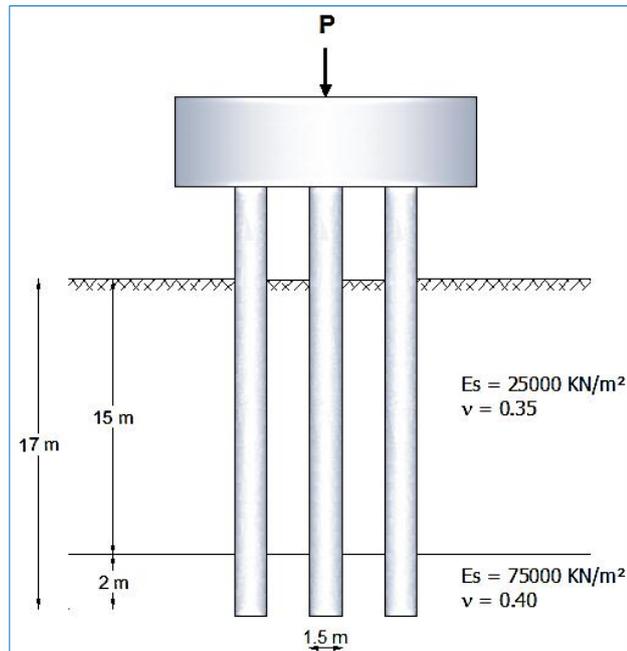


Figura 4.5 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el grupo de pilotes (Ejemplo 1 de asentamiento de grupo)
Fuente: El Autor

De acuerdo con el esquema mostrado en la (Figura 4.5) se tiene

Datos estructurales

Carga aplicada al grupo de pilotes (P)	= 5886	KN
Diámetro del pilote individual (D)	= 1.5	m
Longitud de los pilotes (L)	= 17	m
Número de pilotes por fila ($n1$)	= 2	
Número de pilotes por columna ($n2$)	= 3	
Factor de espaciamiento (d) (Se escogerá de 2.5 a 4 veces el diámetro)	= 2.5	
Asentamiento del pilote aislado (S_o)	= 82.9	mm



El suelo de cimentación está constituido por dos estratos, cuyas características geométricas y geotécnicas según la (Figura 4.5) son:

Estrato 1

Espesor (Z)	= 15	m
Módulo de Poisson (v)	= 0.35	
Módulo de elasticidad del terreno (E)	= 25000	KN/m ²

Estrato 2

Espesor (Z)	= 2	m
Módulo de Poisson (v)	= 0.40	
Módulo de elasticidad del terreno (E)	= 75000	KN/m ²

El espaciamiento entre pilotes *d* es

$$d = 2.5D = (2.5)(1.5)$$

$$d = 3.75m$$

En base a las consideraciones anteriores se procede a calcular el largo y ancho del grupo.

$$Bg = (n_2 - 1)d + D$$

$$Bg = (2 - 1)(3.75) + 1.5$$

$$Bg = 5.25m$$

$$Lg = (n_1 - 1)d + D$$

$$Lg = (3 - 1)(3.75) + 1.50$$

$$Lg = 9m$$

A continuación se determina el incremento de la presión vertical total, para lo cual se considera la relación $L_g/B_g \leq 10$:

$$\frac{L_g}{B_g} = \frac{9}{5.25}$$

$$\frac{L_g}{B_g} = 1.71 \leq 10 \quad \mathbf{SI}$$

Por lo tanto se aplica la (Ecuación 65).

$$\Delta\sigma_i = p(1 - \cos^3 \alpha)$$

Donde *p* es la presión media transmitida por la cimentación. Se calcula empleando la siguiente expresión



$$p = P / (LgBg)$$
$$p = \frac{5886}{(9)(5.25)} = 124.57 \frac{KN}{m^2}$$

El radio de la cimentación circular equivalente es

$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{(9)(5.25)}{3.1416}} = 3.89m$$

Para determinar el ángulo α se considera el espesor del estrato $Z = 15m$

$$\alpha = \arctg(a / Z)$$
$$\alpha = \arctg(3.89 / 15)$$
$$\alpha_1 = 0.2537 \text{radianes}$$

Por lo tanto se tiene

$$\Delta\sigma_1 = (124.57)(1 - \cos^3(0.2537))$$
$$\Delta\sigma_1 = 11.584KN / m^2$$

Para el Estrato 2, al igual que para el primer estrato se considera el espesor $Z = 2m$. Entonces

$$\alpha_2 = 1.096 \text{radianes}$$
$$\Delta\sigma_2 = 112.670KN / m^2$$

Según la (Ecuación 67) el módulo de Poisson equivalente es

$$V_{equiva} = \frac{\sum v_i z_i \Delta\sigma_i}{\sum z_i \Delta\sigma_i}$$
$$V_{equiva} = \frac{150.95}{399.10}$$
$$V_{equiva} = 0.38$$

A partir de la (Ecuación 64) se procede a determinar el Módulo de elasticidad medio equivalente del terreno



$$E_m = \frac{\sum \Delta \sigma_i z_i}{\sum \left(\frac{\Delta \sigma_i}{E_i} \right) z_i}$$

$$E_m = \frac{399.1}{0.0100}$$

$$E_m = 40090.68 \text{ KN} / \text{m}^2$$

Finalmente se calcula el asentamiento del grupo de pilotes mediante la (Ecuación 63), considerando la distancia a un tercio de la longitud enterrada de los pilotes H_1 , la cual es de 5.67 m

$$S_g = S_o + 0.8 \frac{Q_g (1 - V_{equiva}^2)}{E_m (B_g + H_1)(L_g + H_1)}$$

$$S_g = (82.9/1000) + (0.8) \frac{5886(1 - 0.38^2)}{40090.68(9 + 5.67)(5.25 + 5.67)}$$

$$S_g = 0.0835 \text{ m} \approx 83.52 \text{ mm}$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_g	9	9	m
B_g	5.25	5.25	m
d	3.75	3.75	m
v_m	0.38	0.36	
E_m	40090.68	26700.564	KN/m ²
S_g	83.52	83.86	mm

Cuadro 4.6 Resumen de resultados de asentamiento del grupo de pilotes (Ejemplo 1)
Fuente: El Autor

Ejemplo 2. Determinar el asentamiento para un grupo de pilotes de 3x2, cuya longitud es $L = 10\text{m}$, sometidos a una carga $P = 3600 \text{ KN}$. El diámetro de cada pilote es $D = 1.25\text{m}$. Los datos geométricos y geotécnicos del suelo se presentan en el esquema de la (Figura 4.6). Se conoce además que el asentamiento de un pilote individual es de 8.8 mm.

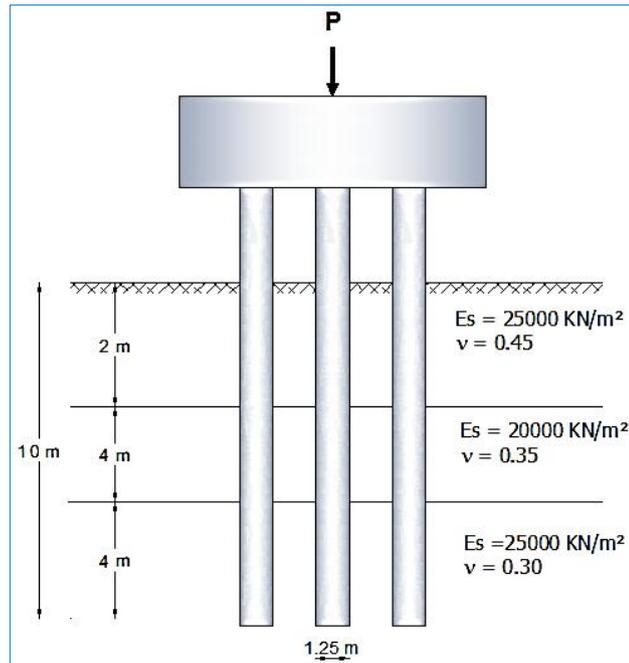


Figura 4.6 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el grupo de pilotes (Ejemplo 2 de asentamiento de grupo)
Fuente: El Autor

Datos estructurales

Carga aplicada al grupo de pilotes (P)	=	3600	KN
Diámetro del pilote individual (D)	=	1.25	m
Longitud de los pilotes (L)	=	10	m
Número de pilotes por fila ($n1$)	=	3	
Número de pilotes por columna ($n2$)	=	2	
Factor de espaciamiento (d) (Se escogerá de 2.5 a 4 veces el diámetro)	=	3	
Asentamiento del pilote aislado (S_o)	=	8.80	mm

El suelo de cimentación está constituido por tres estratos, cuyas características geométricas y geotécnicas según la (Figura 4.6) son:

Estrato 1

Espesor (Z)	=	2	m
Módulo de Poisson (v)	=	0.45	
Módulo de elasticidad del terreno (E)	=	25000	KN/m ²



Estrato 2

Espesor (Z)	=	4	m
Módulo de Poisson (ν)	=	0.35	
Módulo de elasticidad del terreno (E)	=	20000	KN/m^2

Estrato 3

Espesor (Z)	=	4	m
Módulo de Poisson (ν)	=	0.30	
Módulo de elasticidad del terreno (E)	=	25000	KN/m^2

El espaciamiento entre pilotes d es

$$d = 3D = (3)(1.25) = 3.75m$$

En base a las consideraciones anteriores se procede a calcular el largo y ancho del grupo.

$$\begin{aligned} Bg &= (n_2 - 1)d + D & Lg &= (n_1 - 1)d + D \\ Bg &= (2 - 1)(3.75) + 1.25 & Lg &= (3 - 1)(3.75) + 1.25 \\ Bg &= 5m & Lg &= 8.75m \end{aligned}$$

A continuación se determina el incremento de la presión vertical total, para lo cual se considera la relación $Lg/Bg \leq 10$:

$$\frac{Lg}{Bg} = \frac{8.75}{5}$$

$$\frac{Lg}{Bg} = 1.75 \leq 10 \quad \mathbf{SI}$$

Por lo tanto se aplica la (Ecuación 65).

$$\Delta\sigma_i = p(1 - \cos^3 \alpha)$$

Donde p es la presión media transmitida por la cimentación. Se calcula empleando la siguiente expresión

$$\begin{aligned} p &= P/(LgBg) \\ p &= \frac{3600}{(8.75)(5)} = 82.29 \frac{KN}{m^2} \end{aligned}$$



El radio de la cimentación circular equivalente es

$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{(5)(8.75)}{3.1416}} = 3.73m$$

Para determinar el ángulo α se considera el espesor del estrato $Z=2 m$

$$\alpha = \arctg(a / Z)$$

$$\alpha = \arctg(3.73 / 2)$$

$$\alpha_1 = 1.078 \text{radianes}$$

Por lo tanto se tiene

$$\Delta\sigma_1 = ((3600)/(5)(8.75))(1 - \cos^3(1.078))$$

$$\Delta\sigma_1 = 73.573 \text{KN} / m^2$$

Para el Estrato 2 y 3, al igual que para el primer estrato se considera el espesor Z correspondiente a cada uno. Entonces

$$\alpha_2 = 0.750 \text{radianes}$$

$$\alpha_3 = 0.750 \text{radianes}$$

$$\Delta\sigma_2 = 50.052 \text{KN} / m^2$$

$$\Delta\sigma_3 = 50.052 \text{KN} / m^2$$

Según la (Ecuación 67) el Módulo de Poisson Equivalente es

$$V_{equiva} = \frac{\sum v_i z_i \Delta\sigma_i}{\sum z_i \Delta\sigma_i}$$

$$V_{equiva} = \frac{196.351}{547.562}$$

$$V_{equiva} = 0.36$$

A partir de la (Ecuación 64) se procede a determinar el Módulo de elasticidad medio equivalente del terreno

$$E_m = \frac{\sum \Delta\sigma_i z_i}{\sum \left(\frac{\Delta\sigma_i}{E_i} \right) z_i}$$

$$E_m = \frac{547.562}{0.02783}$$

$$E_m = 19676.34 \text{KN} / m^2$$



Finalmente se calcula el asentamiento del grupo de pilotes mediante la (Ecuación 63), considerando la distancia a un tercio de la longitud enterrada de los pilotes H_1 , la cual es de 3.33 m

$$S_g = S_o + 0.8 \frac{P(1 - V_{equiva}^2)}{E_m (B_g + H_1)(L_g + H_1)}$$

$$S_g = (8.8/1000) + (0.8) \frac{3600(1 - 0.36^2)}{19676.34(5 + 3.33)(8.75 + 3.33)}$$

$$S_g = 0.0101m \approx 10.1mm$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_g	8.75	8.75	m
B_g	5	5	m
d	3.75	3.75	m
v_m	0.36	0.385	
E_m	19676.34	22816.124	KN/m ²
S_g	10.1	9.87	mm

Cuadro 4.7 Resumen de resultados de asentamiento del grupo de pilotes (Ejemplo 2)
Fuente: El Autor

4.4 DISEÑO SÍSMICO DE PILOTES: METODOLOGÍA DDBD

Ejemplo 1. Diseñar una pila - pilote de hormigón armado para soportar una acción exterior de 3500 KN (Dicha pila tiene una altura libre $L_a = 5\text{ m}$, y en la parte superior posee un cabezal lo cual hace que se considere como cabeza empotrada), en un terreno compuesto por 15 m de una arcilla ($C=40\text{ KPa}$).

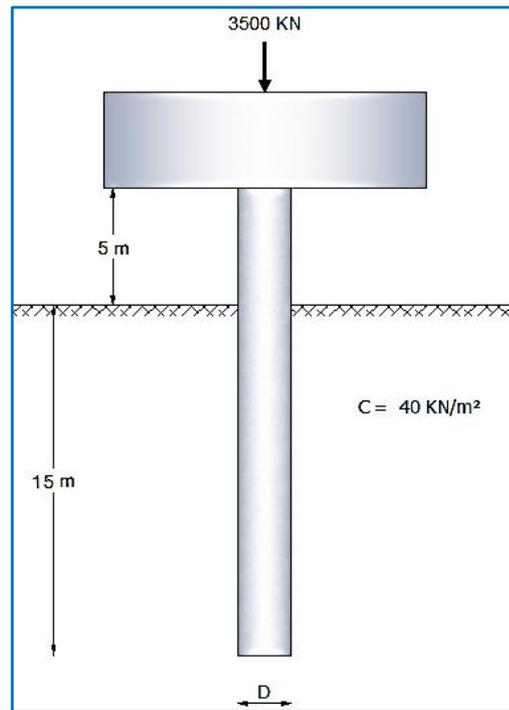


Figura 4.7 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 1 de diseño sísmico)

Fuente: El Autor

Considerar las siguientes condiciones:

- Dimensionar el pilote considerando $\frac{Pu}{f'_c Ag} \leq 0.2$ $Ag = \frac{\pi D^2}{4}$
- Las características del sitio son $PGA = 5.88\text{ m/s}^2$, el periodo de esquina $T_c = 4\text{ s}$, máximo desplazamiento espectral $PSD = 0.95\text{ m}$.
- $f'_c = 35\text{ MPa}$, $f_y = 420\text{ MPa}$.
- Diseñar mediante DDBD, para lo cual utilizar: una ductilidad de diseño de: $\mu = 2.5$, Amortiguamiento elástico $\xi_v = 5\%$.

Predimensionamiento del pilote

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{P}{f'_c}}$$



$$D = 2.527 \sqrt{\frac{3500 \text{ KN}}{35000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}}} = 0.79911 \approx 0.80 \text{ m}$$

Cuantía de acero

$$\rho_s = 1\% A_g = \pi(0.01)(80^2)(0.25)$$

$$\rho_s = 50.265 \text{ cm}^2$$

Área de una varilla de 24 mm

$$A_{s\phi 24} = \pi(2.4^2)(0.25)$$

$$A_{s\phi 24} = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$N_{var} = \frac{\rho_s}{\rho_{s\phi 24}} = \frac{50.265}{4.524} = 11.11 \approx 12 \text{ varillas}$$

Esp (espaciamiento ref. transversal) = 150 mm

Rec (recubrimiento desde cara a eje de varilla long.) = 50 mm

Tipo de suelo: Arcilla $C = 40 \text{ KPa}$, por lo tanto de acuerdo al (Cuadro 3.7) los parámetros correspondientes a este tipo de suelo son:

$$\beta_1 = 1.540$$

$$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln\left(\frac{L_a}{D}\right) = 2.075$$

$$L_e = 4.96D + 0.71(L_a) = 7.518 \text{ m}$$

La longitud desde el extremo del pilote al punto de inflexión, denominada L_i , se obtiene de acuerdo al (Cuadro 3.8)

$$L_i = 0.59 L_e = (0.59)(7.518)$$

$$L_i = 4.436 \text{ m}$$

Factores p y q para determinar el amortiguamiento histerético se estiman a partir del (Cuadro 3.9).

$$p = 5.6 \quad y \quad q = 8.7$$



La distancia desde la fibra a compresión al eje neutro se calcula mediante la (Ecuación 74).

$$c = 0.2D \left(1 + 3.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right)$$

$$f'_{ce} = 1.3 f'_c = 1.3 (35000 \text{ KPa})$$

$$f'_{ce} = 45500 \text{ KPa}$$

$$f'_{ye} = 1.3 f_y = 1.1 (420000 \text{ KPa})$$

$$f'_{ye} = 462000 \text{ KPa}$$

$$c = 0.2(0.80) \left(1 + 3.25 \frac{3500}{(45500)(0.503)} \right) = 0.24m$$

La curvatura de fluencia se calcula con la (Ecuación 68).

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_s}{D}$$

$$\phi_y = 2.25 \frac{0.002}{0.80} = 0.006$$

Se obtiene la longitud de la rótula plástica mediante la (Ecuación 71).

$$L_p = 0.008L_i + 0.022f_y d_{bl}$$

$$L_p = 0.008(4.436) + 0.022(462)(0.024)$$

$$L_p = 0.279 \text{ m}$$

El desplazamiento de fluencia se determina empleando la (Ecuación 69).

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_e^2}{6}$$

$$\Delta_y = \frac{(2.075)(0.006)(7.518)^2}{6}$$

$$\Delta_y = 0.110 \text{ m}$$

A partir de la curvatura de fluencia y de la ductilidad de desplazamiento se obtiene la demanda de desplazamiento o desplazamiento de diseño por medio de la (Ecuación 77).

$$\Delta_D = \mu_\Delta \Delta_y$$



$$\Delta_D = (2.5)(0.110)$$

$$\Delta_D = 0.275 \text{ m}$$

Se obtiene el amortiguamiento histerético aplicando la (Ecuación 76).

$$\xi_h = p + q \frac{\mu_\Delta - 1}{\mu_\Delta}$$

$$\xi_h = 5.6 + (8.7) \frac{2.5 - 1}{2.5}$$

$$\xi_h = 10.820 \%$$

Luego se procede a determinar el amortiguamiento viscoso equivalente, a través de la (Ecuación 75).

$$\xi_{eq} = \xi_v \mu_\Delta^{-0.378} + \xi_h$$

$$\xi_{eq} = 5(2.5)^{-0.378} + 10.820$$

$$\xi_{eq} = 14.356 \%$$

A continuación se calcula el factor de reducción espectral, empleando la (Ecuación 78).

$$R_\xi = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi_{eq}}}$$

$$R_\xi = \sqrt{\frac{7}{2 + 14.356}}$$

$$R_\xi = 0.654$$

Seguidamente se determina la masa efectiva considerando la (Ecuación 81).

$$m_{eff} = \frac{P}{g} = \frac{3500}{9.81}$$

$$m_{eff} = 356.779 \text{ KN}$$

Se considera el peso del pilote, cuyo valor se estima de acuerdo a la siguiente expresión

$$W = A_g \gamma_h L_a + P = (0.503)(24)(5) + 3500$$

$$W = 3560.319 \text{ KN}$$



Determinados todos estos valores, se inicia el cálculo del periodo efectivo a través de la (Ecuación 79).

$$T_{eff} = \frac{T_c \Delta_D}{(PSD)(R_\xi)}$$

$$T_{eff} = \frac{4(0.275)}{(0.95)(0.654)}$$

$$T_{eff} = 1.770 \text{ s}$$

Mediante el uso de la (Ecuación 80) se encuentra el valor de la rigidez efectiva.

