

**DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE
DISEÑO GEOTÉCNICO DE PILOTES EN
ARENAS Y ARCILLAS CON CARGA
AXIAL EMPLEANDO MÉTODOS DE
ANÁLISIS BASADOS EN
CONFIABILIDAD**

por

**ANA MARÍA LÓPEZ ROVIRA Y JUAN SEBASTIAN
MURCIA PLAZA**

Trabajo de grado presentado a la

Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil
Pontificia Universidad Javeriana

como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Pontificia Universidad Javeriana
Carrera de Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia, Julio 2014

Aprobado por

Luis Felipe Prada Sarmiento

Asesor

Departamento de Ingeniería Civil
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Alfonso Mariano Ramos Cañon

Asesor

Instituto geofísico
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

José Andres Cruz

Jurado 1

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Santo Tomás, Colombia

Juan Carlos Ruge

Jurado 2

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Católica de Colombia, Colombia

Aprobada en Bogotá, el día 2 de Julio del 2014

Prefacio del autor

Dedicamos este trabajo de grado a nuestros padres y hermanos por su confianza y apoyo incondicional.

Ana Maria Lopez Rovira y Juan Sebastian Murcia Plaza

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2. ALCANCE	3
1.3. SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES	4
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. FUNDACIONES PROFUNDAS	7
2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDACIONES PROFUNDAS	8
2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS APLICADAS	9
2.4. TRANSFERENCIA DE LAS CARGAS AXIALES AL SUELO	9
2.5. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE	10
2.5.1. ANÁLISIS BASADO EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO	14
2.5.1.1. SUELOS GRANULARES	14
2.5.1.1.1. CAPACIDAD POR PUNTA Q_p	14
2.5.1.1.2. CAPACIDAD POR FUSTE Q_f	28
2.5.1.2. SUELOS FINOS	32
2.5.1.2.1. CAPACIDAD POR PUNTA Q_p	32
2.5.1.2.2. CAPACIDAD POR FUSTE Q_f	38
2.5.2. ANÁLISIS BASADO EN ENSAYOS IN SITU	53
2.5.2.1. SPT	53
2.5.2.1.1. CAPACIDAD POR PUNTA Q_p	53
2.5.2.1.2. CAPACIDAD POR FUSTE Q_f	57
2.5.2.2. CPT	59
2.5.2.2.1. CAPACIDAD POR PUNTA Q_p	59
2.6. ASENTAMIENTOS	62
2.6.1. ASENTAMIENTO ELÁSTICO DEL PILOTE, S_{e1}	62

2.6.2.	ASENTAMIENTO DEL PILOTE CAUSADO POR LA CARGA EN LA PUNTA DEL PILOTE, S_{e2}	63
2.6.3.	ASENTAMIENTO DEL PILOTE CAUSADO POR LA CARGA TRANSMITIDA A LO LARGO DEL FUSTE DEL PILOTE, S_{e3}	64
2.7.	MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	66
2.7.1.	MÉTODOS DE ESTIMACIÓN PUNTUAL	66
2.7.1.1.	CASO 3	66
2.7.2.	MÉTODO DE MONTECARLO	68
2.7.3.	MÉTODO DE SERIES DE TAYLOR	68
3.	PROGRAMA DAP-C	70
3.1.	INICIO	70
3.2.	PARÁMETROS DE ENTRADA	71
3.3.	PROPIEDADES DEL PILOTE	72
3.4.	CARGA APLICADA	73
3.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	73
3.6.	MÉTODOS DE DISEÑO	74
3.7.	CONFIABILIDAD	75
3.7.1.	MONTECARLO	76
3.7.2.	ESTIMATIVOS PUNTUALES	78
3.7.3.	SERIES DE TAYLOR	81
3.8.	RESULTADOS	82
3.9.	GRÁFICAS	82
3.10.	RECOMENDACIONES	83
4.	EJEMPLO DE APLICACIÓN	84
4.1.	PERFIL DE SUELO	84
4.1.1.	PRUEBA 1	86
4.1.2.	PRUEBA 2	87
5.	COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS	96
5.1.	PERFIL DE ARCILLAS	96
5.2.	PERFIL DE ARENAS	100
6.	COMENTARIOS	105
7.	ANEXOS	107
	Bibliography	108

Índice de figuras

2.1. Clasificación de las fundaciones profundas tomado de Coduto (1994)	8
2.2. Transferencia de cargas axiales tomado de Coduto (1994)	10
2.3. Metodologías con cargas axiales empleadas en el desarrollo del trabajo de grado. Modificado de Coduto (1994)	13
2.4. Naturaleza de la variación de la resistencia unitaria de punta en una arena homogénea. Tomado de Das (2006)	14
2.5. Resistencia generada en la punta para una arena homogénea. Tomado de Das (2006)	15
2.6. Resistencia generada en la punta para una arena homogénea. Tomado de Das (2006)	15
2.7. Variación de los valores máximos de N_q con el ángulo efectivo de fricción del suelo. Meyerhof (1976) tomado de Das (2006)	16
2.8. Variación de los valores máximos de N_q con el ángulo efectivo de fricción del suelo. Modificado de Meyerhof (1976) tomado de Das (2006)	17
2.9. Superficie de falla en la punta del pilote Das (2006).	20
2.10. Variación de N_q^* con $\frac{L}{D}$ según Coyle y Castello Das (2006).	22
2.11. Modificación de la variación de N_q^* con $\frac{L}{D}$ según Coyle y Castello Das (2006).	23
2.12. Factor de capacidad portante propuestos por Berezantsev y Brinch Hansen. Tomlinson and J. (2008).	25
2.13. Factor de capacidad portante propuestos por Berezantsev y Brinch Hansen. Modificado de Tomlinson and J. (2008).	26
2.14. Variación de K con $\frac{L}{D}$ según Coyle y Castello Das (2006).	29
2.15. Variación de K con $\frac{L}{D}$ según Coyle y Castello Das (2006).	30
2.16. Variación de N_c^* con el ángulo de fricción modificado de Meyerhof Das (2006).	34
2.17. Factor de adhesión para pilotes hincados a la penetración profunda en arcillas. Factor de longitud. Tomlinson and J. (2008).	39
2.18. Factor de adhesión para pilotes hincados a la penetración profunda en arcillas. Factor de longitud .Modificada de Tomlinson and J. (2008).	39

2.19. Factor de adhesión para pilotes hincados a la penetración profunda en arcillas. Factor de adhesión vs resistencia al corte sobre la presión de sobrecarga efectiva. Tomlinson and J. (2008).	40
2.20. Factor de capacidad portante propuestos por Berezantsev y Brinch Hansen. Modificada de Tomlinson and J. (2008).	41
2.21. Funciones propuestas para el factor de adhesión α , comparados con los valores actuales de α y c_u obtenidos de pruebas de carga (Pruebas de cargas son adaptadas de Veis, 1977) Coduto (1994).	45
2.22. Funcion propuesta por Dennis y Olson (1983) para el factor de adhesión α , Modificado de Coduto (1994).	46
2.23. Variación de α con c_u en pilotes preexcavados (Adaptado de Kulhawy y Jackson) Coduto (1994).	48
2.24. Variación de α con c_u . Modificado de Coduto (1994)	49
2.25. Aplicación del método λ en suelo estratificado Das (2006).	50
2.26. Variación de λ con la longitud de empotramiento de un pilote Das (2006).	51
2.27. Variación de λ con la longitud de empotramiento de un pilote. Modificado de Das (2006).	52
2.28. Relación entre SPT y el angulo de fricción ϕ . Tomlinson and J. (2008).	56
2.29. Relación entre SPT y el angulo de fricción ϕ .Modificada de Tomlinson and J. (2008).	57
2.30. Variación de q_c^* Das (2006).	60
2.31. Diversos tipos de distribución de la resistencia unitaria por fricción (superficial) a lo largo del fuste del pilote Das (2006).	63
3.1. Inicio	70
3.2. Perfil del suelo	71
3.3. Propiedades del pilote	72
3.4. Carga aplicada	73
3.5. Análisis de sensibilidad	74
3.6. Metodologías de diseño	75
3.7. Confiabilidad	75
3.8. Parámetros Montecarlo	76
3.9. Montecarlo	77
3.10. Montecarlo	78
3.11. Índice de confiabilidad. Tomado de Sivakumar Babu y Murthy (2005).	78
3.12. Parámetros Montecarlo	79
3.13. Estimativos puntuales	80
3.14. Estimativos puntuales	81