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 m_{eff}}{T_{eff}^2}$$

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2(356.779)}{1.770^2}$$

$$K_{eff} = 7957.667 \frac{KN}{m}$$

A partir de la (Ecuación 82) se procede a determinar el cortante de diseño.

$$V_T = K_{eff} \Delta_D$$

$$V_T = (7957.667)(0.275)$$

$$V_T = 2188.358 \text{ KN}$$

El momento de diseño es calculado de acuerdo a la (Ecuación 83).

$$M_T = V_T L_i$$

$$M_T = (2188.358)(4.436)$$

$$M_T = 9707.558 \text{ KNm}$$

Se verifica que el efecto $P - \Delta$ se encuentre dentro del máximo permitido, para lo cual se emplea la (Ecuación 84).

$$P - \Delta = \frac{W \Delta_D}{M} * 100$$

$$P - \Delta = \frac{3560.319(0.275)}{9707.558} (100)$$

$$P - \Delta = 10.086 \% \leq 22 \% \quad OK$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

MODELO EQUIVALENTE	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_e	7.518	7.518	m
Δy	0.11	0.11	m
$\beta 2$	0.4	0.4	
RESULTADOS DE DISEÑO	MANUAL	HERRAMIENTA	
$\mu\Delta$	2.5	2.5	
Δd	0.275	0.275	m
ξh	10.82	10.82	%
ξ_{eq}	14.36	14.356	%
T_{eff}	1.77	1.769	s
K	7957.667	7960.96	KN/m
V_{eff}	2188.358	2188.41	KN
M	9707.56	9706.96	KNm
$P - \Delta$	10.09	9,912	%

Cuadro 4.8 Resumen de resultados del diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 1)
Fuente: El Autor

Ejemplo 2. Diseñar una pila- pilote de hormigón armado para soportar una acción exterior de 1000 KN (Dicha pila tiene una altura libre $L_a = 4\text{ m}$, y en la parte superior posee un cabezal lo cual hace que se considere como cabeza empotrada), en un terreno compuesto por 13 m de una arcilla ($C = 20\text{ KPa}$).

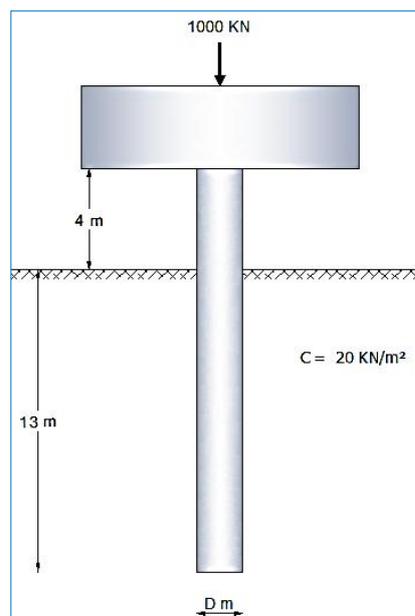


Figura 4.8 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 2 de diseño sísmico)

Fuente: El Autor



Considerar las siguientes condiciones:

- Dimensionar el pilote considerando $\frac{Pu}{f'_c Ag} \leq 0.2$ $Ag = \frac{\pi D^2}{4}$
- Las características del sitio son $PGA = 5.88 \text{ m/s}^2$, el periodo de esquina $T_c = 4 \text{ s}$, máximo desplazamiento espectral $PSD = 0.90 \text{ m}$.
- $f'_c = 28 \text{ MPa}$, $f_y = 420 \text{ MPa}$.
- Determinar la ductilidad de desplazamiento para lo cual se debe considerar un amortiguamiento elástico $\xi_v = 5\%$.

Predimensionamiento del pilote

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{P}{f'_c}}$$

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{1000 \text{ KN}}{28000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}}} = 0.478 \approx 0.50 \text{ m}$$

Cuantía de acero

$$\rho_s = 1\% A_g = \pi(0.01)(50^2)(0.25)$$

$$\rho_s = 19.63 \text{ cm}^2$$

Área de una varilla de 14 mm

$$A_{s\phi 24} = \pi(1.4^2)(0.25)$$

$$A_{s\phi 24} = 1.54 \text{ cm}^2$$

$$N_{var} = \frac{\rho_s}{A_{s\phi 24}} = \frac{19.63}{1.54} = 12.75 \approx 13 \text{ varillas}$$

Esp (espaciamiento ref. transversal) = 100 mm

Rec (recubrimiento desde cara a eje de varilla long.) = 50 mm

Tipo de suelo: Arcilla $C = 20 \text{ KPa}$, por lo tanto de acuerdo al (Cuadro 3.7) los parámetros correspondientes a este tipo de suelo son:

$$\alpha = 2.84 - 0.38 \ln \frac{L_a}{D} = 2.050$$

$$L_e = 6.38D + 0.69L_a = 5.950 \text{ m}$$



Estado límite de servicio: **Serviciabilidad**

Por lo tanto de acuerdo al (Cuadro 3.10) se tiene

$$\varepsilon_c = 0.004$$

$$\varepsilon_s = 0.015$$

La longitud desde el extremo del pilote al punto de inflexión, denominada L_i , se obtiene de acuerdo al (Cuadro 3.8).

$$L_i = 0.59 L_e = (0.59)(5.950)$$

$$L_i = 3.511 \text{ m}$$

Los factores p y q para determinar el amortiguamiento histerético se estiman a partir del (Cuadro 3.9).

$$p = 6.7 \quad y \quad q = 8.1$$

La distancia desde la fibra a compresión al eje neutro se calcula mediante la (Ecuación 74).

$$c = 0.2D \left(1 + 3.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right)$$

$$f'_{ce} = 1.3 f'_c = 1.3 (28000 \text{ KPa})$$

$$f'_{ce} = 36400 \text{ KPa}$$

$$f'_{ye} = 1.3 f_y = 1.1 (420000 \text{ KPa})$$

$$f'_{ye} = 462000 \text{ KPa}$$

$$c = 0.2(0.50) \left(1 + 3.25 \frac{1000}{(36400)(0.196)} \right) = 0.25 \text{ m}$$

La curvatura de control de daño se obtiene aplicando la (Ecuación 73).

$$\phi_{CD} = \frac{\varepsilon_c}{c}$$

$$\phi_{CD} = \frac{0.004}{0.250}$$

$$\phi_{CD} = 0.016$$



La curvatura de fluencia se calcula con la (Ecuación 68).

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_s}{D}$$

$$\phi_y = 2.25 \frac{0.002}{0.50}$$

$$\phi_y = 0.009$$

Se obtiene la longitud de la rótula plástica mediante la (Ecuación 71).

$$L_p = 0.008L_i + 0.022f_y d_{bl}$$

$$L_p = 0.008(3.511) + 0.022(420)(0.014)$$

$$L_p = 0.157 \text{ m}$$

El desplazamiento de fluencia se determina empleando la (Ecuación 69).

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_e^2}{6}$$

$$\Delta_y = \frac{(2.050)(0.009)(5.950)^2}{6}$$

$$\Delta_y = 0.109 \text{ m}$$

A partir de las consideraciones anteriores y tomando en cuenta el coeficiente $\beta = 1.54$, se procede a determinar la ductilidad de desplazamiento mediante la (Ecuación 72).

$$\mu_\Delta = 1 + \frac{(\phi_{CD} - \phi_y) \beta L_p L_e}{\Delta_y}$$

$$\mu_\Delta = 1 + \frac{(0.016 - 0.009)(1.54)(0.157)(5.950)}{0.109}$$

$$\mu_\Delta = 1.092$$

A partir del desplazamiento de fluencia y de la ductilidad de desplazamiento se obtiene la demanda de desplazamiento o desplazamiento de diseño por medio de la (Ecuación 77).

$$\Delta_D = \mu_\Delta \Delta_y$$

$$\Delta_D = (1.092)(0.109)$$

$$\Delta_D = 0.119 \text{ m}$$



Se obtiene el amortiguamiento histerético aplicando la (Ecuación 76).

$$\xi_h = p + q \frac{\mu_\Delta - 1}{\mu_\Delta}$$
$$\xi_h = 6.7 + (8.1) \frac{1.092 - 1}{1.092}$$
$$\xi_h = 7.382 \%$$

Luego se procede a determinar el amortiguamiento viscoso equivalente, a través de la (Ecuación 75).

$$\xi_{eq} = \xi_v \mu_\Delta^{-0.378} + \xi_h$$
$$\xi_{eq} = 5(1.092)^{-0.378} + 7.382$$
$$\xi_{eq} = 12.219\%$$

A continuación se calcula el factor de reducción espectral, empleando la (Ecuación 78).

$$R_\xi = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi_{eq}}}$$
$$R_\xi = \sqrt{\frac{7}{2 + 12.219}}$$
$$R_\xi = 0.702$$

Seguidamente se determina la masa efectiva considerando la (Ecuación 81).

$$m_{eff} = \frac{P}{g} = \frac{1000}{9.81}$$
$$m_{eff} = 101.937 \text{ KN}$$

Se considera el peso del pilote, cuyo valor se estima de acuerdo a la siguiente expresión

$$W = A_g \gamma_h L_a + P = (0.196)(24)(4) + 1000$$
$$W = 1018.85 \text{ KN}$$



Determinados todos estos valores, se inicia el cálculo del periodo efectivo a través de la (Ecuación 79).

$$T_{eff} = \frac{T_c \Delta_D}{(PSD)(R_\xi)}$$

$$T_{eff} = \frac{4(0.119)}{(0.90)(0.702)}$$

$$T_{eff} = 0.753 \text{ s}$$

Mediante el uso de la (Ecuación 80) se encuentra el valor de la rigidez efectiva.

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 m_{eff}}{T_{eff}^2}$$

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2(101.937)}{0.753^2}$$

$$K_{eff} = 5344.371 \frac{KN}{m}$$

A partir de la (Ecuación 82) se procede a determinar el cortante de diseño.

$$V_T = K_{eff} \Delta_D$$

$$V_T = (5344.371)(0.119)$$

$$V_T = 635.98 \text{ KN}$$

El momento de diseño es calculado de acuerdo a la (Ecuación 83).

$$M_T = V_T L_i$$

$$M_T = (635.98)(3.511)$$

$$M_T = 2232.926 \text{ KNm}$$

Se verifica que el efecto $P - \Delta$ se encuentre dentro del máximo permitido, para lo cual se emplea la (Ecuación 84).

$$P - \Delta = \frac{W \Delta_D}{M} (100)$$

$$P - \Delta = \frac{(1018.85)(0.119)}{2232.926} (100)$$

$$P - \Delta = 5.43 \% \leq 22 \% \quad OK$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

MODELO EQUIVALENTE	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_e	5.95	5.32	m
Δy	0.109	0.085	m
$\beta 2$	0.4	0.4	
RESULTADOS DE DISEÑO	MANUAL	HERRAMIENTA	
μ_Δ	1.092	1.681	
Δd	0.119	0.142	m
ξh	7.382	9.125	%
ξ_{eq}	12.22	13.234	%
T_{eff}	0.753	0.933	s
K	5344.37	4313.425	KN/m
V_{eff}	635.98	613.793	KN
M	2232.93	1926.573	KNm
P - Δ	5.43	7.386	%

Cuadro 4.9 Resumen de resultados del diseño sísmico mediante DDBD (Ejemplo 2)
Fuente: El Autor

4.5 DISEÑO SÍSMICO: METODOLOGÍA LRFD

Ejemplo 1. Diseñar una pila - pilote de hormigón armado para soportar una acción exterior de 3500 KN (Dicha pila tiene una altura libre $L_a = 5 m$, y en la parte superior posee un cabezal lo cual hace que se considere como cabeza empotrada), en un terreno compuesto por 15 m de una arcilla ($C = 40 KPa$).

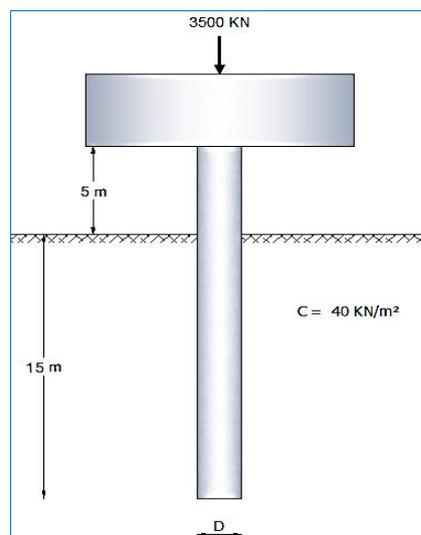


Figura 4.9 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 1 de diseño sísmico)

Fuente: El Autor



Considerar las siguientes condiciones:

- Dimensionar el pilote considerando $\frac{Pu}{f'_c Ag} \leq 0.2$ $Ag = \frac{\pi D^2}{4}$
- Las características del sitio son $PGA = 5.88 \text{ m/s}^2$, el periodo de esquina $T_c = 4 \text{ s}$, máximo desplazamiento espectral $PSD = 0.95 \text{ m}$.
- $f'_c = 35 \text{ MPa}$, $f_y = 420 \text{ MPa}$.
- Diseñar mediante *LRFD*, para lo cual utilizar: un factor de seguridad $R = 3$
- Considere el peso propio del pilote.

Predimensionamiento del pilote

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{P}{f'_c}}$$

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{3500 \frac{KN}{m^2}}{35000 \frac{KN}{m^2}}}$$

$$D = 0.79911 \approx 0.80 \text{ m}$$

Cuantía de acero

$$\rho_s = 1\% A_g = \pi(0.01)(80^2)(0.25)$$

$$\rho_s = 50.265 \text{ cm}^2$$

Área de una varilla de 24 mm

$$A_{s\phi 24} = \pi(2.4^2)(0.25)$$

$$A_{s\phi 24} = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$N_{var} = \frac{\rho_s}{\rho_{s\phi 24}} = \frac{50.265}{4.524} = 11.11 \approx 12 \text{ varillas}$$

Esp (espaciamiento ref. transversal) = 150 mm

Rec (recubrimiento desde cara a eje de varilla long.) = 50 mm

Tipo de suelo: Arcilla $C = 40 \text{ KPa}$, por lo tanto los parámetros correspondientes a este tipo de suelo, de acuerdo al (Cuadro 3.11), son:

$$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln\left(\frac{L_a}{D}\right)$$



$$\alpha = 2.075$$

Se emplea la (Ecuación 87) para determinar la inercia gruesa del pilote.

$$I_{py} = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi(0.80^4)}{64}$$

$$I_{py} = 0.02011 \text{ m}^4$$

El módulo de elasticidad del pilote se estima mediante la (Ecuación 88).

$$E_p = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{35} * 1000$$

$$E_p = 27805574.98 \frac{KN}{m^2}$$

Para obtener la longitud de empotramiento se emplea la (Ecuación 85). Se considera además el (Cuadro 3.12), para estimar el valor de E_s .

$$E_s = 2673.45 \text{ KPa}$$

$$L_f = 1.4 \left[\frac{E_p I_{py}}{E_s} \right]^{0.25}$$

$$L_f = 1.4 \left[\frac{(27805574.98)(0.02011)}{(2673.45)} \right]^{0.25}$$

$$L_f = 5.324 \text{ m}$$

A partir de la (Ecuación 68) se determina la curvatura de fluencia.

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_s}{D}$$

$$\phi_y = 2.25 \frac{0.002}{0.80}$$

$$\phi_y = 0.006$$

El desplazamiento de fluencia se encuentra aplicando la (Ecuación 69).

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_f^2}{6}$$

$$\Delta_y = \frac{(2.075)(0.006)(5.324)^2}{6}$$

$$\Delta_y = 0.055 \text{ m}$$



El peso del pilote es

$$W = A_g \gamma_h L_a + P = (0.503)(24)(5) + 3500$$

$$W = 3560.319 \text{ KN}$$

A partir de los valores calculados anteriormente y de la (Ecuación 89), se procede a determinar la rigidez del sistema

$$K = \frac{3E_p I_{py}}{L_f^3}$$

$$K = \frac{3(27805574.98)(0.02011)}{(5.324)^3}$$

$$K = 11116.065 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

A continuación se calcula el periodo de Vibración usando la (Ecuación 90).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{gK}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{3560.319}{(9.81)(11116.065)}}$$

$$T = 1.135 \text{ s}$$

Obtenido el periodo de vibración se procede a determinar el cortante de diseño considerando la (Ecuación 92) y un factor de reducción de 3

$$V = \frac{S_a * W}{R}$$

$$V = \frac{0.9}{1.135} * \frac{3560.319}{3}$$

$$V = 940.797 \text{ KN}$$

Mediante la (Ecuación 93) se encuentra el valor del momento de diseño.

$$M = V L_f$$

$$M = (940.797)(5.324)$$

$$M = 5008.803 \text{ KNm}$$



Finalmente se obtiene el desplazamiento de diseño a través de la (Ecuación 91).

$$\Delta_D = \frac{S_a}{T} g T^2$$

$$\Delta_D = \frac{(0.75)(9.81)(1.2)^2}{4\pi^2}$$

$$\Delta_D = 0.254 \text{ m}$$

Se verifica que el efecto $P - \Delta$ se encuentre dentro del límite recomendado empleando la (Ecuación 94).

$$P - \Delta = \frac{V \times R}{K} \times W$$

$$P - \Delta = \frac{(940.797)(3) \times 3560.319}{11116.065} \times 100$$

$$P - \Delta = 18.048 \% \leq 22 \% \quad OK$$

A continuación se presenta un resumen de resultados determinados mediante cálculo manual y mediante la herramienta

MODELO EQUIVALENTE	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_f	5.324	5.324	m
Δy	0.055	0.055	m
RESULTADOS DE DISEÑO	MANUAL	HERRAMIENTA	
Δd	0.254	0.254	m
T_{eff}	1.14	1.135	s
K	11116.65	11114.93	KN/m
V_{eff}	940,797	940.75	KN
M	5008.803	5008.401	KNm
$P - \Delta$	18.048	18.05	%

Cuadro 4.10 Resumen de resultados del diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 1)
Fuente: El Autor

Ejemplo 2. Diseñar una pila - pilote de hormigón armado para soportar una acción exterior de 1500 KN (Dicha pila tiene una altura libre $L_a=3 \text{ m}$, y en la parte superior posee un cabezal lo cual hace que se considere como cabeza empotrada), en un terreno compuesto por 12 m de una arcilla cuya cohesión es $C=40 \text{ KPa}$.

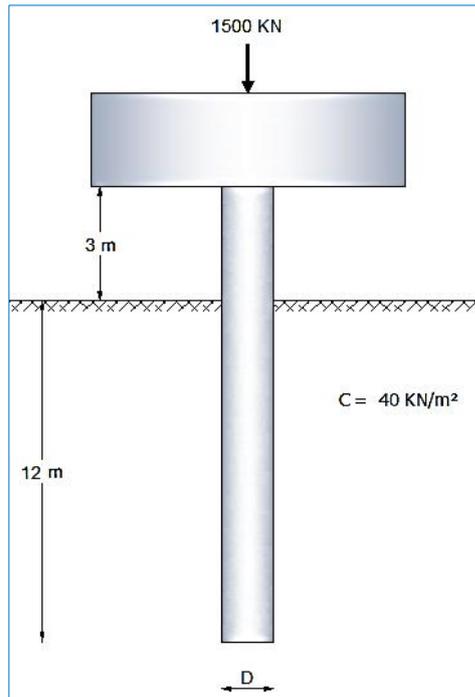


Figura 4.10 Estratigrafía del suelo y nomenclatura de la cimentación para el diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 2 de diseño sísmico)
Fuente: El Autor

Considerar las siguientes condiciones:

- Dimensionar el pilote considerando $\frac{Pu}{f'_c A_g} \leq 0.2$ $A_g = \frac{\pi D^2}{4}$
- Las características del sitio son $PGA = 5.88 \text{ m/s}^2$, el periodo de esquina $T_c = 4 \text{ s}$, máximo desplazamiento espectral $PSD = 0.90 \text{ m}$.
- $f'_c = 21 \text{ MPa}$, $f_y = 420 \text{ MPa}$.
- Diseñar mediante *LRFD*, para lo cual utilizar: un factor de seguridad $R = 3$
- Considere el peso propio del pilote.

Predimensionamiento del pilote

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{P}{f'_c}}$$

$$D = 2.527 \sqrt{\frac{1500 \text{ KN}}{21000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}}}$$

$$D = 0.68 \approx 0.70 \text{ m}$$

Cuantía de acero

$$\rho_s = 1\% A_g = \pi(0.01)(70^2)(0.25)$$



$$\rho_s = 38.48 \text{ cm}^2$$

Área de una varilla de 14 mm

$$A_{s\phi 24} = \pi(1.4^2)(0.25)$$

$$A_{s\phi 24} = 1.539 \text{ cm}^2$$

$$N_{var} = \frac{\rho_s}{\rho_{s\phi 24}} = \frac{38.48}{1.539} = 25 \text{ varillas}$$

Esp (espaciamiento ref. transversal) = 150 mm

Rec (recubrimiento desde cara a eje de varilla long.) = 50 mm

Tipo de suelo: Arcilla $C = 40 \text{ KPa}$, por lo tanto los parámetros correspondientes a este tipo de suelo, de acuerdo al (Cuadro 3.11), son:

$$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln\left(\frac{L\alpha}{D}\right) = 2.200$$

Se emplea la (Ecuación 87) para determinar la inercia gruesa del pilote

$$I_{py} = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi(0.70^4)}{64}$$

$$I_{py} = 0.01179 \text{ m}^4$$

El módulo de elasticidad del pilote se estima mediante la (Ecuación 88).

$$E_p = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{21}(1000)$$

$$E_p = 21538105.76 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Para obtener la longitud de empotramiento se emplea la (Ecuación 85). Se considera además el (Cuadro 3.12), para estimar el valor de E_s para una arcilla cuya cohesión es de 40 KPa.

$$E_s = 2305.43 \text{ KPa}$$

$$L_f = 1.4 \left[\frac{E_p I_{py}}{E_s} \right]^{0.25}$$

$$L_f = 1.4 \left[\frac{(21538105.76)(0.01179)}{(2305.43)} \right]^{0.25}$$

$$L_f = 4.535 \text{ m}$$



A partir de la (Ecuación 68) se determina la curvatura de fluencia

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_s}{D}$$

$$\phi_y = 2.25 \frac{0.002}{0.70}$$

$$\phi_y = 0.006$$

El desplazamiento de fluencia se encuentra aplicando la (Ecuación 69).

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_f^2}{6}$$

$$\Delta_y = \frac{(2.200)(0.006)(4.535)^2}{6}$$

$$\Delta_y = 0.048 \text{ m}$$

El peso del pilote es

$$W = A_g \gamma_h L_a + P = (0.385)(24)(3) + 1500$$

$$W = 1527.709 \text{ KN}$$

A partir de los valores calculados anteriormente y de la (Ecuación 89), se procede a determinar la rigidez del sistema.

$$K = \frac{3E_p I_{py}}{L_f^3}$$

$$K = \frac{3(21538105.76)(0.01179)}{(4.535)^3}$$

$$K = 8167.905 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

A continuación se calcula el periodo de vibración usando la (Ecuación 90).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{gK}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1527.709}{(9.81)(8167.905)}}$$

$$T = 0.868 \text{ s}$$



Obtenido el periodo de vibración se procede a determinar el cortante de diseño considerando la (Ecuación 92) y un factor de reducción de 3.

$$V = \frac{\frac{S_a}{T} * W}{R}$$

$$V = \frac{\frac{0.9}{0.868} * 1527.709}{3}$$

$$V = 528.010 \text{ KN}$$

Mediante la (Ecuación 93) se encuentra el valor del momento de diseño.

$$M = V L_f$$

$$M = (528.010)(4.535)$$

$$M = 2394.525 \text{ KNm}$$

Finalmente se obtiene el desplazamiento de diseño a través de la (Ecuación 91).

$$\Delta_D = \frac{\frac{S_a}{T} g T^2}{4 \pi^2}$$

$$\Delta_D = \frac{\frac{0.9}{0.868}(9.81)(0.868)^2}{4 \pi^2}$$

$$\Delta_D = 0.194 \text{ m}$$

Se verifica que el efecto $P - \Delta$ se encuentre dentro del límite recomendado empleando la (Ecuación 94).

$$P - \Delta = \frac{\frac{V \times R}{K} \times W}{M}$$

$$P - \Delta = \frac{\frac{(528.010)(3)}{8167.905} \times 1527.709}{2394.525} \times 100$$

$$P - \Delta = 12.373 \% \leq 22 \% \quad OK$$

A continuación se presenta un resumen de resultados de diseño sísmico, los cuales han sido determinados mediante cálculo aritmético y mediante el uso de la herramienta *diseño sísmico: método LRFD*.



MODELO EQUIVALENTE	CÁLCULO		
	MANUAL	HERRAMIENTA	
L_f	4.535	4.37	m
Δy	0.048	0.045	m
RESULTADOS DE DISEÑO	MANUAL	HERRAMIENTA	
Δd	0.194	0.184	m
T_{eff}	0.868	0.821	s
K	8167.91	9123.97	KN/m
V_{eff}	528.01	558.33	KN
M	2394.53	2440.003	KNm
P - Δ	12.37	11.49	%

Cuadro 4.11 Resumen de resultados del diseño sísmico mediante LRFD (Ejemplo 2)
Fuente: El Autor



CAPÍTULO V

MANUALES DE USUARIO



5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los manuales de usuario de cada aplicación, en los que se explica su funcionamiento, y además se describen las diferentes metodologías que se han utilizado para desarrollar dichas aplicaciones. Cada manual es independiente, por lo tanto la numeración de figuras, cuadros y ecuaciones, lo es también.

Disclaimer

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé al presente software y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven de resultados erróneos. El mismo ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta “Diseño de Pilotes” hay algo que no parece funcionar correctamente, por favor informe sobre el problema a jchurtado@utpl.edu.ec.

5.2 CÁLCULO DE: CAPACIDAD DE CARGA DE HUNDIMIENTO.

La presente herramienta de diseño, tiene como finalidad determinar: *La capacidad de carga última por hundimiento tanto en pilotes de hormigón individuales como en grupo*, considerando la geometría del elemento las características de los materiales que conforman la estructura y las características geotécnicas del suelo sobre el cual se apoya el pilote.

Las metodologías de cálculo incorporadas a la presente herramienta han sido extraídas de: *Guía de cimentaciones para obras de carreteras (Normativa Española, 2006)*, *Criterios Geotécnicos de las Recomendaciones para Obras Marítimas y Portuarias (ROM-05)*, *Principios de Ingeniería de cimentaciones (Braja Das)*, *Foundation Analysis and Design (Bowles)*.

Para hacer uso de esta herramienta se debe ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la ventana de DISEÑO/Pilotes.



Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario ingresa a cualquiera de las herramientas disponibles en el portal y procede a digitar los datos necesarios para el cálculo correspondiente, para luego obtener los resultados.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en el proceso de cálculo, las cuales se aplican mediante un ejemplo práctico.

Funcionamiento de la herramienta

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: la *carga aplicada al pilote*, la *resistencia a la compresión del concreto*, el *peso específico del hormigón*, *longitud libre del pilote*, la *longitud enterrada del pilote*, y *factor de seguridad frente al hundimiento*.
- b) Introducidos los datos, se calcula de acuerdo al código ACI un valor de diámetro teórico el cual se presenta en la interfaz de la herramienta. Este valor de diámetro sirve como referencia para introducir un valor de diámetro adoptado, con el cual la herramienta procesa todos los cálculos.
- c) Se elige el número de estratos que conforman la profundidad de cimentación, y se ingresan los datos geotécnicos para cada uno de los estratos.
- d) En caso de que exista presencia del nivel freático, se activa la casilla “*Considerar Nivel Freático*” y se ingresa la profundidad a la cual se halla.
- e) Se procede a elegir el método de resistencia por punta. Si el pilote se encuentra empotrado en roca se activa la casilla “*Empotramiento en roca*” y se ingresan los datos requeridos; y si la punta del pilote se encuentra apoyada sobre una capa de suelo cualquiera, se puede elegir entre el *método de Vesic* y el de la *Normativa Española* para realizar este cálculo.
- f) Escoger el método para determinar la resistencia por fricción o fuste, la herramienta dispone de tres: *Método α* , *Método λ* , y *Método de la Normativa Española* para suelos cohesivos y para granulares la herramienta utiliza el método de *Meyerhoff* y de la *Normativa Española*



-
- g) La herramienta permite cargar un ejemplo, para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta, mediante el botón *EJEMPLO*.
- h) Se procede a presionar el botón *CALCULAR*, para procesar todos los datos y a continuación se presentan los resultados.
- i) Si el usuario desea realizar otro ejercicio, la herramienta dispone de un botón con la descripción *LIMPIAR*, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.
- j) En caso de que al presentarse los resultados junto con un mensaje de información que recomienda el pilotaje en grupo, se activa la casilla "*CARGA DE HUNDIMIENTO PARA EL GRUPO DE PILOTES*".
- k) Ingresar los datos requeridos como son: *el número de pilotes tanto en fila como en columna, y el factor recomendado (Braja Das y Normativa Española) para determinar el espaciamiento entre pilotes.*
- l) Finalmente se presiona el botón *CALCULAR* para obtener los resultados correspondientes, los cuales se presentan en la interfaz junto con un mensaje de información que indica si la cimentación en grupo es satisfactoria o no.

Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta está diseñada para determinar la Capacidad de carga de Hundimiento únicamente para pilotes de hormigón de sección circular. El número máximo de estratos a considerarse es de cuatro, y se debe tener en cuenta que: la suma total de los espesores de los estratos considerados debe ser igual a la longitud total de empotramiento del pilote; y si el Nivel freático se encuentra en medio de un estrato, este se divide en dos estratos, en donde uno de los estratos se encontrará sobre el nivel freático y el otro debajo de este nivel.

Utilización de la herramienta

- Paso 1. Ingreso de datos

Ingresar los datos estructurales del pilote y los datos geotécnicos del sitio en donde se llevará a cabo la cimentación. Todos los datos se deben ingresar en unidades del sistema internacional (SI). Para ingresar los datos referidos a la geometría del elemento, se recomienda observar el esquema de cimentación que

se presenta en la parte derecha de la interfaz de ingreso de datos estructurales (Figura 1)

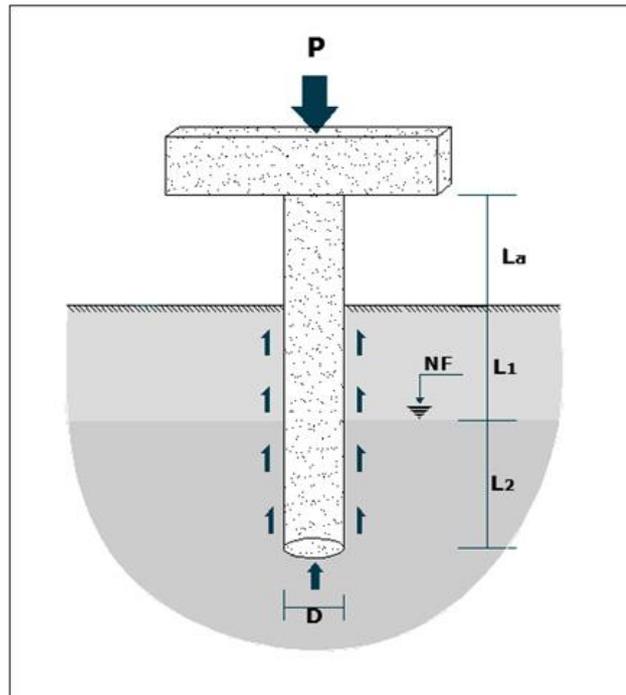


Figura 1. Esquema y nomenclatura de una cimentación con pilotes
Fuente: El Autor

A continuación se describe la interfaz de la herramienta, para lo cual se ha utilizado el ingreso de datos de un ejemplo específico.

Datos estructurales

INGRESO DE DATOS	
Datos estructurales	
Carga axial ultima, (P)	<input type="text" value="3600"/> KN
Resistencia del Hormigón, ($f'c$)	<input type="text" value="21000"/> KN/m ²
Peso específico del Hormigón (γ_h)	<input type="text" value="24"/> KN/m ³
Longitud libre del pilote, (L_a)	<input type="text" value="0"/> m
Longitud enterrada del pilote, (h)	<input type="text" value="10"/> m
Factor Seguridad frente al Hundimiento (FS)	<input type="text" value="3"/>

Figura 2. Ingreso de datos estructurales
Fuente: El Autor

Al ingresar un valor de factor de seguridad puede aparecer un mensaje en color rojo que sugiere un rango de FS entre 3 y 4 (Normativa española, 2002), esto se debe a que se ha colocado un validador de rango que recomienda los valores que los textos especializados sugieren cuando se diseñan fundaciones con pilotes.

Factor Seguridad frente al Hundimiento (FS)

Se recomienda valor [3 - 4] (Normativa Española)

2

Figura 3. Mensaje de recomendación de rango de factor de seguridad
Fuente: El Autor

También se ha creído conveniente colocar dentro del ingreso de datos el predimensionamiento de la sección la cual consiste en determinar un Diámetro teórico a partir de la resistencia a la compresión del hormigón y de la carga axial que se aplica al elemento (ACI318, 2005). Este diámetro sirve como una referencia para considerar el Diámetro adoptado (D) que es el valor con el cual se realizará todo el proceso de cálculo.

PREDIMENSIONAMIENTO:

Diámetro teórico

m

Diámetro adoptado (D)

m

Figura 4. Predimensionamiento del diámetro
Fuente: El Autor

Datos geotécnicos del suelo

Luego de haber ingresado los datos estructurales, se procede a identificar cuantos estratos existen y cuáles son sus propiedades geotécnicas (Figura 5).

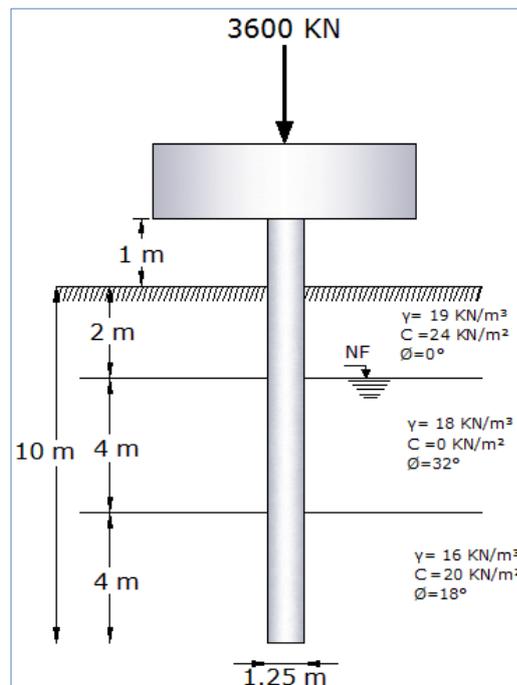


Figura 5. Estratigrafía del suelo
Fuente: El Autor

Al momento de ingresar el número de estratos se debe tener en cuenta que: Si el nivel freático se encuentra dentro de un mismo estrato, este se divide en dos, es decir se considerará un estrato al que se encuentra sobre el nivel freático y como un segundo al que se halla por debajo de este, además se debe tener en cuenta que la herramienta está desarrollada para considerar un máximo de cuatro estratos.

DATOS GEOTECNICOS:

Numero de Estratos:

Espezo estrato (Z)	del Profundidad (m)	Z Angulo fricción ϕ'	de Cohesión (KN/m ²)	C Peso específico y (KN/m ³)
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="24"/>	<input type="text" value="19"/>
<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="32"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="18"/>
<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="18"/>	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="16"/>

Figura 6. Ingreso de datos geotécnicos
Fuente: El Autor

- **Paso 2. Alternativas de Diseño:**

Primero se decide si se desea considerar el nivel freático, así como también considerar que el elemento está empotrado en roca, para el ejemplo que se está desarrollando no se considera el empotramiento en roca pero se considera que el nivel freático se encuentra a dos metros de profundidad (Figura 7).

Considerar nivel freático

Profundidad del Nivel Freatico, (ZNF)

Considerar empotramiento en roca

Figura 7. Considerar nivel freático activado
Fuente: El Autor

En caso de que se active la opción *Considerar empotramiento en roca* aparecen dos *textbox* de entrada con su respectivo significado, en los que se deberá ingresar los datos que se requieran para el cálculo de la resistencia por punta. Además se presenta un botón que despliega una tabla (Braja Das, 2001) con valores recomendados de los datos a ingresar (Figura 8).

Resistencia por punta

Considerar empotramiento en roca

Resistencia a compresión no confinada de la roca (q_u) KN/m²

Angulo de fricción drenado (ϕ) °

(a) Textbox de entrada para calcular la resistencia por punta

Resistencia típica a compresión no confinada de las rocas		Valores típicos del ángulo de fricción ϕ de rocas	
TIPO DE ROCA	q_u (MN/m ²)	TIPO DE ROCA	ÁNGULO DE FRICCIÓN, ϕ (grados)
Arenisca	70 - 140	Arenisca	27 - 45
Caliza	105 - 210	Caliza	30 - 40
Lutita	35 - 70	Lutita	10 - 20
Granito	140 - 210	Granito	40 - 50
Mármol	60 - 70	Mármol	25 - 30

(b) Valores recomendados de los datos a ingresar para el empotramiento en roca

Figura 8. Textbox de entrada para calcular la resistencia por punta y Valores recomendados de los datos a ingresar para el empotramiento en roca

Fuente: El Autor

Si se activa la opción *Considerar empotramiento en roca*, la selección del método para el cálculo de la Resistencia por punta no se visualiza en la interface. (Figura 9).

Considerar nivel freático

Resistencia por punta

Considerar empotramiento en roca

Método de cálculo de resistencia por punta: Metodo de Vesic

Índice de rigidez del suelo, $I_{rr} = I_r$ del último estrato

Resistencia por fricción

Método de cálculo de Resistencia por fricción (Arcilla - Arena): Metodo α - Meyerhoff

(a) *Considerar empotramiento en roca* desactivado

Considerar nivel freático

Resistencia por punta

Considerar empotramiento en roca

Resistencia a compresión no confinada de la roca (q_u): KN/m²

Ángulo de fricción drenado (ϕ):

Resistencia por fricción

Método de cálculo de Resistencia por fricción (Arcilla - Arena): Metodo α - Meyerhoff

(b) Opción *considerar empotramiento en roca* activado

Figura 9. *Considerar empotramiento en roca* desactivado y Opción *considerar empotramiento en roca* activado

Fuente: El Autor

- Paso 3. Elección del Método

Para calcular la resistencia en punta y fuste, la herramienta dispone algunas metodologías, que han sido seleccionadas debido a que permiten que el diseño se base en procedimientos aritméticos y no en nomogramas o gráficas.

Entonces, en la interface de la herramienta se procede a elegir el método con el cual se desee realizar el cálculo tanto para la resistencia en punta como para la resistencia por fricción.

Para el cálculo de la *resistencia en punta*, la herramienta dispone de dos métodos:

- El método de *Vesic*, para el cual se requiere ingresar un dato adicional, que es el *Índice de rigidez del suelo*.
- El método de la *Norma Española*, para el cual no se requiere ingresar dato adicional alguno.

En el presente ejemplo se trabajará con el método de *Vesic*.

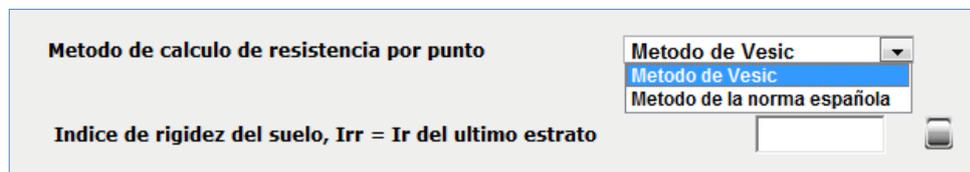


Figura 10. Elección del método de cálculo de resistencia por punta
Fuente: El Autor

Para el cálculo de la *resistencia por fricción o fuste*, la herramienta dispone de cuatro métodos que se aplican a suelos cohesivos, suelos granulares y suelos combinados.

- *Método de Meyerhof*: se aplica a suelos granulares
- *Método α* : se aplica a suelos cohesivos
- *Método λ* : se aplica a suelos cohesivos
- *Método de la Norma española*: para suelos de características combinadas.

Con el fin de considerar cualquiera de los tres tipos de suelo antes considerados, las metodologías para determinar la resistencia por fuste han sido distribuidas de la siguiente manera:

Método α - Método de Meyerhof: permite determinar la resistencia por fuste para un suelo cohesivo y para un suelo granular de forma separada, para luego considerar la suma de ambas como la resistencia por fuste total del estrato. Aunque en ciertos casos una de las metodologías resultará inservible debido a que el tipo de suelo sea específicamente cohesivo o por el contrario únicamente granular.

Método λ - Método de Meyerhof: al igual que la metodología anterior permite, el cálculo separado de la resistencia por fuste para suelos cohesivos y granulares respectivamente. La interacción entre las dos metodologías funciona de igual forma que en la distribución anteriormente indicada.

Método de la Norma Española: esta metodología considera directamente si el suelo es cohesivo, granular, o de características combinadas.

Para el presente ejemplo se elige el **Método α - Meyerhof**, para determinar la resistencia por fuste.