3.15. Series de Taylor	82
3.16. Gráficas	83
4.1. Perfil de suelo empleado para el análisis de resultados	84
4.2. Variabilidad de la medición del ángulo ϕ para distintos suelos, tomado de Baecher (2003)	84
4.3. Coeficientes de variación para algunas mediciones comunes en campo (Phoon and Kulhawy 1999), tomado de Baecher (2003)	85
4.4. Guia para determinar la variabilidad de algunas propiedades del suelo de diseño, tomado de Phoon and Kulhawy (1999)	85
4.5. Probabilidad de falla vs diámetro del pilote	89
4.6. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	89
4.7. Probabilidad de falla vs diámetro del pilote	90
4.8. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	90
4.9. Probabilidad de falla vs diámetro del pilote	91
4.10. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	91
4.11. Probabilidad de falla vs diámetro del pilote	92
4.12. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	92
4.13. Probabilidad de falla vs diámetro del pilote	93
4.14. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	93
4.15. Probabilidad de falla vs diámetro del pilote	94
4.16. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	94
4.17. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	95
4.18. Factor de seguridad vs diámetro del pilote	95
5.1. Q_p vs diámetro del pilote	97
5.2. Factor de seguridad para Q_p vs diámetro del pilote	98
5.3. Probabilidad de falla para Q_p vs diámetro del pilote	98
5.4. Q_s vs diámetro del pilote	99
5.5. Factor de seguridad para Q_s vs diámetro del pilote	99
5.6. Probabilidad de falla para Q_s vs diámetro del pilote	100
5.7. Q_p vs diámetro del pilote	101
5.8. Factor de seguridad para Q_p vs diámetro del pilote	102
5.9. Probabilidad de falla para Q_p vs diámetro del pilote	102
5.10. Q_s vs diámetro del pilote	103
5.11. Factor de seguridad para Q_s vs diámetro del pilote	103
5.12. Probabilidad de falla para Q_s vs diámetro del pilote	104

Índice de tablas

1.1. Símbolos y abreviaciones	5
1.2. Símbolos y abreviaciones	6
2.1. Valores estimados I_r tomado de Bowles (1996)	20
2.2. Valores típicos para arenas normalmente consolidadas tomado de Tomlinson and J. (2008)	27
2.3. Valores del coeficiente de esfuerzos horizontales. Tomado de Tomlinson and J. (2008)	27
2.4. Valores del ángulo de fricción entre la pila y el suelo. Tomado de Tomlinson and J. (2008)	28
2.5. Valores estimados I_r tomado de Bowles (1996)	38
2.6. Factor K_b para el método LCPC Coduto (1994)	61
2.7. Valores típicos de C_p recomendados por Vesic(1977). Tomado de Das (2006)	64
4.1. Parámetros empleados para el perfil del suelo	86
4.2. Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1	86
4.3. Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1	87
4.4. Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1	87
4.5. Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1	87
4.6. Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1	88
4.7. Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1	88
5.1. Parámetros empleados para el perfil del suelo	96
5.2. Parámetros empleados para el perfil del suelo	100

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El uso de pilotes es uno de los métodos más antiguos usado por el hombre para superar las dificultades al momento de construir cimentaciones sobre suelos con baja capacidad portante. Hasta el siglo XIX el diseño y construcción de los mismos se basaba en métodos empíricos, pero en el año 1893 Arthur Mellen Wellington y Rudolph Hering con la publicación de "Piles and Pile Driving", empezaron a proponer diferentes ecuaciones y metodologías para el diseño de cimentaciones profundas con pilotes (Poulos and Davis, 1980). En las últimas décadas se ha incrementado la demanda de cimentaciones profundas con pilotaje, las cuales se diseñan con base en diferentes métodos empíricos y teóricos. Algunas de estas metodologías de diseño han presentado problemas tales como la falla de la estructura debido a que parte de ésta colapsó o presentó grandes deformaciones. En este tipo de fallas las deficiencias en el uso de las metodologías teóricas conducen frecuentemente al cálculo de un número insuficiente de pilotes, a un dimensionamiento incorrecto de la longitud y sección transversal requerida de los pilotes (Poulos and Davis, 1980). El sobredimensionamiento es otro problema en el diseño, generalmente causado por el uso de métodos empíricos los cuales se basan en las experiencias adquiridas en obras previas. En este contexto se comentan casos de pilotes muy gruesos, largos o en gran cantidad lo cual hace que la obra sea muy costosa (Poulos and Davis, 1980).

Hoy en día se diseñan pilotes con distintos programas de computador que se emplean como modelos de caja negra, en donde el usuario desconoce las metodologías de diseño, así como los criterios y limitaciones que poseen estos métodos. Algunos programas comerciales pueden llegar a ser muy costosos y pueden carecer de la posibilidad de hacer análisis basados en confiabilidad, lo cual permitiría encontrar soluciones más razonables en términos económicos y técnicos basadas en probabilidades de falla y no en factores de seguridad.

Al entender el comportamiento analítico y las limitaciones de las formulaciones empíri-

cas para el diseño de los sistemas de pilotaje, se podría llegar a un diseño razonable desde el punto de vista económico. Por ese motivo, se plantea la necesidad de desarrollar un programa de análisis basado en las diferentes metodologías empleadas actualmente para el diseño de sistemas de pilotaje y combinarlas con la teoría de diseño basado en confiabilidad. El resultado esperado será una herramienta de diseño que permita equilibrar de forma objetiva el aspecto económico y la estabilidad del proyecto. (Das, 2006)

Los pilotes son miembros estructurales esbeltos, enterrados en el suelo debajo de la cimentación superficial, son usados ampliamente tanto en el mar como en el suelo para soportar muchos tipos de estructuras. Estos están contruidos de diversos materiales, siendo los principales acero, concreto y madera.