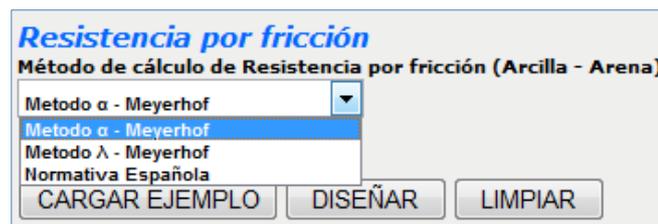


Figura 11. Elección del método de cálculo de resistencia por fricción
Fuente: El Autor

- Paso 4. Ejecución de la herramienta:

La herramienta dispone de un botón con la descripción **EJEMPLO**, que permite cargar un ejemplo, en caso que se desee hacerlo, con todos los datos que se requieren y considerando además los métodos que se aplicarán en el proceso de cálculo.

Se presenta además un botón con la descripción **LIMPIAR** que permite limpiar todos los datos y resultados de la pantalla para poder realizar un nuevo ejemplo.

Cuando se ha ingresado todos los datos y seleccionado los métodos a emplear, se presiona el botón **CALCULAR**, el cual se encuentra en la parte inferior de los últimos datos ingresados. (Figura 12)



Figura 12. Botones para dar inicio al cálculo, ejecutar un ejemplo ó limpiar los datos de la pantalla para un nuevo ejemplo
Fuente: El Autor

A continuación se presentan los valores de resistencia por fricción de cada estrato, junto con los valores de resistencia por fricción total, así como la resistencia en punta, la capacidad última del pilote y finalmente la capacidad admisible del elemento (Figura 13)

CARGA DE HUNDIMIENTO PARA EL PILOTE INDIVIDUAL:		
Capacidad de carga por fricción (KN)		
Estrato 1	193.77343	
Estrato 2	285.69	
Estrato 3	635.24619	
Carga por Fricción Total	1114.71	KN
Capacidad de carga por punta	2982.4945	KN
Capacidad ultima del pilote	4097.2	KN
Capacidad admisible del pilote (Qadm)	1365.73	KN

Figura 13. Presentación de resultados de la resistencia al hundimiento para el pilote individual
Fuente: El Autor

Al final de los resultados, aparecerá en la parte inferior, un mensaje donde se indica si el pilote resiste la carga aplicada (Figura 16a), o se indica que el elemento no posee la capacidad para soportar dicha carga, para lo cual se recomienda incrementar el valor del diámetro o realizar la cimentación utilizando un grupo de pilotes, en donde se sugiere además el número de pilotes a utilizarse. (Figura 16b).

La resistencia ultima de hundimiento es satisfactoria ($P < Q_{adm}$)

(a)

La resistencia ultima de hundimiento no es satisfactoria ($P > Q_{adm}$), se recomienda incrementar el diámetro del pilote o realizar el diseño de la cimentación en grupo para lo cual se recomiendan 3 pilotes

(b)

Figura 16. Mensajes de información del cálculo
Fuente: El Autor

- **Paso 5. Determinación de la capacidad de carga de hundimiento para un grupo de pilotes**

De ser el caso (b) se puede considerar la recomendación de incrementar el diámetro del pilote, o bien se activa la opción “CARGA DE HUNDIMIENTO PARA EL GRUPO DE PILOTES” para realizar el diseño de la cimentación considerando el efecto de grupo.

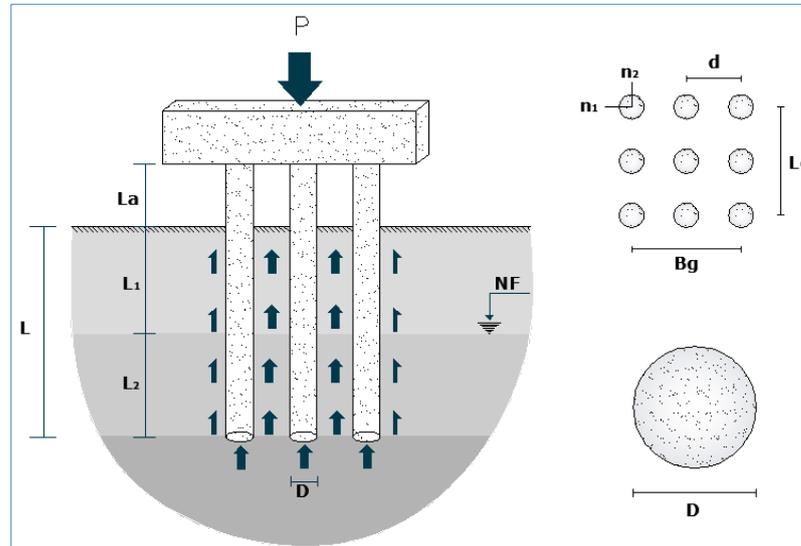


Figura 17. Esquema y nomenclatura de una cimentación con un grupo de pilotes
Fuente: El Autor

Activada la opción “CARGA DE HUNDIMIENTO PARA EL GRUPO DE PILOTES” se debe ingresar como datos adicionales el factor para determinar el espaciamiento entre pilotes, el número de pilotes por fila y el número de pilotes por columna.

CARGA DE HUNDIMIENTO PARA EL GRUPO DE PILOTES:

Factor para calcular el espaciamiento entre pilotes

Numero de pilotes por fila, (m)

Numero de pilotes por columna, (n)

Distancia entre ejes, (d) m

Largo del bloque (Lg) m

Ancho del bloque (Bg) m

Eficiencia de grupo en micropilotes (η)

Capacidad de carga para el grupo de pilotes (Qg) KN

Figura 18. “CARGA DE HUNDIMIENTO PARA EL GRUPO DE PILOTES” activado
Fuente: El Autor

Para el ejemplo que se viene trabajando, el mensaje de información recomienda 3 pilotes a considerarse para el efecto de grupo (*Figura 16 b*).

Entonces se procede a ingresar los siguientes datos:

- Factor para calcular el espaciamiento entre ejes de los pilotes. *Braja Das* sugiere que dicho factor se encuentre dentro de un rango de 2 a 4, por esta razón, en caso de que se ingrese un valor de factor de espaciamiento fuera del rango, la herramienta presenta un mensaje de información para recomendar un factor que esté dentro de dicho rango.



Figura 19. Mensaje de información para sugerencia de factor de espaciamiento
Fuente: El Autor

- Número de pilotes por fila y número de pilotes por columna. Con lo que se determina el ancho y largo del grupo.

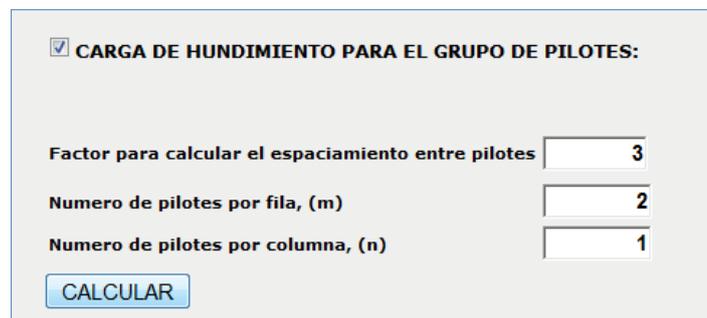


Figura 20. Ingreso de datos para determinar el hundimiento de pilotes en grupo
Fuente: El Autor

Luego de ingresar los valores correspondientes presionamos el botón *CALCULAR*. Como resultados del cálculo en grupo se presentan, la distancia entre ejes de pilotes, las dimensiones del grupo, la eficiencia, y finalmente la capacidad de carga de hundimiento del grupo, además se presenta un mensaje donde se especifica si el diseño realizado es satisfactorio. (*Figura 21*).

Distancia entre ejes, (d)	3.75	m
Largo del bloque (Lg)	5	m
Ancho del bloque (Bg)	1.25	m
Eficiencia de grupo en micropilotes (η)	1.6	
Capacidad de carga para el grupo de pilotes (Qg)	4097.19	KN
La resistencia ultima de hundimiento de grupo es satisfactoria ($P < Qg$)		

Figura 21. Resultados para la capacidad de carga de hundimiento del grupo de pilotes
Fuente: El Autor

En caso de que la cimentación en grupo no sea efectiva aparece un mensaje de información que indica que la resistencia última de hundimiento de grupo no es satisfactoria y además se recomienda incrementar el diámetro. (Figura 22)

La resistencia ultima de hundimiento de grupo no es satisfactoria ($P > Qg$). Se recomienda incrementar el diámetro

Figura 22. Mensaje de información del cálculo de hundimiento de pilotes en grupo
Fuente: El Autor

Descripción de la metodología empleada

- **Predimensionamiento**

Se procede a determinar un diámetro teórico a partir de la carga aplicada ya la resistencia a compresión del elemento, utilizando la (Ecuación 1).

$$D_T = 2.527 \sqrt{\frac{P}{f'_c}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

D_T – diámetro teórico

P – carga axial última

f'_c – resistencia a la compresión del concreto

- **Resistencia por punta**

La resistencia por punta se calcula considerando las características de los materiales del estrato de apoyo.

La presente herramienta dispone de dos métodos para el cálculo de la resistencia por punta, el método de Vesic y el método de la Normativa española. Estos métodos han sido introducidos a esta herramienta debido a que consideran las características físicas del suelo, y por lo tanto son más aproximados que los métodos que usan nomogramas.



Método de Vesic

Este método se basa en la teoría de expansión de cavidades y en parámetros de esfuerzo efectivo para estimar la capacidad de carga por punta de un pilote.

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c N_c^* + \sigma'_o N_\sigma^*) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

- A_p – área de la punta del pilote
- σ'_o – esfuerzo (efectivo) normal medio del terreno al nivel de la punta del pilote
- K_o – coeficiente de presión de tierra en reposo
- N_q^* y N_σ^* – factores de capacidad de carga

$$\sigma'_o = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_v \quad \text{Ec. 3}$$

El coeficiente de presión de tierra se determina mediante la siguiente expresión

$$K_o = 1 - \text{sen } \phi \quad \text{Ec. 4}$$

Donde

- ϕ – ángulo de fricción del suelo

Para determinar los factores de capacidad de carga se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$N_c^* = \left(\frac{4}{3}\right) [\ln(I_{rr}) + 1] + \left(\frac{\pi}{2}\right) + 1 \quad \text{Ec. 5}$$

$$N_\sigma^* = \frac{3}{3 - \text{Sen}\phi} e^{\frac{(90-\phi)\pi}{180}} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) I_{rr}^{\frac{4 \text{ Sen}\phi}{3(1+\text{sen}\phi)}} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

- I_{rr} – Índice de rigidez

Los valores de I_{rr} se obtienen de pruebas de laboratorio para consolidación y triaxiales. Sin embargo, para uso preliminar, se recomiendan los siguientes valores:

Tipo de suelo	I_r
Arena	70 - 150
Limos y Arcillas (condición drenada)	50 - 100
Arcillas (condición no drenada)	100 - 200

Cuadro 1. Valores de índice de rigidez del suelo
Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001



Método de la Normativa española

Cuando se conozcan las características resistentes del terreno en términos del modelo de *Mohr-Coulomb*, se podrá utilizar la siguiente expresión para el cálculo de la capacidad resistente por punta (*Guía de cimentaciones para obras de carreteras*)

$$Q_p = A_p(N_q^* \sigma'_{vo} + N_c^* c) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde

- A_p – Área de la punta del pilote
- σ'_{vo} – Presión vertical efectiva al nivel de la punta.
- $N_q^* N_c^*$ – Factores de capacidad de carga para cimentaciones profundas
- c – Cohesión del suelo

Para el cálculo de los factores de capacidad se utiliza las siguientes expresiones:

$$N_q^* = 1.5 \frac{1+\text{sen}\phi}{1-\text{sen}\phi} e^{\pi \text{tg}\phi} f_D \quad \text{Ec. 8}$$

$$N_c^* = \frac{N_q^* - 1}{\text{tan}\phi} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde

- ϕ – Ángulo de rozamiento interno del suelo.
- f_D – Factor de corrección por tamaño del pilote. Se tomará:

$$f_D = 1 - \frac{1}{3} D > \frac{2}{3} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde

- D – Diámetro del pilote en metros.

El ángulo de rozamiento ϕ debe obtenerse mediante ensayos de laboratorio realizados con muestras inalteradas o poco alteradas sometidas a las altas presiones que suelen existir en la zona de la punta de los pilotes.



- **Resistencia por fricción**

Cada estrato posee una respectiva *resistencia por fricción* que depende del tipo de suelo del cual esté conformado, y de la elección de la metodología de cálculo.

Esta herramienta dispone de dos métodos para determinar la resistencia por fricción en suelos cohesivos, uno para determinar la resistencia por fricción en suelos granulares, y uno para determinar la resistencia por fuste en suelos combinados:

Suelos granulares

Método de Meyerhof

Según *Meyerhof* la resistencia por fricción Q_s se expresa como:

$$Q_s = \sum (p \Delta L f) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde

- ΔL – Espesor del estrato de suelo
 p – Perímetro de la sección transversal del pilote
 f – Resistencia por fricción unitaria

La resistencia unitaria por fricción f , es difícil de estimar. Al calcular f deben tenerse en cuenta varios factores importantes, como son:

- a. La naturaleza de la instalación del pilote. Para los hincados en arena, la vibración causada durante el hincado del pilote ayuda a densificar el suelo a su alrededor.
- b. A profundidades similares, la fricción unitaria superficial en arena suelta es mayor para un pilote de alto desplazamiento que para un pilote de bajo desplazamiento.
- c. A profundidades similares, los pilotes perforados o hincados parcialmente con chorro de agua a gran presión, tendrán una fricción unitaria superficial menor que en el caso de pilotes hincados.



Considerando los factores anteriores, se da una relación aproximada para f .

$$f = K \sigma'_v \tan \delta \quad \text{Ec. 12}$$

Donde

- K – Coeficiente de presión efectivo de la tierra
- σ'_v – Esfuerzo vertical efectivo a la profundidad bajo consideración
- δ – Ángulo de fricción entre suelo y pilote

En realidad, la magnitud de K varía con la profundidad. Es aproximadamente igual al coeficiente, K_p de presión pasiva de Rankine en la parte superior del pilote y menor que el coeficiente, K_0 de la presión en reposo a una profundidad mayor.

TIPO DE PILOTE	K
Perforado	$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$
Hincado, de bajo desplazamiento	$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ a $1.4 K_0 = 1.4(1 - \text{sen}\phi)$
Hincado, de alto desplazamiento	$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ a $1.8 K_0 = 1.8(1 - \text{sen}\phi)$

Cuadro 2. Coeficiente de presión efectivo de la tierra en función del tipo de pilote
Fuente: ROM, 2005

Los valores de δ dados por varios investigadores están en el rango de 0.5ϕ a 0.8ϕ . Se requiere buen juicio al escoger el valor de δ . Para el desarrollo de la aplicación se ha considerado un valor conservador de $\delta = 2/3 \phi$.

Suelos cohesivos

Método λ

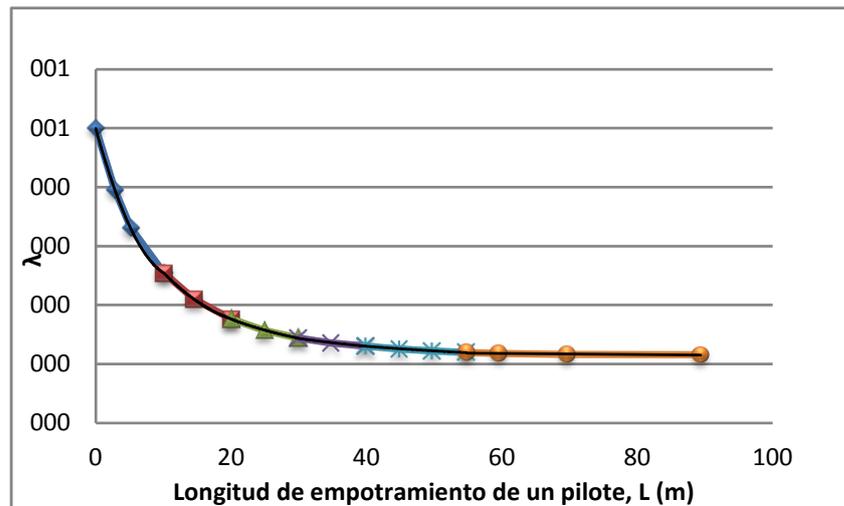
Este método se basa en la hipótesis de que el desplazamiento del suelo causado por el hincado del pilote conduce a una presión lateral pasiva a cualquier profundidad y que la resistencia unitaria superficial promedio es:

$$f_{prom} = \lambda (\sigma'_v + 2 c_u) \quad \text{Ec. 13}$$

Donde

- σ'_o – Esfuerzo vertical efectivo medio para toda la longitud de empotramiento
- c_u – Resistencia cortante media no drenada ($\phi = 0$)

El valor de λ cambia con la profundidad de la penetración del pilote.



Gráfica 1. Variación del factor λ en relación con la longitud de empotramiento
Fuente: Principios de Ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Para determinar este factor la herramienta cuenta con las ecuaciones de la curva que se muestra en la figura anterior:

Tramo de 0 a 10 m

$$\hat{\lambda} = 0.0017 L^2 - 0.0417 L + 0.4996 \quad \text{Ec. 14}$$

Tramo de 10 – 20 m

$$\hat{\lambda} = 0.0004 L^2 - 0.0193 L + 0.4097 \quad \text{Ec. 15}$$

Tramo de 20 – 30 m

$$\hat{\lambda} = 0.8057 L^{-0.507} \quad \text{Ec. 16}$$

Tramo de 30 – 40 m

$$\hat{\lambda} = 0.4568 L^{-0.341} \quad \text{Ec. 17}$$

Tramo de 40 – 50 m

$$\hat{\lambda} = 0.3617 L^{-0.277} \quad \text{Ec. 18}$$

Tramo de 50 – 90 m

$$\hat{\lambda} = -0.0001 L + 0.1242 \quad \text{Ec. 19}$$

La resistencia total por fricción se calcula de acuerdo a la siguiente expresión

$$Q_s = p L f_{prom} \quad \text{Ec. 20}$$

Debe tenerse cuidado al obtener los valores de σ'_o y c_u en suelos estratificados.

El valor medio de c_u es: $(c_{u(1)} L_1 + c_{u(2)} L_2 + \dots) / L$. El esfuerzo medio efectivo es:

$$\bar{\sigma}'_v = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{L} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde

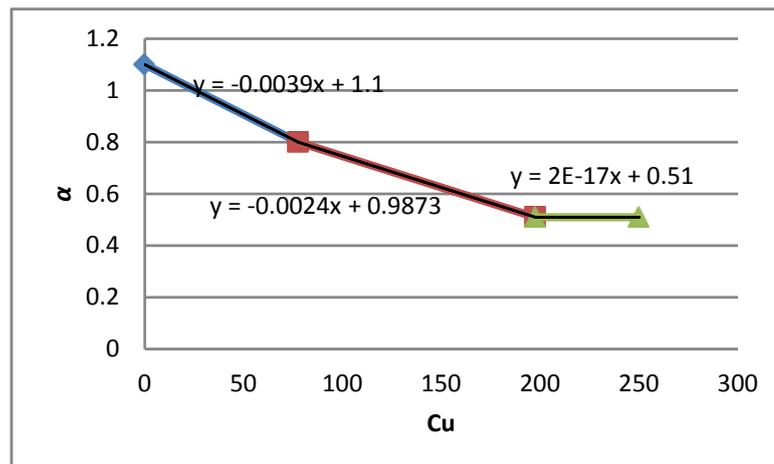
A_1, A_2, A_3, \dots = áreas de los diagramas del esfuerzo vertical efectivo

Método α

$$Q_s = \sum(\alpha c_u p \Delta L) \quad \text{Ec. 22}$$

Donde

- α – Factor empírico de adhesión
- c_u – Cohesión
- p – Perímetro del pilote
- ΔL – Espesor del estrato



Gráfica 2. Variación de α con la cohesión no drenada de una arcilla
Fuente: El Autor

Al igual que el método anterior para determinar el factor α la herramienta dispone de las siguientes expresiones

$$Cu < 77.5 \text{ KPa} \\ \alpha = -0.003Cu + 1.1 \quad \text{Ec. 23}$$

$$77.5 < Cu < 197.5 \text{ KPa} \\ \alpha = -0.002Cu + 0.987 \quad \text{Ec. 24}$$

$$Cu > 197.5 \text{ KPa} \\ \alpha = 0.51 \quad \text{Ec. 25}$$



Suelos combinados

Método de la Normativa española

- Suelos Granulares

La resistencia por fuste en suelos granulares se estimará con la expresión

$$Q_s = \sum(f p \Delta L) \quad \text{Ec. 26}$$

La resistencia por fricción unitaria es

$$f = \sigma'_v K F \tan \phi \quad \text{Ec. 27}$$

Donde

- σ'_v – Presión vertical efectiva al nivel considerado.
- K – Coeficiente de empuje empírico.
- F – Factor de reducción del rozamiento del fuste.
- ϕ – Ángulo de rozamiento interno del suelo granular.

Para pilotes hincados se tomará $K = 0.75$ y para pilotes perforados se tomará $K = 0.5$. Para pilotes híbridos, ejecutados con ayudas que reducen el desplazamiento del terreno, se tomará un valor intermedio en función de los valores antes mencionados.

El valor de f , además, no sobrepasará los siguientes límites:

- Pilotes hincados $f < 125 \text{ KPa}$
- Pilotes excavados $f < 90 \text{ KPa}$

- Suelos Cohesivos

La capacidad de carga por fuste se determina mediante la siguiente expresión

$$Q_s = \sum(f p \Delta L) \quad \text{Ec. 28}$$

La carga unitaria de rotura por fuste será:

$$f = \frac{100s_u}{100+s_u} \quad (f \text{ y } s_u \text{ en KPa}) \quad \text{Ec. 29}$$



La resistencia al corte sin drenaje del suelo, s_u , se puede deducir mediante ensayos de campo y laboratorio.

Se debe tomar en cuenta el tipo de suelo de cada estrato en el momento en que se ingresen los datos geotécnicos.

5.3 CÁLCULO DE: ASENTAMIENTO DEL PILOTE AISLADO.

La presente herramienta de diseño, tiene como finalidad determinar: *asentamientos e pilotes individuales*, considerando la geometría del elemento las características de los materiales que conforman la estructura y las características del suelo en donde se implantará la cimentación.

Los cálculos se basan en la metodología utilizada en la Guía de cimentaciones para obras de carreteras (Normativa Española), Criterios Geotécnicos de las Recomendaciones para Obras Marítimas y Portuarias, Principios de Ingeniería de cimentaciones, Foundation Analysis and Design.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la parte de DISEÑO/Pilotes.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario puede ingresar a la aplicación para proceder a digitar los datos correspondientes al cálculo que necesite, para luego obtener el resultado correspondiente.

A continuación se explica el correcto manejo de cada herramienta así como también las metodologías empleadas en cada proceso que están disponibles en el entorno virtual.

Funcionamiento de la herramienta

- a) En la interfaz el usuario escoge el método a utilizar para el cálculo del asentamiento individual del pilote (Método de Vesic o método de Bowles)
- b) A continuación se introduce los datos como son: *la carga aplicada al elemento, resistencia por fuste, resistencia por punta, dimensiones y características elásticas del pilote, características elásticas del estrato de apoyo (relación de Poisson y*

módulo de elasticidad del suelo), factores que dependen de la resistencia por fricción unitaria, factor de reducción.

c) Si se desea se puede cargar un ejemplo, para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta, mediante el botón *EJEMPLO*.

d) Mediante el botón *CALCULAR* se procesan todos los datos y finalmente se presentan todos los resultados.

e) Si el usuario desea realizar otro ejercicio, la herramienta dispone de un botón con la descripción *LIMPIAR*, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta está diseñada para determinar el asentamiento únicamente de pilotes de concreto armado y de sección circular. Además la metodología de cálculo es aproximada y solo brinda resultados para estudios preliminares. La herramienta trabaja únicamente con unidades del Sistema Internacional ($KN - m$).

Utilización de la herramienta

- Paso 1: activación de opciones

La herramienta dispone de dos opciones para el cálculo del asentamiento: *Método de Vesic* y *Método de Bowles*.

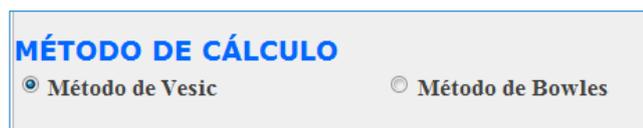
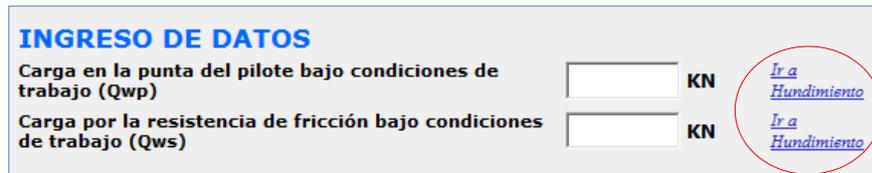


Figura 1. Elección del método de cálculo
Fuente: El Autor

En caso de que el método elegido sea el de Vesic y no se disponga de los valores de carga de punta y de fuste, la herramienta dispone de hyperlinks ("[Ir a Hundimiento](#)") que permiten cargar la herramienta del *Cálculo de la carga de hundimiento de pilotes*, para así obtener los datos que se requieren para el cálculo del asentamiento. (Figura 2).



INGRESO DE DATOS

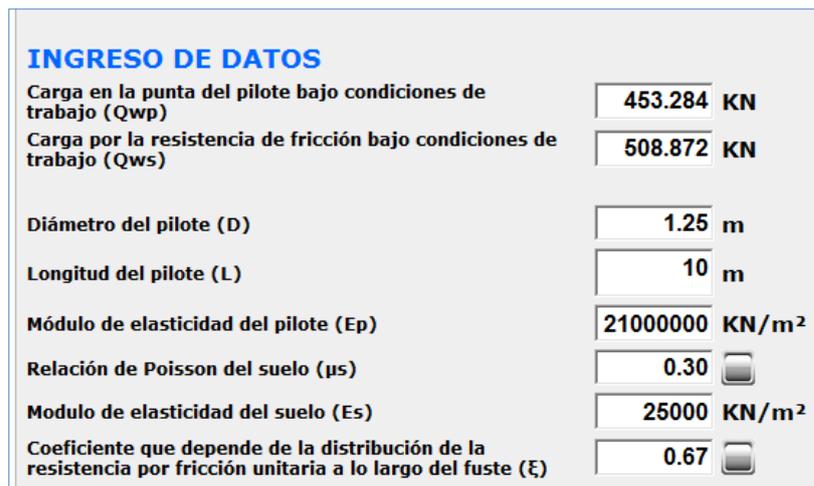
Carga en la punta del pilote bajo condiciones de trabajo (Qwp) KN [Ir a Hundimiento](#)

Carga por la resistencia de fricción bajo condiciones de trabajo (Qws) KN [Ir a Hundimiento](#)

Figura 2. Hyperlink para enlazar a la herramienta de cálculo de la carga hundimiento
Fuente: El Autor

- **Paso 2: Ingreso de datos**

Una vez hecha la selección de la metodología de cálculo, se procede a ingresar los datos estructurales del pilote y los datos geotécnicos del sitio en donde se llevará a cabo la cimentación. Todos los datos se deben ingresar en unidades del sistema internacional (SI). (Figura 3).



INGRESO DE DATOS

Carga en la punta del pilote bajo condiciones de trabajo (Qwp) KN

Carga por la resistencia de fricción bajo condiciones de trabajo (Qws) KN

Diámetro del pilote (D) m

Longitud del pilote (L) m

Módulo de elasticidad del pilote (Ep) KN/m²

Relación de Poisson del suelo (μ_s)

Modulo de elasticidad del suelo (Es) KN/m²

Coefficiente que depende de la distribución de la resistencia por fricción unitaria a lo largo del fuste (ξ)

Figura 3. Ingreso de datos
Fuente: El Autor

- **Paso 3: Ejecución del programa**

La herramienta dispone de un botón con la descripción *EJEMPLO*, que permite cargar un ejemplo, en caso que se desee hacerlo, con todos los datos que se requieren y considerando además los métodos que se aplicarán en el proceso de cálculo.

Se presenta además un botón con la descripción *LIMPIAR* que permite limpiar todos los datos y resultados de la pantalla para poder realizar un nuevo ejemplo.

Ingresados todos los datos tanto estructurales como geotécnicos, se procede a presionar el botón *CALCULAR* el cual permite determinar el valor de asentamiento total.

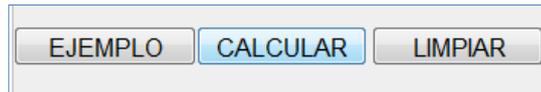
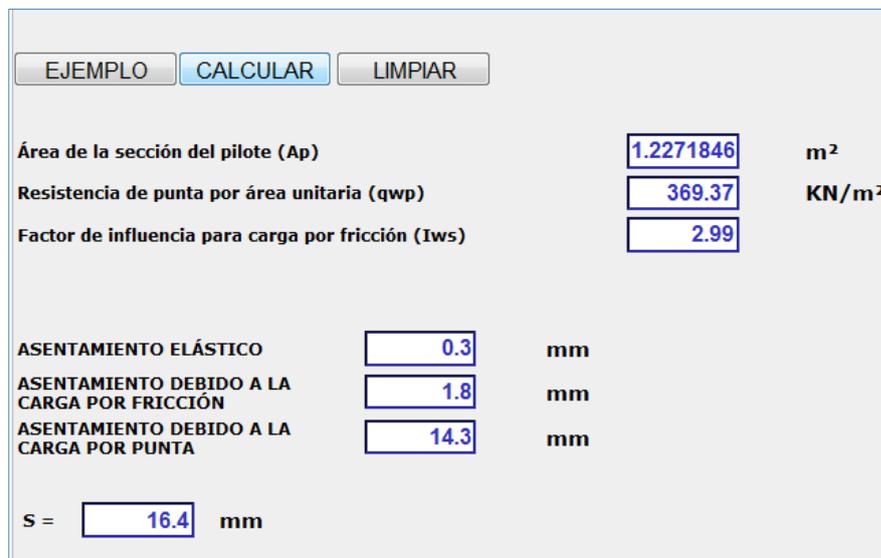


Figura 4. Botones para ejecutar un ejemplo, dar inicio al cálculo, ó limpiar los datos de la pantalla para un nuevo ejemplo
Fuente: El Autor

A continuación aparecerán los resultados del asentamiento del pilote individual.
(Figura 5).



EJEMPLO CALCULAR LIMPIAR		
Área de la sección del pilote (Ap)	1.2271846	m ²
Resistencia de punta por área unitaria (qwp)	369.37	KN/m ²
Factor de influencia para carga por fricción (Iws)	2.99	
ASENTAMIENTO ELÁSTICO	0.3	mm
ASENTAMIENTO DEBIDO A LA CARGA POR FRICCIÓN	1.8	mm
ASENTAMIENTO DEBIDO A LA CARGA POR PUNTA	14.3	mm
S =	16.4	mm

Figura 5. Resultados de asentamiento para el pilote individual
Fuente: El Autor

Descripción de la metodología empleada

- Método de Vesic

El asentamiento de un pilote bajo una carga de trabajo vertical, Q_w , es causado por tres factores:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

- S** – Asentamiento total del pilote
- S₁** – Asentamiento elástico del pilote
- S₂** – Asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote
- S₃** – Asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote

Asentamiento elástico del pilote

Cuando el material del pilote se supone elástico, la deformación del fuste se evalúa usando los principios fundamentales de la mecánica de materiales:

$$S_1 = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L}{A_p E_p} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

- Q_{wp} – Carga en la punta del pilote bajo condición de carga de trabajo
- Q_{ws} – Carga por resistencia de fricción (superficial) bajo condición de carga de trabajo
- A_p – Área de la sección transversal del pilote
- L – Longitud del pilote
- E_p – Módulo de elasticidad del material del pilote
- ξ – Coeficiente que depende de la distribución de la resistencia por fricción

La magnitud de ξ dependerá de la distribución de la resistencia por fricción (superficial) unitaria a lo largo del fuste. (Das, 2001).

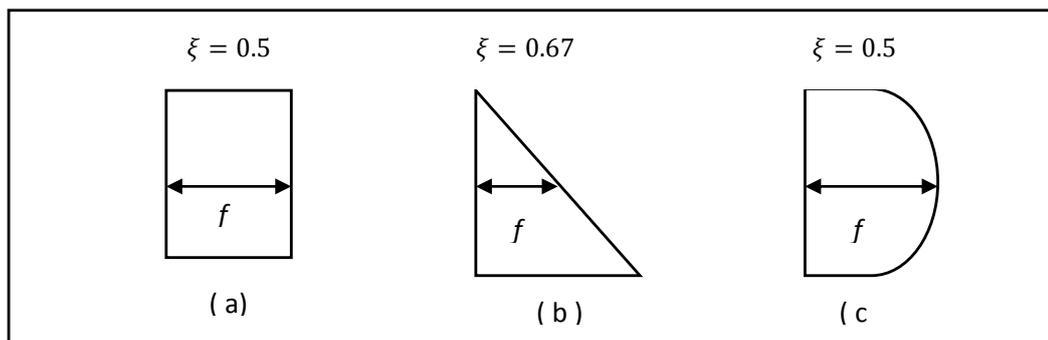


Figura 6. Tipos de distribución de la resistencia por fricción unitaria a lo largo del fuste del pilote

Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja Das, 2001

Asentamiento debido a cargas transmitidas a la punta del pilote

El asentamiento de un pilote causado por la carga en la punta se expresa en forma similar a la de cimentaciones superficiales es decir:

$$S_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

- D – Ancho o diámetro del pilote
- q_{wp} – Carga puntal por área unitaria en la punta del pilote = Q_{wp}/A_p
- E_s – Módulo de elasticidad del suelo en o bajo la punta del pilote
- μ_s – Relación de Poisson del suelo
- I_{wp} – Factor de influencia = 0.85



TIPO DE SUELO	Rango de valores típicos	Coeficiente de Poisson, ν (adimensional)	Estimación de Es a partir de N	
	Módulo de Young, Es (MPa)		Tipo de suelo	Es (MPa)
Arcilla: Blanda sensible Medianamente rígida a rígida Muy rígida	2.4 - 15	0.4 - 0.5 (no drenada)	Limos, limos arenosos, mezclas levemente cohesivas. Arenas limpias finas a medias y arenas levemente limosas. Arenas gruesas y arenas con poca grava. grava arenosa y gravas.	0.4 N1
	15 - 50			0.7 N1
	50 - 100			1.0 N1 1.1 N1
Loes Limo	15 - 60 2 - 20	0.1 - 0.3 0.3 - 0.35	grava arenosa y gravas	1.1 N1
Arena fina: Suelta Medianamente densa Densa	7.5 - 10	0.25	Estimación de Es a partir de Su	
	10 - 20		Arcilla blanda sensible.	400Su - 1000Su
	20 - 25		Arcilla medianamente rígida a rígida.	1500Su - 2400Su
Arena: Suelta Medianamente densa Densa	10 - 25	0.20 - 0.35	Arcilla muy rígida.	3000Su - 4000Su
	25 - 50			
	50 - 75	0.30 - 0.40		
Grava: Suelta Medianamente densa Densa	25 - 75	0.20 - 0.35	Estimación de Es a partir de qc	
	75 - 100		Suelos arenosos.	4 qc
	100 - 200	0.30 - 0.40		

Cuadro 1. Constantes elásticas de diferentes suelos
Fuente: U.S. Department of the Navy (1982) y Bowles (1988)

Asentamiento debido a cargas transmitidas en el fuste del pilote

El asentamiento de un pilote causado por la carga llevada por el fuste se da por la siguiente relación

$$S_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde

- P** – Perímetro del pilote
- L** – Longitud empotrada del pilote
- I_{ws}** – Factor de influencia

El factor de influencia, I_{ws} tiene una relación empírica simple (Braja Das, 2001):

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad \text{Ec. 5}$$

- **Método de Bowles**

El asentamiento del pilote puede estimarse siguiendo el procedimiento que se presenta a continuación:



- a) Calcular la fuerza axial promedio sobre el pilote para cada segmento de longitud ΔL , el área promedio de la sección transversal A_p , y el módulo de elasticidad del pilote E_p , con estos datos se procede a determinar el asiento causado por la fuerza axial aplicada sobre el elemento:

$$S_1 = \frac{P_{av}\Delta L}{A_p E_p} = \Delta H_a \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

- P_{av} – Carga aplicada al pilote
 S_1 – Asentamiento causado por la carga axial aplicada al pilote= ΔH_a
 A_p – Área de la sección transversal del pilote
 E_p – Módulo de elasticidad del pilote
 ΔL – Segmento de longitud del pilote, en este caso $\Delta L = L$

- b) Calcular el asentamiento debido a la carga en la punta del pilote mediante la siguiente ecuación:

$$S_2 = \Delta H_{pt} = \Delta q D \frac{1-\mu^2}{E_s} m I_s I_F F_1 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde

- ΔH_{pt} – Asentamiento debido a la carga en la punta del pilote
 $m I_s$ – Factor de diseño = 1
 I_F – Factor de empotramiento
 $I_F = 0.55$ si $L/D \leq 5$
 $I_F = 0.50$ si $L/D > 5$
 D – Diámetro del pilote
 μ – Relación de Poisson del suelo
 Δq – Presión de apoyo sobre la punta = P_{av}/A_p
 E_s – Módulo de elasticidad del suelo
 F_1 – Factor de reducción
0.25 si la resistencia por fricción axial reduce la carga por punta $P_p \leq 0$
0.50 si la carga por punta $P_p > 0$, predomina la carga por punta
0.75 si predomina la resistencia por fricción



El factor F_1 es usado para explicar que la zona de la punta se desplaza hacia abajo como resultado de la carga actual de punta y el asentamiento causado por la resistencia a fricción a lo largo del fuste que empuja el sistema hacia abajo.

- c) Sumar el asentamiento debido a la carga axial y de punta para obtener el asentamiento total.

$$S = \Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde

$\Delta H_{pt} = S_2$ – Asentamiento debido a la carga en la punta del pilote

$\Delta H_a = S_1$ – Asentamiento causado por la carga axial aplicada al pilote

$\Delta H_p = S$ – Asentamiento total del pilote

5.4 CÁLCULO DE: ASENTAMIENTO DEL GRUPO DE PILOTES.

La presente herramienta de diseño, tiene como finalidad determinar: Asentamientos para el grupo de pilotes, considerando la geometría del elemento las características de los materiales que conforman la estructura y las características del suelo en donde se implantará la cimentación.

Los cálculos se basan en la metodología utilizada en la *Guía de cimentaciones para obras de carreteras (Normativa Española), Criterios Geotécnicos de las Recomendaciones para Obras Marítimas y Portuarias, Principios de Ingeniería de cimentaciones, Foundation Analysis and Design.*

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la parte de DISEÑO/Pilotes.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario puede ingresar a la aplicación para proceder a digitar los datos correspondientes al cálculo que necesite, para luego obtener el resultado correspondiente.

A continuación se explica el correcto manejo de cada herramienta así como también las metodologías empleadas en cada proceso que están disponibles en el entorno virtual.



Funcionamiento de la herramienta

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: la *carga aplicada al elemento, dimensiones del pilote como son diámetro y longitud, características elásticas de los estratos que conforman toda la profundidad de cimentación (relación de Poisson y módulo de elasticidad del suelo), factores para determinar el espaciamiento entre pilotes, asiento de un pilote individual.*
- b) Si se requiere se puede acceder a la herramienta de cálculo de asientos individuales mediante el hyperlink "[Ir a Asentamiento Individual](#)".
- c) Si se desea se puede cargar un ejemplo para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta
- d) Mediante el botón *CALCULAR* se procesan todos los datos y finalmente se presentan todos los resultados.
- e) Si el usuario desea realizar otro ejercicio, la herramienta dispone de un botón con la descripción *LIMPIAR*, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta está diseñada para determinar el asentamiento de grupo de pilotes de concreto armado y de sección circular. El número máximo de estratos a considerarse es de cuatro. La herramienta trabaja únicamente con unidades del Sistema Internacional ($KN - m$).

Utilización de la herramienta

- **Paso 1: Ingreso de datos**

Se procede a ingresar los datos de la parte estructural y las dimensiones de los pilotes, tomando como referencia el grafico que se encuentra en la parte derecha de la interfaz web (*Figura 1*) correspondiente a esta herramienta.

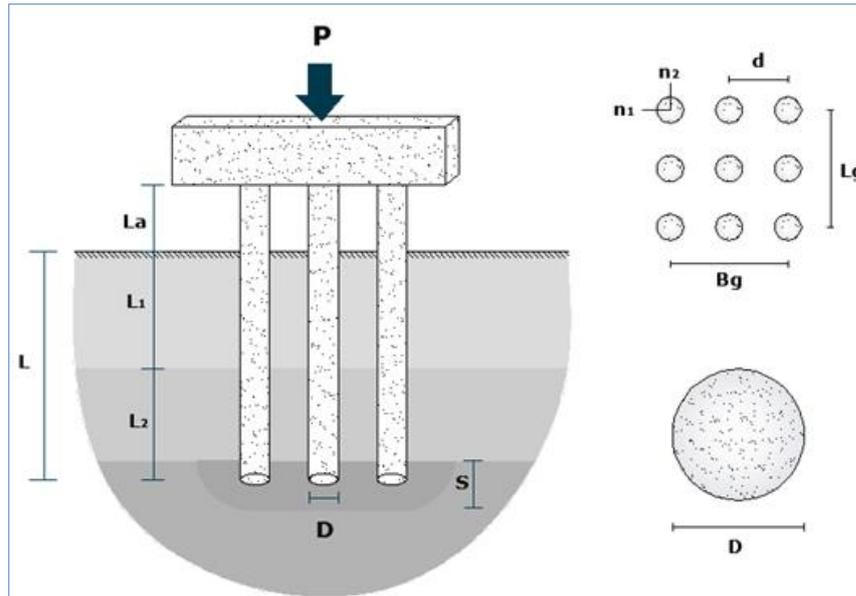


Figura 1. Esquema de asentamiento de un grupo de pilotes
Fuente: El Autor

En la (Figura 2) se muestra la interface de ingreso de datos estructurales.

INGRESO DE DATOS	
Carga axial aplicada al grupo de pilotes (P)	<input type="text" value="3600"/> KN
Diámetro del pilote (D)	<input type="text" value="1.25"/> m
Longitud del los pilotes (L)	<input type="text" value="10"/> m
Número de pilotes por fila (n1)	<input type="text" value="3"/>
Número de pilotes por columna (n2)	<input type="text" value="2"/>
Factor para calcular el espaciamiento entre pilotes [2.5 - 4]	<input type="text" value="3"/>
Asentamiento individual del pilote aislado (So)	<input type="text" value="8.8"/> mm
Ir a Asentamiento Individual	

Figura 2. Ingreso de datos estructurales
Fuente: El Autor

En caso de que el dato del asiento del pilote aislado S_o no se conozca se lo puede determinar presionando sobre el hyperlink "[Ir a Asentamiento Individual](#)" el cual permite tener acceso a la herramienta de asentamiento para pilotes aislados (Figura 3).

Asentamiento individual del pilote aislado (So)	<input type="text"/>	mm
Ir a Asentamiento Individual		

Figura 3. Link de redireccionamiento para el cálculo del asiento individual del pilote
Fuente: El Autor

A continuación se ingresan los datos geotécnicos de los estratos que conforman toda la profundidad de cimentación.

PROPIEDADES DEL SUELO

Numero de Estratos:

	Espesor del estrato Z (m)	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad del Terreno E (KN/m ²)
Estrato 1	<input type="text" value="2.0"/>	<input type="text" value="0.45"/>	<input type="text" value="15000"/>
Estrato 2	<input type="text" value="4.0"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="20000"/>
Estrato 3	<input type="text" value="4.0"/>	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="25000"/>

Figura 4. Ingreso de datos geotécnicos
Fuente: El Autor

Si se desconocen los parámetros geotécnicos de algún estrato, como son *Módulo de elasticidad del suelo* y *Relación de Poisson*, se puede presionar el botón que se presenta en la interfaz de la herramienta (Figura 5), el cual permite desplegar una tabla que contiene valores típicos de dichos parámetros. Dichos valores son recomendados por el *U.S. Department of the Navy (1982)* y *Bowles (1988)*.

Tipo de Suelo	Rango de valores típicos	Coeficiente de Poisson, ν (adimensional)	Estimación de E_s a partir de N	
	Módulo de Young, E_s (MPa)		Tipo de suelo	E_s (MPa)
Arcilla:			Estimación de E_s a partir de N	
Blanda sensible	2,4 - 15	0,4 - 0,5 (no drenada)	Limos, limos arenosos, mezclas levemente cohesivas	$0,4 N_1$
Medianamente rígida a rígida	15 - 50		Arenas limpias finas a medias y arenas levemente limosas	$0,7 N_1$
Muy rígida	50 - 100		Arenas gruesas y arenas con poca grava	$1,0 N_1$
			Grava arenosa y gravas	$1,1 N_1$
Loes	15 - 60	0,1 - 0,3	Grava arenosa y gravas	$1,1 N_1$
Limo	2 - 20	0,3 - 0,35	Estimación de E_s a partir de S_u	
Arena fina:		0,25	Estimación de E_s a partir de S_u	
Suelta	7,5 - 10		Arcilla blanda sensible	$400 S_u - 1000 S_u$ $1500 S_u - 2400 S_u$ $3000 S_u - 4000 S_u$
Medianamente densa	10 - 20			
Densa	20 - 25			
Arena:		0,20 - 0,35	Estimación de E_s a partir de q_c	
Suelta	10 - 25		Suelos arenosos	$4 q_c$
Medianamente densa	25 - 50			
Densa	50 - 75	0,30 - 0,40		
Grava:		0,2 - 0,35	Estimación de E_s a partir de q_c	
Suelta	25 - 75		Suelos arenosos	$4 q_c$
Medianamente densa	75 - 100			
Densa	100 - 200	0,3 - 0,4		

Figura 5. Presentación de valores recomendados de parámetros geotécnicos en la interfaz web de la herramienta
Fuente: El Autor

- Paso 2: ejecución del programa

Al igual que en herramientas anteriores la presente dispone de un botón con la descripción *EJEMPLO*, que permite cargar un ejemplo, en caso que se desee hacerlo. Otro botón con la descripción *LIMPIAR* que permite limpiar todos los datos para poder realizar un nuevo ejemplo y finalmente, se presenta el botón *CALCULAR* el cual permite determinar el valor de asentamiento total de grupo.

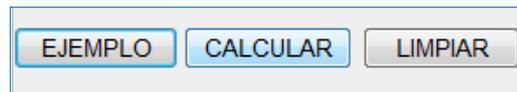


Figura 6. Botón para cargar un ejemplo, para ejecutar el cálculo, o para limpiar los datos
Fuente: El Autor

Finalmente se presentan los resultados tal como se muestra en la (Figura 7).

RESULTADOS:	
Longitud del grupo (L_g)	8.75 m
Base del grupo (B_g)	5 m
Area del pilote (A_p)	1.227 m ²
Distancia centro a centro entre pilotes (d)	3.75 m
Modulo de poisson equivalente (V equiva)	0.385
Módulo de Elasticidad medio equivalente del Terreno (E_m)	17983.096 KN/m ²
Asiento del grupo (S_g)	10.155 mm

Figura 7. Resultados del asentamiento de grupo.
Fuente: El Autor

Descripción de la metodología empleada

El proceso de cálculo es el propuesto por el Ministerio de Fomento de España, la metodología consiste en un modelo elástico que permite obtener un valor de Módulo de elasticidad equivalente para el bloque o grupo, así como también un valor de Coeficiente de Poisson. Este proceso se describe a continuación:

El asiento, S_g , de un grupo de pilotes depende de varios factores, tales como:

- La carga vertical que actúa sobre el grupo.
- Las características geométricas del grupo.
- La deformabilidad general del terreno en la zona de apoyo.

La carga vertical que actúa sobre el grupo, P , puede representarse por el valor que mejor se asimile a la situación de proyecto en cuestión.

El grupo de pilotes puede quedar representado por una malla con un número de filas, n_1 , y un número de columnas, n_2 , en cuyos vértices se ubican los pilotes con diámetro D , longitud L y con separación, d , entre filas y columnas. Entonces el ancho y la longitud del grupo serían:

$$B_g = (n_1 - 1)d + D \quad \text{Ec. 1}$$

$$L_g = (n_2 - 1)d + D \quad \text{Ec. 2}$$

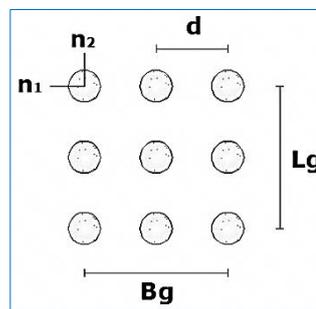


Figura 8. Distribución geométrica del grupo de pilotes
Fuente: El Autor

Se recomienda el uso de las aproximaciones a partir de las cuales se obtiene unos parámetros de modelo elástico del terreno, definido por el valor medio de E y de ν en la zona de interés, que se encuentra por encima de las puntas, hasta una altura igual a un tercio de la longitud enterrada de los pilotes, denominada H_1 . Si los pilotes están empotrados en roca, se considerará únicamente la zona de empotramiento en roca.

El asiento del grupo de pilotes se puede estimar mediante la expresión siguiente

$$S_g = S_o + 0.8 \frac{N_g(1-\nu^2)}{E(B_g+H_1)(L_g+H_1)} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

- S_o – Asiento que tendría un pilote, considerado como pilote aislado
- B_g – Dimensión menor en planta (ancho)
- L_g – Dimensión mayor en planta (largo)
- $N_g = P$ – Carga vertical que actúa sobre el grupo
- E – Módulo de elasticidad medio equivalente.
- ν – Valor medio de la relación de Poisson del suelo en la zona de interés



Esta expresión está indicada para grupos de pilotes con formas no muy alargadas ($Lg \cong Bg$), la relación longitud/anchura del grupo debe ser en todo caso menor o igual que cinco ($Lg / Bg \leq 5$).

El valor del módulo de elasticidad medio equivalente, puede determinarse con la expresión siguiente:

$$E_{equiv} = \frac{\sum \Delta\sigma_i h_i}{\sum \left(\frac{\Delta\sigma_i}{E_i}\right) h_i} \quad Ec. 4$$

Donde

- E** – Módulo de elasticidad medio equivalente.
- E_i** – Módulo de elasticidad del estrato *i*.
- h_i** – Espesor del estrato *i*.
- Δσ_i** – Incremento de la presión vertical total, en el centro del estrato *i*, en la vertical del centro de la cimentación, creado por la carga aplicada sobre la misma.

En general y a efectos de realizar la ponderación que se menciona, se puede utilizar la siguiente expresión para estimar los valores de Δσ_i :

$$\Delta\sigma_i = p (1 - \cos^3 \alpha) \quad Ec. 5$$

Donde

- p** – Presión media transmitida por la cimentación.
- α** – **arctan (a/z)**, expresado en radianes.
- a** – Radio de la cimentación circular equivalente, $a = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$
- A** – Área de apoyo de la cimentación.
- z** – Profundidad del punto en cuestión, bajo el plano de apoyo del cimientto.

Si la cimentación es muy alargada (relaciones $L/B \geq 10$), se puede utilizar la expresión aproximada siguiente:

$$\Delta\sigma = p \frac{2\varepsilon + \text{sen}(2\varepsilon)}{\pi} \quad Ec. 6$$

Donde

- ε** – **arctan (B/2z)**, expresado en radianes.
- B** – Ancho de la zona cargada.



Como módulo de Poisson equivalente se toma el valor de la media ponderada, utilizando como pesos de ponderación los mismos valores $\Delta\sigma_i$ antes indicados. Es decir:

$$v_{equiv} = \frac{\sum v_i h_i \Delta\sigma_i}{\sum h_i \Delta\sigma_i} \quad Ec. 7$$

Donde

v – Relación de Poisson del suelo

5.5 DISEÑO SÍSMICO DE PILOTES: MÉTODO DDBD

La presente herramienta permite determinar el cortante y momento, para un pilote, utilizando el método basado en desplazamientos y los resultados de un modelo equivalente. Y además permite determinar el diámetro de la varilla para refuerzo longitudinal y transversal del pilote.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la parte de DISEÑO/Pilotes.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario puede ingresar a la aplicación para proceder a digitar los datos correspondientes al cálculo que necesite, para luego obtener el resultado correspondiente.

A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en cada proceso que están disponibles en el entorno virtual.

Funcionamiento de la herramienta

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *el diámetro del pilote, longitud libre del pilote, la longitud enterrada del pilote, número de varillas del refuerzo principal, espaciamiento del refuerzo transversal, recubrimiento al eje de la varilla longitudinal, resistencia del acero, deformación unitaria del acero, la resistencia a la compresión del concreto, el peso específico del hormigón.*
- b) Se debe escoger el *tipo de suelo* sobre el cual se va a cimentar, se ingresa además la característica física (*cohesión - ángulo de fricción*) correspondiente al tipo de suelo seleccionado.



- c) Se debe elegir si se va a *ingresar* un valor de *ductilidad de desplazamiento*, o si se va a *calcular* a partir de los datos ingresados; en este caso aparecerá un cuadro en el cual se ingresará el *diámetro sugerido de las varillas longitudinales*, y también se escogerá el *nivel de servicio (Serviciabilidad – Control de Daño)* para el cual se desee realizar el diseño.
- d) Se ingresa el valor de la *carga aplicada* al elemento, y finalmente se ingresan los datos de demanda sísmica: *seudo-aceleración espectral*, *periodo de esquina*, y el *máximo desplazamiento espectral*.
- e) La herramienta permite cargar un ejemplo, para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta, mediante el botón *EJEMPLO*.
- f) Se procede a presionar el botón *CALCULAR*, para procesar todos los datos y a continuación se presentan los resultados.
- g) Se presentan resultados para el modelo equivalente, resultados de diseño, y resultados de refuerzo longitudinal y transversal.
- h) Si el usuario desea realizar otro ejercicio, la herramienta dispone de un botón con la descripción *LIMPIAR*, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite realizar el diseño sísmico, únicamente para pilotes de concreto de sección circular. La herramienta trabaja únicamente con unidades del Sistema Internacional ($KN - m$).

Se considera un solo tipo de suelo (Arena – Arcilla), y en caso de que exista un suelo combinado se debe ingresar los datos del tipo de suelo predominante.

Utilización de la herramienta

- Paso 1. Ingreso de datos:

Se procede a ingresar los datos estructurales del pilote, los datos geotécnicos del sitio en donde se llevará a cabo la cimentación, los datos de demanda sísmica y axial. Todos los datos se deben ingresar en unidades del sistema internacional

(S). Para ingresar los datos referidos a la geometría del elemento, se recomienda observar el esquema de cimentación que se presenta a la derecha de la zona de ingreso de datos estructurales (Figura 1).

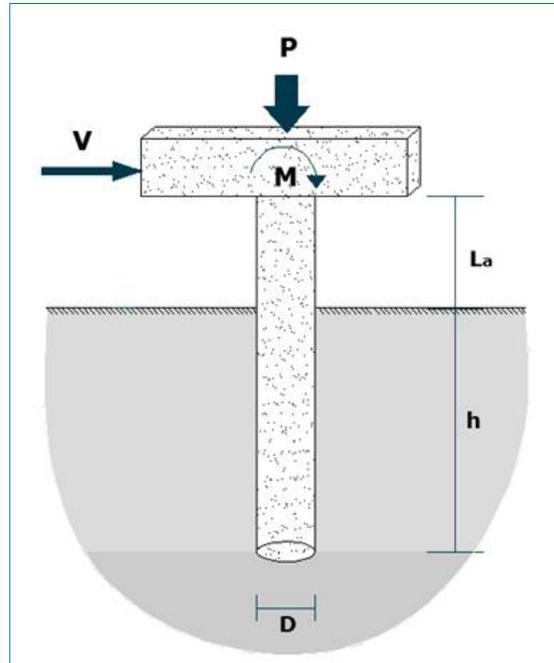


Figura 1. Esquema gráfico para el diseño sísmico de pilotes.
Fuente: El Autor

Esta herramienta de diseño parte ingresando datos generales como es la geometría de la pila, teniendo en cuenta que la pila se desarrolla desde el tope hasta la base del pilote, además estos parámetros sirven para calcular el cortante y momento de diseño.

GEOMETRÍA DE LA PILA	
Diámetro de la pila, D	<input type="text" value="800"/> mm
Longitud, L_a	<input type="text" value="5"/> m
Longitud, h	<input type="text" value="15"/> m

Figura 2. Ingreso de datos geométricos.
Fuente: El Autor

A continuación se procede a ingresar los datos pertenecientes a la sección del elemento y a las características de los materiales de los cuales está constituido.

PROPIEDADES DE LA SECCIÓN	
# de varillas del refuerzo principal	<input type="text" value="12"/>
Espaciamiento del refuerzo transversal	<input type="text" value="150"/> mm
Recubrimiento al centro de la varilla principal	<input type="text" value="50"/> mm
Resistencia del hormigón a compresión, f'_c	<input type="text" value="35"/> MPa
Peso específico del hormigón, γ_h	<input type="text" value="24"/> kN/m ³
Resistencia del acero longitudinal, f_y	<input type="text" value="420"/> MPa

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS		
Tipo de suelo	Cohesión	<input type="text" value="40"/> kN/m ²
<input type="text" value="Arcilla"/>	Angulo de fricción	<input type="text" value="0"/>

Figura 3. Datos estructurales y geotécnicos.
Fuente: El Autor

Como punto de partida se asume un armado y por ende una cierta rigidez inicial. Además las propiedades de los materiales son datos muy conocidos para el usuario y sus valores varían poco.

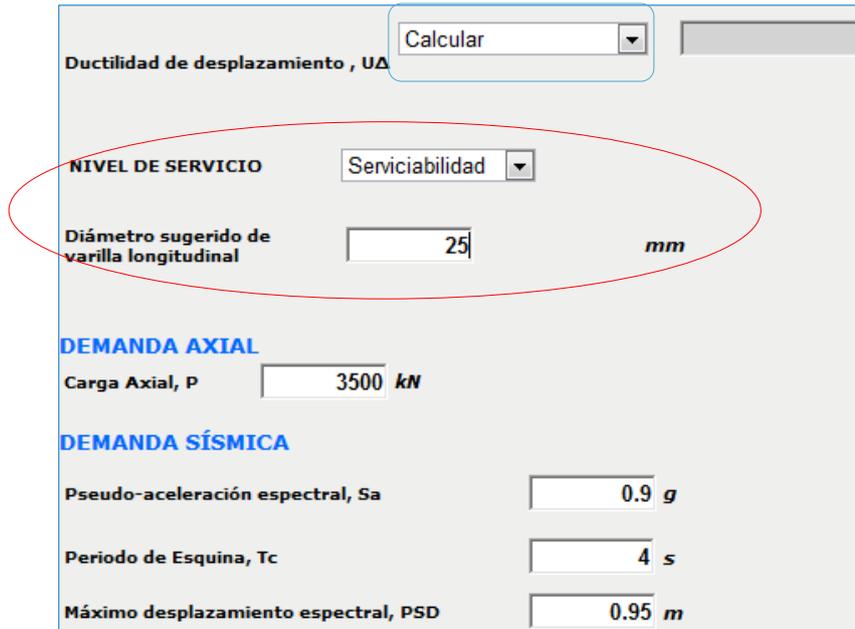
- Resistencia del hormigón a compresión, $f'_c = 28000 \text{ MPa}$
- Peso específico del hormigón, $\gamma_h = 24 \text{ kN/m}^3$
- Resistencia del acero, $f_y = 420 \text{ MPa}$
- Deformación unitaria del acero, $\epsilon = 0.002$

La carga axial, es la demanda que va a tener a compresión el hormigón, aplicada en la parte superior del pilote, proveniente de cargas para lo cual va a ser utilizado el pilote, por ejemplo un puente.

El valor de pseudo-aceleración espectral se obtiene de un espectro de aceleraciones, zona sísmica y tipo de suelo.

- **Paso 2. Selección de opciones:**

En caso de que se seleccione la opción *ingresar* un valor de *ductilidad de desplazamiento*, los datos marcados en la (Figura 4) se desactivarán, por lo tanto no aparecerán en la interface de la herramienta. (Figura 5).



Ductilidad de desplazamiento, μ_{Δ}

NIVEL DE SERVICIO

Diámetro sugerido de varilla longitudinal mm

DEMANDA AXIAL

Carga Axial, P kN

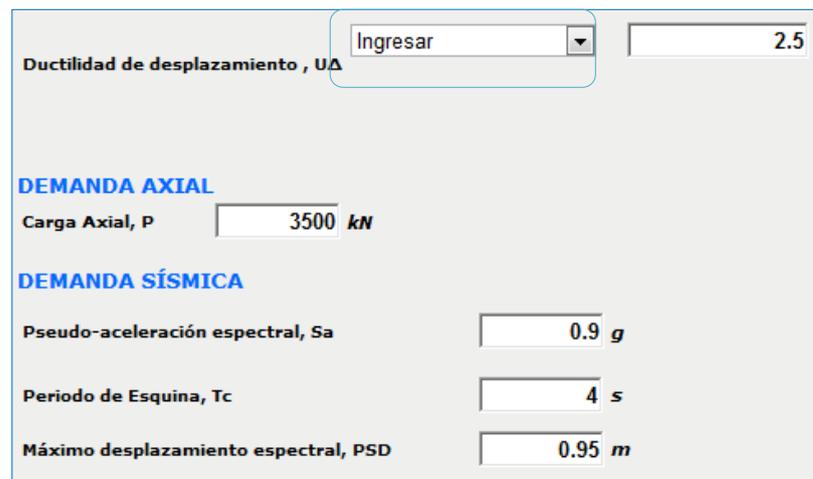
DEMANDA SÍSMICA

Pseudo-aceleración espectral, S_a g

Periodo de Esquina, T_c s

Máximo desplazamiento espectral, PSD m

Figura 4. Selección de opción “Calcular” para ductilidad de desplazamiento, nivel de servicio y diámetro de refuerzo longitudinal activados.
Fuente: El autor



Ductilidad de desplazamiento, μ_{Δ}

DEMANDA AXIAL

Carga Axial, P kN

DEMANDA SÍSMICA

Pseudo-aceleración espectral, S_a g

Periodo de Esquina, T_c s

Máximo desplazamiento espectral, PSD m

Figura 5. Selección de opción “Ingresar” para ductilidad de desplazamiento, nivel de servicio y diámetro de refuerzo longitudinal desactivados.
Fuente: El Autor

Si se selecciona la opción calcular la ductilidad de desplazamiento, dichos datos se activarán y su ingreso será requerido.

La metodología del *DDBD*, parte de ciertos parámetros, tales como la Ductilidad de desplazamiento (*Ingresar - Calcular*), μ_{Δ} . Esta variable tiene que ver con el desempeño, es decir si queremos que el desempeño este en función del desplazamiento objetivo o de una curvatura limite en la sección.

La selección del nivel de servicio únicamente es necesaria en caso de que se desee calcular la ductilidad de desplazamiento. De acuerdo al nivel de servicio seleccionado (*Serviciabilidad – Control de daño*), la herramienta determina parámetros necesarios para el proceso de cálculo. Estos se describirán en la descripción metodológica de la presente herramienta.

- **Paso 3. Ejecución del programa:**

La herramienta dispone de un botón con la descripción *EJEMPLO*, que permite cargar un ejemplo, en caso que se desee hacerlo, con todos los datos que se requieren y considerando además algunas opciones para el diseño sísmico mediante *DDBD*, lo que permitirá demostrar el correcto funcionamiento de la herramienta.

Se presenta además un botón con la descripción *LIMPIAR* que permite limpiar todos los datos y resultados de la pantalla para poder realizar un nuevo ejemplo.

Cuando se ha ingresado todos los datos y seleccionado las opciones deseadas, se presiona el botón *DISEÑAR*, el cual se encuentra en la parte inferior de los últimos datos ingresados. (*Figura 6*).

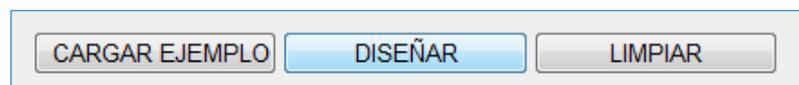


Figura 6. Botones para dar inicio al cálculo, ejecutar un ejemplo ó limpiar los datos de la pantalla para un nuevo ejemplo
Fuente: El Autor

- **Paso 4. Presentación de resultados:**

Una vez terminado el proceso de cálculo la interface de la herramienta presenta los siguientes resultados:

Para el modelo equivalente, que es con el que trabaja la metodología empleada, se determina la longitud de empotramiento, el desplazamiento de fluencia y además un coeficiente para el cálculo del momento.

Como resultados del diseño se presentan la ductilidad de desplazamiento, desplazamiento de diseño, amortiguamiento histerético y viscoso equivalente, periodo efectivo, rigidez equivalente, cortante, momento y además se presenta el porcentaje de efectos $P - \Delta$ correspondientes al momento de diseño, acompañados por un mensaje de información que nos indica que el diseño

cumple satisfactoriamente los requerimientos del efecto $P - \Delta$, o si se necesita realizar un nuevo diseño utilizando un valor de ductilidad menor. (Figura 7 y 8).

RESULTADOS DEL MODELO EQUIVALENTE	
Longitud de empotramiento, L_f	7.518 m
Desplazamiento de fluencia, Δy	0.11 m
Coefficiente para cálculo de momento, β_2	0.4

Figura 7. Presentación de resultados del modelo equivalente
Fuente El Autor

RESULTADOS DE DISEÑO	
Ductilidad de desplazamiento, $U\Delta$	2.5
Desplazamiento de diseño, $\Delta_d = U\Delta * \Delta y$	0.275 m
Amortiguamiento equivalente, ξ_h	10.82 %
Amortiguamiento equivalente, ξ_{eq}	14.356 %
Periodo efectivo, T_{eff}	1.769 m/s
Rigidez equivalente, K_{eff}	7960.548 kN/m
Cortante de diseño, V	2188.411 kN
Momento de diseño, M	9706.96 kN.m
Efectos P-Delta	9.912 %
CUMPLE EFECTOS P-D	

Figura 8. Presentación de resultados del diseño
Fuente: El Autor

Además se presentan los resultados de refuerzo longitudinal y transversal, determinados en base a diagramas Momento – Curvatura ($M - C$). (Figura 9).

REFUERZO LONGITUDINAL	
Diámetro de las varillas longitudinales	79 mm
REFUERZO TRANSVERSAL	
Diámetro de estribos	10 mm

Figura 9. Presentación de resultados del diseño para refuerzo
Fuente: El Autor

Descripción de la metodología empleada

La herramienta “Diseño Sísmico de Pilotes: Método de Desplazamientos” sigue la metodología DDBD, con la cual se diseña a la estructura para que su capacidad de deformarse sea mayor o igual a la demandada por una acción sísmica, que puede expresarse en términos de desplazamiento objetivo o meta. Para tener en cuenta la interacción suelo estructura se emplea un modelo equivalente en el que,

al sistema normal se lo reemplaza por una columna de longitud efectiva equivalente (L_e).

Este método considera también el amortiguamiento viscoso equivalente, lo que permite calcular los momentos en forma más precisa. Además la metodología *DDBD* modela al sistema pila-suelo con una longitud de empotramiento que se encuentra en el punto de máximo momento.

Modelo Equivalente

La herramienta permite reemplazar a los pilotes pre-barrenados, con cabeza empotrada, por un sistema equivalente, de longitud L_e que esta empotrado en su base y soportado por rodillos en su cabeza, restringiendo su rotación. Además el punto de empotramiento coincide con el de máximo momento en el sistema suelo-pilote.

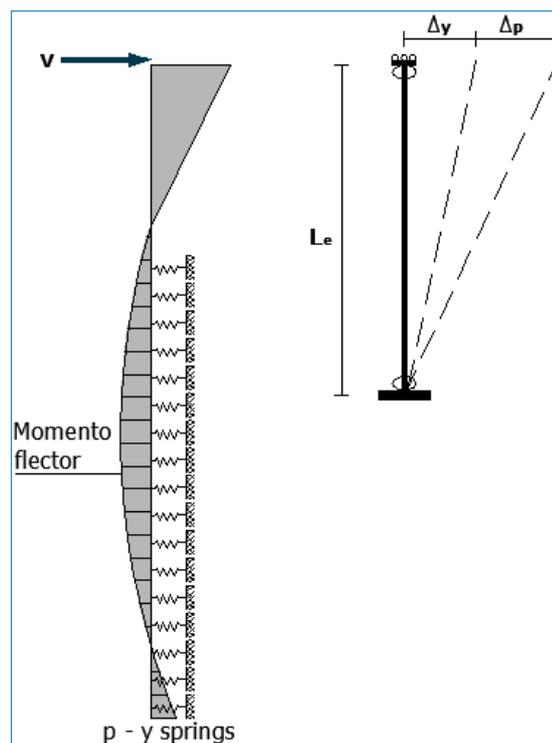


Figura 10. Modelo equivalente para un pilote con cabeza empotrada
Fuente: El Autor

Los parámetros necesarios para desarrollar este proceso se determinan utilizando las siguientes consideraciones:

La curvatura de fluencia resulta de la ecuación (Priestley, 1996).

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_y}{D}$$

Ec. 1



Donde

- ϵ_y – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002
 D – Diámetro del pilote.

Donde ϵ_y es la deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002, y D es diámetro del pilote. El desplazamiento de fluencia del sistema equivalente es calculado con la siguiente ecuación,

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_e^2}{6} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

- ϕ_y – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002
 L_e – Longitud de empotramiento.
 α – Coeficiente de amplificación de desplazamiento

α es un coeficiente que amplifica el desplazamiento de fluencia de la columna equivalente y considera además la rotación elástica que existe bajo el punto de máximo momento y la mayor área del diagrama de curvatura en el sistema no lineal suelo-pilote (Suárez, 2005). Valores aproximados de α y de L_e se estiman de acuerdo al (Cuadro 1).

Tipo de suelo	Coeficiente de amplificación	Longitud efectiva L_e
Arcilla $S_u = 20$ KPa	$\alpha = 2.84 - 0.38 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 6.38D + 0.69La$
Arcilla $S_u = 40$ KPa	$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 4.96D + 0.71La$
Arena $\phi = 30^\circ$	$\alpha = 1.88 - 0.16 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 4.39D + 0.82La$
Arena $\phi = 37^\circ$	$\alpha = 1.86 - 0.18 \ln \frac{La}{D}$	$L_e = 3.40D + 0.84La$

Cuadro 1. Valores de α y L_e para pilas en arenas y arcillas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005



Desplazamientos más allá de este punto resultan de una combinación de desplazamiento elástico y plástico proveniente de la rótula plástica en la cabeza del pilote.

El desplazamiento plástico después de que la rótula de la cabeza se formó puede ser estimado como el producto de la rotación plástica en la rótula y una fracción de la longitud equivalente L_e .

$$\Delta_p = \phi_p L_p \beta L_e \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

- ϕ_p – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002
- L_p – Longitud de la rótula plástica.
- L_e – Longitud de empotramiento.
- β – El método sugiere $\beta = 1.68$ para pilotes en arena y $\beta = 1.54$ en arcilla.

La longitud de la rótula plástica L_p en la cabeza del pilote puede ser calculada con la siguiente ecuación (Priestley 1996).

$$L_p = 0.008 L_i + 0.022 f_y d_{bl} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde

- L_i – Distancia desde la rótula plástica al punto de inflexión
- f_y – Resistencia del acero en MPa
- d_{bl} – Diámetro de varilla longitudinal en metros

Valores aproximados de L_i se presentan en el (Cuadro 2).

L_i	$0.59 L_e$	Arcillas
L_i	$0.52 L_e$	Arenas

Cuadro 2. Valores de L_i

Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

Ductilidad de Desplazamiento

La aplicación de *DDBD* requiere el cálculo de la ductilidad de desplazamiento, entonces, dado el desempeño en términos de una curvatura límite para la sección, μ_A es obtenida a partir de la siguiente expresión.



$$\mu_{\Delta} = 1 + \frac{(\phi_{CD} - \phi_y) \beta L_p L_e}{\Delta_y} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde

- ϕ_{CD} – Curvatura de control de daño
- ϕ_y – Curvatura de fluencia
- L_p – Longitud de la rótula plástica.
- L_e – Longitud efectiva.

La curvatura de control de daño ϕ_{CD} resulta de la relación entre la deformación unitaria del estado límite especificado en el objetivo de diseño, y la distancia al eje neutro c de la sección del pilote.

$$\phi_{CD} = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

- ε_c – Deformación del concreto para nivel servicio requerido. Cuadro 4
- c – Distancia al eje neutro de la sección del pilote

La distancia al eje neutro se determina mediante la siguiente expresión:

$$c = 0.2D \left(1 + 3.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde

- P – Carga axial que soporta el elemento
- D – Diámetro del pilote
- A_g – Área gruesa de la sección

Amortiguamiento Viscoso Equivalente

Durante los sismos, los pilotes pre-barrenadas disipan energía a través de la deformación inelástica en el suelo y del desarrollo de rótulas plásticas en los pilotes. *DDBD* usa el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente para modelar la energía disipada en la estructura.

El amortiguamiento viscoso ξ_v puede ser combinado con el amortiguamiento histórico $\xi_{eq,h}$ para conseguir un valor de diseño de amortiguamiento viscoso equivalente ξ_{eq} (Suárez, 2005).



$$\xi_{eq} = \xi_v \mu_{\Delta}^{-0.378} + \xi_h \quad \mu \geq 1 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde

- ξ_v – Amortiguamiento viscoso
- μ_{Δ} – Ductilidad de desplazamiento
- $\xi_{eq,h}$ – Amortiguamiento histerético

El amortiguamiento histerético $\xi_{eq,h}$ se determina como una función de la ductilidad en el pilote pre barrenado.

$$\xi_{eq,h} = p + q \frac{\mu_{\Delta} - 1}{\mu_{\Delta}} \quad \mu \geq 1 \quad \text{Ec. 9}$$

Donde

- μ_{Δ} – Ductilidad de desplazamiento
- p y q – Parámetros para modelos de amortiguamiento histerético

Los valores de p y q pueden ser tomados del Cuadro 3.

Cabeza	Suelo	p	q
Empotrada	Arcilla-20	6.7	8.1
Empotrada	Arcilla-40	5.6	8.7
Empotrada	Arena-30	2.4	10.2
Empotrada	Arena-37	2	9.6

Cuadro 3. Parámetros para modelos de amortiguamiento histerético en sistemas de pilotes prebarrenados

Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

Estados Límite de Diseño

Según *Kowalsky* (2000), estos límites son dos: *Serviciabilidad* y de *Control de Daño*. El estado límite de *Serviciabilidad* indica que no se requiere de reparación alguna después de la acción del sismo, mientras que el de *Control de Daño* requiere de reparación después del sismo, siendo esta reparación económica, estos estados límites se basan en los límites de deformación del concreto y del acero (*Cuadro 4*).

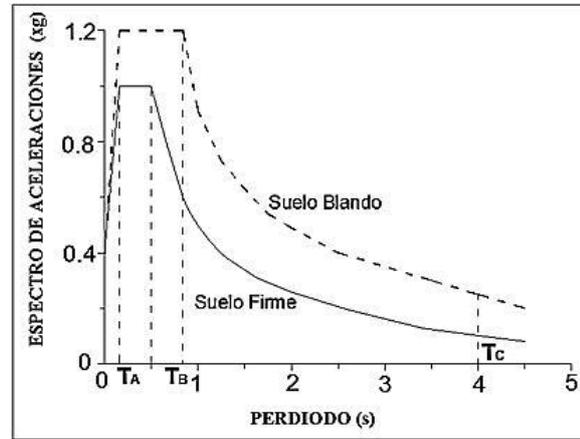
ESTADO LIMITE DE DISEÑO	ϵ_c (Concreto)	ϵ_s (Acero)
SERVICIABILIDAD (SC)	0.004	0.015
CONTROL DE DANO (CD)	0.018	0.06

Cuadro 4. Estado límite de serviciabilidad

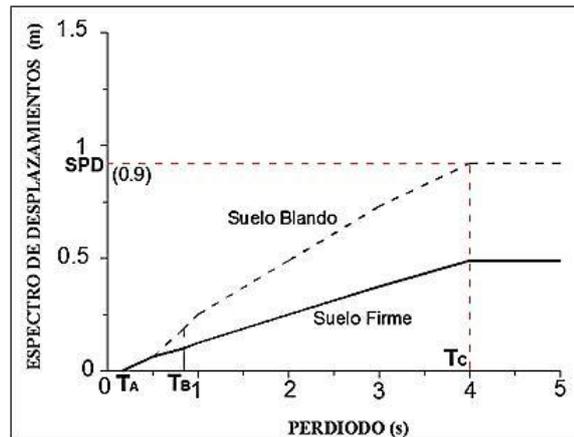
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

Demanda Sísmica

La Demanda sísmica es dada por un espectro de diseño caracterizado como categoría SDC_D (AASHTO Guide Specifications for *LRFD* Seismic Bridge Design 2009).



(a) Espectro de aceleraciones



(b) Espectro de desplazamientos

Gráfica 10. Espectro de aceleraciones y Espectro de desplazamientos
Fuente: El Autor

Los parámetros necesarios para el funcionamiento de la herramienta son el periodo de esquina (T_c), la pseudo-aceleración espectral (S_a), y el máximo desplazamiento espectral (PSD).

Resultados del Diseño

Considerando estos parámetros se procede a determinar el factor de reducción espectral (R_ξ)

$$R_\xi = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi_{eq}}}$$

Ec. 10



Donde

ξ_{eq} – Amortiguamiento viscoso equivalente

A continuación se determina el periodo efectivo (T_{eff}) en segundos

$$T_{eff} = \frac{T_c \Delta_D}{(PSD)(R_\xi)} \quad Ec. 11$$

Donde

T_c – Periodo de esquina

Δ_D – Desplazamiento de diseño

R_ξ – Factor de reducción espectral

PSD – Máximo desplazamiento espectral

Seguidamente se procede a determinar la rigidez secante

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 m_{eff}}{T_{eff}^2} \quad Ec. 12$$

Donde

T_{eff} – Periodo efectivo

m_{eff} – Masa efectiva

La masa efectiva se determina utilizando la siguiente expresión

$$m_{eff} = \frac{P}{g} \quad Ec. 13$$

Donde

P – Carga axial aplicada al elemento

g – Aceleración de la gravedad

Una vez que se ha obtenido la rigidez del sistema equivalente y el desplazamiento de diseño, se procede a determinar el cortante total (V_T) mediante la siguiente expresión

$$V_T = K_{eff} \Delta_D \quad Ec. 14$$

Donde

K_{eff} – Rigidez equivalente

Δ_D – Desplazamiento de diseño

A continuación se determina el momento de diseño (M) de acuerdo a la siguiente expresión

$$M_T = V_T L_i \quad Ec. 15$$



Donde

V_T – Cortante total

L_i – Distancia desde la rótula plástica al punto de inflexión

Se verifica que el momento $P - \Delta$ generado en el nivel de desplazamiento máximo, equivale o es menor a un 20% de la capacidad de momento requerida para la sección.

$$P - \Delta = \frac{P \times \Delta_D}{M} * 100 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde

M – Momento de diseño

En caso de que la verificación no sea satisfactoria se debe ingresar un nuevo valor de ductilidad de desplazamiento y realizar un nuevo diseño.

Finalmente, en el diseño directo basado en desplazamientos el refuerzo a flexión es diseñado, usando un análisis momento curvatura, que proporciona la resistencia requerida para un nivel de curvatura, compatible con la demanda de ductilidad del elemento, para lo cual la herramienta se enlaza a una aplicación existente en el LVIG. Se determina el refuerzo longitudinal y transversal para el pilote, el cual está dentro de la cuantía (1- 4) %.

5.6 DISEÑO SÍSMICO DE PILOTES: MÉTODO LRFD

La presente herramienta permite determinar el cortante y momento para un pilote, utilizando el método de fuerzas y basado en los resultados de un modelo equivalente. También permite determinar el diámetro de la varilla para refuerzo longitudinal y transversal del pilote mediante un análisis momento curvatura de la sección.

Para poder hacer uso de esta herramienta se deberá ingresar gratuitamente como usuario registrado del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Geotécnica”, vía on-line a través de la dirección www.utpl.edu.ec/vleg, en la parte de DISEÑO/Pilotes.

Todo el entorno trabaja en forma dinámica, en donde el usuario puede ingresar a la aplicación para proceder a digitar los datos correspondientes al cálculo que necesite, para luego obtener el resultado correspondiente.



A continuación se explica el correcto manejo de la herramienta así como también las metodologías empleadas en cada proceso que están disponibles en el entorno virtual.

Funcionamiento de la herramienta

- a) En la interfaz de la herramienta el usuario ingresa los datos, como son: *el diámetro del pilote, longitud libre del pilote, la longitud enterrada del pilote, número de varillas del refuerzo principal, espaciamiento del refuerzo transversal, recubrimiento al eje de la varilla longitudinal, resistencia del acero, deformación unitaria del acero, la resistencia a la compresión del concreto, el peso específico del hormigón.*
- b) Se debe escoger el tipo de suelo sobre el cual se va a cimentar, se ingresa además la característica física (cohesión - ángulo de fricción) correspondiente al tipo de suelo seleccionado, y el valor de módulo de elasticidad del suelo. Valores sugeridos se muestran en la interface de la herramienta al presionar el botón que se encuentra junto a la variable a ingresar.
- c) Se ingresa el valor de la carga aplicada al elemento, y finalmente se ingresan los datos de demanda sísmica: pseudo-aceleración espectral, y el factor de reducción, cuyo valor recomendado por la normativa *AASHTO LRFD* varía de 2 a 4.
- d) La herramienta permite cargar un ejemplo, para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta, mediante el botón *EJEMPLO*.
- e) Se procede a presionar el botón *CALCULAR*, para procesar todos los datos y a continuación se presentan los resultados.
- f) Se presentan resultados para el modelo equivalente, resultados de diseño, y resultados de refuerzo longitudinal y transversal.
- g) Si el usuario desea realizar otro ejercicio, la herramienta dispone de un botón con la descripción *LIMPIAR*, que permite recargar la página para poder ingresar los nuevos datos.

Limitaciones de la herramienta

La presente herramienta permite realizar el diseño sísmico, únicamente para pilotes de concreto de sección circular. La herramienta trabaja únicamente con unidades del Sistema Internacional ($KN - m$).

Se considera un solo tipo de suelo (Arena - Arcilla), y en caso de que exista un suelo combinado se debe ingresar los datos del tipo de suelo predominante.

Utilización de la herramienta

- Paso 1. Ingreso de datos:

Se procede a ingresar los datos estructurales del pilote, los datos geotécnicos del sitio en donde se llevará a cabo la cimentación, los datos de demanda sísmica y axial. Para ingresar los datos referidos a la geometría del elemento, se recomienda observar el esquema de cimentación que se presenta a la derecha de la zona de ingreso de datos estructurales (*Figura 1*)

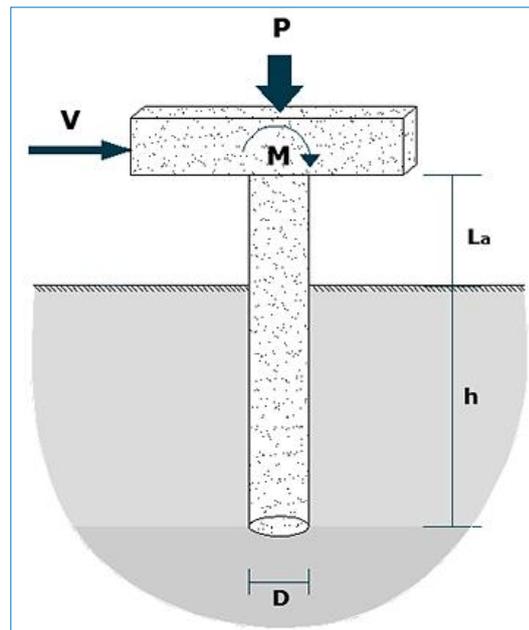


Figura 1. Esquema gráfico para el diseño sísmico de pilotes.
Fuente: El Autor

Esta herramienta de diseño parte ingresando datos generales como es la geometría de la pila, teniendo en cuenta que la pila se desarrolla desde el tope hasta la base del pilote, además estos parámetros sirven para calcular el cortante y Momento de diseño.

GEOMETRÍA DE LA PILA	
Diámetro de la pila, D	800 mm
Longitud, La	5 m
Longitud, h	15 m

Figura 2. Ingreso de datos geométricos.
Fuente: El autor

Como punto de partida se asume un armado y por ende una cierta rigidez inicial. Además las propiedades de los materiales son datos muy conocidos para el usuario y sus valores varían poco.

- Resistencia del hormigón a compresión, $f'_c = 28000 \text{ MPa}$
- Peso específico del hormigón, $\gamma_h = 24 \text{ KN/m}^3$
- Resistencia del acero, $f_y = 420 \text{ MPa}$
- Deformación unitaria del acero, $\epsilon = 0.002$

PROPIEDADES DE LA SECCIÓN	
# de varillas del refuerzo principal	12
Espaciamiento del refuerzo transversal	150 mm
Recubrimiento al centro de la varilla principal	50 mm
Resistencia del hormigón a compresión, f'_c	35 MPa
Peso específico del hormigón, γ_h	24 KN/m^3
Resistencia del acero longitudinal, f_y	420 MPa

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS	
Tipo de suelo	Arcilla
Cohesión	40 KN/m^2
<input checked="" type="checkbox"/> Es	2673.53 KN/m^2
Angulo de fricción	°
<input type="checkbox"/> nh	KPa/m

Figura 3. Datos estructurales y geotécnicos.
Fuente: El Autor

Los botones marcados en la (Figura 3) presentan valores recomendados, por Y. Chen, para las variables a ingresar.

La carga axial, es la demanda que va a tener a compresión el hormigón, aplicada en la parte superior del pilote, proveniente de cargas para lo cual va a ser utilizado el pilote, por ejemplo un puente.

DEMANDA AXIAL	
Carga Axial, P	<input type="text" value="3500"/> kN
DEMANDA SÍSMICA	
Pseudo-aceleración espectral, Sa	<input type="text" value="0.9"/>
Factor de reducción, R [2 -4]	<input type="text" value="3"/>

Figura 4. Datos de demanda axial y sísmica.
Fuente: El Autor

El valor de pseudo-aceleración espectral se obtiene de un espectro de aceleraciones, zona sísmica y tipo de suelo. El factor de reducción varía de acuerdo a la importancia de la obra, para pilotes pre-barrenados *AASHTO LRFD 2004* recomienda valores dentro del rango de 2 a 4.

- **Paso 2. Ejecución del programa:**

La herramienta dispone de un botón con la descripción *EJEMPLO*, que permite cargar un ejemplo, en caso que se desee hacerlo, con todos los datos que se requieren y considerando además el tipo de suelo y sus parámetros físicos, para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta.

Se presenta además un botón con la descripción *LIMPIAR* que permite limpiar todos los datos y resultados de la pantalla para poder realizar un nuevo ejemplo.

Cuando se ha ingresado todos los datos y seleccionado las opciones deseadas, se presiona el botón *DISEÑAR*, el cual se encuentra en la parte inferior de los últimos datos ingresados. (Figura 5).

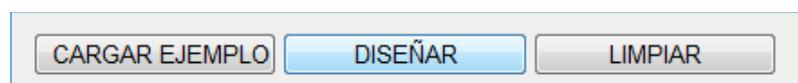


Figura 5. Botones para dar inicio al cálculo, ejecutar un ejemplo ó limpiar los datos de la pantalla para un nuevo ejemplo
Fuente: El Autor

- **Paso 3. Presentación de resultados:**

Una vez terminado el proceso de cálculo la interface de la herramienta presenta los siguientes resultados:

Para el modelo equivalente, se determina la longitud de empotramiento L_f y el desplazamiento de fluencia Δ_y .

Como resultados del diseño se presentan el desplazamiento de diseño, el periodo de vibración, rigidez agrietada, cortante, momento y además se presenta el porcentaje de efectos $P - \Delta$ correspondientes al momento de diseño, acompañados por un mensaje de información que nos indica que el diseño cumple satisfactoriamente los requerimientos del efecto $P - \Delta$, o si se necesita realizar un nuevo diseño utilizando un valor de ductilidad menor. (Figura 6)

RESULTADOS DEL MODELO EQUIVALENTE		
Longitud de empotramiento, L_f		5.324 m
Desplazamiento de fluencia, Δ_y		0.055 m
DESARROLLO		
Desplazamiento de Diseño, Δ_d	0.254	m
Periodo de vibración, T	1.135	s
Rigidez equivalente, K_e	11115.177	kN/m
Cortante de diseño, V	940.759	kN
Momento de diseño, M	5008.42	kN.m
Efectos P-Delta	18.05	%
CUMPLE EFECTOS P-D		

Figura 6. Presentación de resultados del diseño
Fuente: El Autor

Además se presentan los resultados de refuerzo longitudinal y transversal, determinados en base a diagramas *Momento – Curvatura* ($M - C$). (Figura 7)

REFUERZO LONGITUDINAL	
Diámetro de las varillas longitudinales	84 mm
REFUERZO TRANSVERSAL	
Diámetro de estribos	10 mm

Figura 7. Presentación de resultados del diseño para refuerzo
Fuente: El Autor

Descripción de la metodología empleada

La herramienta “Diseño Sísmico de Pilotes: Método de Fuerzas” sigue la metodología del *LFRD* (Load and Resistance Factor Design 2004) el cual es un método de análisis sísmico basado en fuerzas, en el que se diseña a la estructura para resistir una cierta fuerza sísmica, disminuida según un factor de reducción R , el mismo que depende de la importancia de la obra. Para tener en cuenta la

interacción suelo estructura se emplea un modelo equivalente en el que al sistema normal se lo reemplaza por una columna de longitud de empotramiento (L_f) cuya rigidez toma en cuenta la rigidez que el suelo añade a la estructura y un desplazamiento de fluencia. (Figura 8)

Modelo equivalente

La herramienta permite reemplazar a los pilotes pre-barrenados, con cabeza empotrada, por un sistema equivalente, de longitud L_f que esta empotrado en su base y soportado por rodillos en su cabeza, restringiendo su rotación. Además el punto de empotramiento coincide con el de máximo momento en el sistema suelo-pilote.

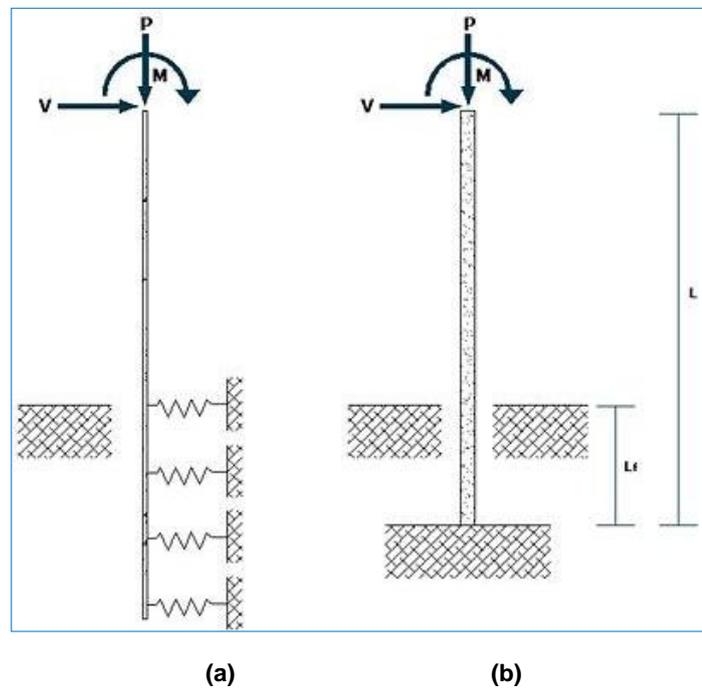


Figura 8. (a) Sistema pilote-suelo (b) Modelo cantiléver equivalente

Los parámetros necesarios para desarrollar este proceso se determinan utilizando las siguientes consideraciones:

La curvatura de fluencia resulta de la ecuación (Suárez, 2005).

$$\phi_y = 2.25 \frac{\epsilon_y}{D}$$

Ec. 1

Donde

ϵ_y – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002

D – Diámetro del pilote.

El desplazamiento de fluencia del sistema equivalente es calculado con la siguiente ecuación,

$$\Delta_y = \frac{\alpha \phi_y L_f^2}{6} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

- ϕ_y – Deformación de fluencia del acero, generalmente 0.002
- L_f – Longitud de empotramiento.
- α – Coeficiente de amplificación de desplazamiento

α es un coeficiente que amplifica el desplazamiento de fluencia de la columna equivalente, y considera además, la rotación elástica que existe bajo el punto de máximo momento, y el área mayor del diagrama de curvatura en el sistema no lineal suelo-pilote. Valores aproximados de α y de L_f se estiman de acuerdo al Cuadro 1.

Tipo de suelo	Coeficiente de amplificación	Longitud de empotramiento L_f
Arcilla $S_u = 20$ KPa	$\alpha = 2.84 - 0.38 \ln \frac{La}{D}$	$L_f = 1.4 \left[\frac{E_p I_{py}}{E_s} \right]^{0.25}$
Arcilla $S_u = 40$ KPa	$\alpha = 2.68 - 0.33 \ln \frac{La}{D}$	
Arena $\Phi = 30^\circ$	$\alpha = 1.88 - 0.16 \ln \frac{La}{D}$	$L_f = 1.8 \left[\frac{E_p I_{py}}{n_h} \right]^{0.20}$
Arena $\Phi = 37^\circ$	$\alpha = 1.86 - 0.18 \ln \frac{La}{D}$	

Cuadro 1. Valores de α y L_f para pilas en arenas y arcillas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

En las ecuaciones para determinar L_f , E_p es el módulo de elasticidad del pilote, I_{py} es la inercia del pilote, y E_s el módulo de elasticidad del suelo, cuyo valor se puede estimar en el (Cuadro 2), y el factor n_h se puede estimar mediante el (Cuadro 3).

TIPO DE ARCILLA	Su (KPa)	Ec (KPa)
Blanda	23.94	1603.989
Media blanda	45.007	3006.88
Dura	77.566	5209.372
Muy dura	140.768	9432.411

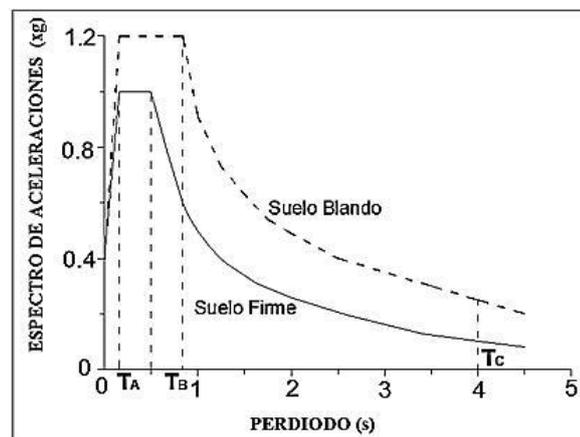
Cuadro 2. Valores representativos de E_s para arcillas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

TIPO DE ARENA	CONDICION DE SATURACION	n_h (KPa/m)
Suelta	Húmedo/seco	9425.295
	Sumergida	4712.655
Media suelta	Húmedo/seco	25134.16
	Sumergida	12567.08
Densa	Húmedo/seco	62835.4
	Sumergida	31417.7

Cuadro 3. Valores representativos de n_h para arenas
Fuente: Método basado en desplazamientos para pilas pre-barrenadas, Vinicio Suárez, 2005

Demanda Sísmica

La Demanda sísmica es dada por un espectro de diseño caracterizado como categoría SDC_D (AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design 2004).



Gráfica 1. Espectro de aceleraciones
Fuente: El Autor

Los parámetros necesarios para el funcionamiento de la herramienta son la pseudo-aceleración espectral (S_a), y el factor de reducción que varía de acuerdo a



la importancia de la obra, la *AASHTO* recomienda para pilotes, valores de factor de reducción entre 2 y 4.

Obtención de resultados de diseño

Se inicia el cálculo determinando la inercia del pilote y su módulo de elasticidad para lo cual se utiliza las siguientes expresiones:

Inercia gruesa del pilote circular

$$I_{py} = \frac{\pi D^2}{64} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

D – Diámetro del pilote

Módulo de elasticidad del pilote

$$E_p = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde

f'_c – Resistencia a la compresión del hormigón en MPa

De acuerdo al tipo de suelo se determina la longitud de empotramiento L_f basándose en las ecuaciones del Cuadro 1, es decir:

$$L_f = 1.4 \left[\frac{E_p I_{py}}{E_c} \right]^{0.25} \quad \text{Ec. 5}$$

para arcillas

$$L_f = 1.8 \left[\frac{E_p I_{py}}{n_h} \right]^{0.20} \quad \text{Ec. 6}$$

para arenas

A continuación se obtiene la rigidez del sistema K

$$K = \frac{3E_p I_{py}}{L_f^3} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde

E_{py} – Módulo de elasticidad del pilote

I_{py} – Inercia gruesa de la sección

L_f – Longitud de empotramiento.

Se procede a calcular el periodo de vibración T en segundos

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{g * K}} \quad \text{Ec. 8}$$



Donde

- P** – Carga axial aplicada al pilote
g – Aceleración de la gravedad
K – Rigidez del sistema.

Seguidamente se obtiene el desplazamiento de fluencia utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta_D = \frac{S_a}{T} g T^2 / 4 \pi^2 \quad \text{Ec. 9}$$

Donde

- S_a** – Seudo-aceleración espectral
T – Periodo de vibración.

Una vez que se ha determinado la rigidez del sistema equivalente se procede a determinar el cortante basal (**V**)

$$V = \frac{S_a}{T} \frac{P}{R} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde

- R** – Factor de reducción

A continuación se determina el momento de diseño (**M**)

$$M = V L_f \quad \text{Ec. 11}$$

Donde

- L_f** – Longitud de empotramiento.

Se verifica que el momento **P – Δ** generado en el nivel de desplazamiento máximo, equivale o es menor a un 20% de la capacidad de momento requerida para la sección.

$$P - \Delta = \frac{V \times R}{K} \times P \times 100 \quad \text{Ec. 12}$$

Donde

- V** – Cortante basal.
R – Factor de reducción de acuerdo a la importancia de la obra.
K – Rigidez del sistema.
M – Momento de diseño.



En caso de que la verificación no sea satisfactoria se debe ingresar nuevos parámetros de diseño, hasta que los resultados se verifiquen correctamente.

Finalmente, en el diseño por el método de fuerzas, el refuerzo a flexión es determinado, usando un análisis momento curvatura, que proporciona la resistencia requerida para un nivel de curvatura, compatible con la demanda de ductilidad del elemento, para lo cual la herramienta se enlaza a una aplicación existente en el *LVIG*. Se determina el refuerzo longitudinal y transversal para el pilote, el cual está dentro de la cuantía (1- 4) % que recomiendan los códigos de diseño sísmico *AASHTO 2004*.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



6.1 CONCLUSIONES

- Se ha logrado desarrollar con éxito una herramienta que permite el diseño de cimentaciones profundas con pilotes, y su respectiva implementación en el *LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*.
- La herramienta de diseño de cimentaciones con pilotes ayudará a mejorar los métodos de enseñanza - aprendizaje en lo referente a la ingeniería de cimentaciones.
- La presente herramienta permite reducir el tiempo de cálculo al momento de realizar cimentaciones profundas con pilotes.
- Esta aplicación web está sujeta a continuas actualizaciones, es decir, que se puede mejorar tanto su interface visual, como las metodologías incorporadas a esta.
- Con el desarrollo de esta herramienta se incentivará a futuras investigaciones sobre cimentaciones pilotadas.
- En la comprobación manual se determinó que se obtuvieron resultados muy aproximados a los calculados por las aplicaciones, demostrando la confiabilidad del software.
- Esta herramienta web servirá como estímulo para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, en vista de que se ha logrado automatizar el diseño de cimentaciones profundas con pilotes.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda indagar acerca de otras metodologías para el diseño de cimentaciones con pilotes y realizar una comparación entre ellos para decidir cuál proporciona resultados confiables.



-
- Se recomienda modificar el código de todas las aplicaciones, de tal manera que se puedan considerar más de cuatro estratos y además se pueda diseñar cimentaciones profundas con pilotes de acero y madera.
 - Se recomienda actualizar de manera continua las metodologías empleadas para el proceso de diseño.
 - Se recomienda leer detenidamente los manuales de usuario, antes de usar cualquiera de las aplicaciones, con el fin de evitar el mal funcionamiento de la herramienta.



CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- AASHTO LRFD *Bridge design specifications*, second edition. 2004. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- ACI 318S-08 *Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario*. 2008. American Concrete Institute, Farmington Hills. United States.
- Ministerio de Fomento de España (MFOM). 2005. *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Dirección general de carreteras. España.
- Ministerio de Fomento de España (MFOM). 2005. *Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias (ROM-05)*. Puertos del estado. España.
- DAS, Braja M. 2001. *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, 4^{ta} edición, Universidad de Monterey. México.
- ALVA H., Jorge E., PhD. 2000. *Cimentaciones profundas*. CISMID-FIC-UNI. Perú.
- GUNARATNE, Manjriker. 2006. *The Foundation Engineering Handbook*. Taylor & Francis Group. CRC Press. New York. United States.
- INEN, 2005. Código Ecuatoriano de la Construcción, 2005
- CHEN DUAN, Wai F. y Lian. 2000. *Bridge engineering handbook, Deep foundations, 1th Edition*. Taylor & Francis, Inc. United States.
- BOWLES, Joseph E. 1996. *Foundation analysis and design*. International editions. 5th Edition. McGraw-Hill
- PRIESTLEY, M.J.N. et al. 1996. *Seismic design and retrofit of bridges*. Wiley, New York.
- SUÁREZ CHACÓN, Vinicio A. 2005. *Diseño sísmico de pilas con pilotes pre-barrenados incluyendo la interacción suelo – estructura*. Journal of Earthquake Engineering, in press.