A través de la historia se han utilizado desde hace más de 2000 años , Alexander el Grande los utilizó en la ciudad de Tyra en el año 332 D.C, los Romanos los usaron en muchas construcciones, y en China desde el año 200A.C hasta el año 200 D.C. En estas épocas solo se construían pilotes hincándolos a mano fabricados con madera, ls cuales estaban limitados en longitud, resistencia y durabilidad. (Coduto, 1994)

Durante los primeros siglos antes de la revolución industrial, la mayoría de pilotes también se construyeron con madera y se hincaban a poca profundidad, sirviendo como un mejoramiento del suelo y a la vez como un medio para transmitir las cargas desde las estructuras a suelos más profundos, pero aún así estaban limitados en cuanto a la resistencia y la longitud.

Con la revolución industrial, cuando se comenzó a construir acero de mejor calidad y resistencia, se construyeron grandes máquinas y pilotes, los cuales mejoraron la capacidad de las cimentaciones profundas en cuanto a longitud y resistencia más no la durabilidad. A mediados de 1890 se inventó el concreto reforzado, lo cual permitió la construcción de pilas más largas y resistentes, junto con maquinaria más avanzada que permitía su instalación. Sin estas mejoras las construcciones de hoy en día no hubiesen sido posibles, un claro ejemplo son las cimentaciones para estaciones petroleras las cuales tienen pilotes con diámetros alrededor de tres metros y deben resistir grandes cargas debido a muchos factores como el viento, oleaje, peso propio y fuerzas de terremotos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un programa de computador basado en diferentes metodologías para el diseño geotécnico de pilotes sometidos a carga axial, empleando la teoría de la confiabilidad.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar gráficas en función de la carga axial, diámetro y asentamientos en pilotes para cada metodología seleccionada de diseño.
- Comparar la capacidad portante de cada pilote según las diferentes metodologías analíticas y empíricas de diseño.
- Evaluar la variabilidad en la capacidad portante y los asentamientos considerando análisis determinísticos y análisis basados en confiabilidad.

1.2. ALCANCE

Este documento es una síntesis de trabajo de grado de tipo aplicación. Con este tipo de trabajo se busca realizar una recopilación de los métodos tradicionales de diseño de capacidad de carga por punta y fuste de pilotes individuales sometidos a carga axial. Esta recopilación no solo se limita a compilar las ecuaciones de diseño, sino que además de esto busca comentar de forma crítica las ventajas y limitaciones de cada metodología de cálculo, creando así una herramienta para la implementación de metodologías de cálculo en un programa de computador.

Adicionalmente, se introducen los procedimientos de diseño basado en confiabilidad (estimativos puntuales, simulaciones de Montecarlo, series de Taylor) para calcular probabilidades de falla, dada la variabilidad de los valores de entrada de las metodologías de diseño. Las técnicas de análisis basado en confiabilidad quedan incorporadas en el programa, con lo cual se produce finalmente una herramienta práctica para la investigación y la consultoría.

En la actualidad existen incertidumbres al momento de realizar los cálculos para determinar la resistencia última de los pilotes, lo que conlleva a emplear factores de seguridad altos. En el presente documento se realizará una recopilación de información de las metodologías de cálculo para incorporarlas en el programa DAP-C, el cual significa diseño axial de pilotes con confiabilidad.

1.3. SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

La Tabla 1.1 y la Tabla 1.2 presentan los principales símbolos empleados a lo largo del documento. De igual forma los símbolos serán identificados al momento de ser empleados:

Tabla 1.1: Símbolos y abreviaciones

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN
A_p	m^2	Área transversal de la punta del pilote
A_s	m^2	Área superficial de contacto pilote-suelo
B_r	m	Ancho de referencia
CV	(%)	Coefficiente de variación
C_s	kN/m^2	Constante empírica para determinar asentamientos
c_u	kN/m^2	Cohesión no drenada
c'	kN/m^2	Cohesión drenada
D	m	Diámetro del pilote
E_p	kN/m^2	Módulo de elasticidad del concreto del pilote
E_s	kN/m^2	Módulo de elasticidad del suelo
F		Factor de longitud del pilote
f		Factor de adhesión
f_{prom}	kN/m^2	Resistencia unitaria por fricción
G_s	kN/m^2	Módulo cortante del suelo
I_{rr}		Índice de rigidez reducida para el suelo
I_r		Índice de rigidez
I_{wp}		Factor de influencia
K_o		Coefficiente de presión de tierra en reposo
K_s		Coefficiente del esfuerzo de confinamiento
K_b		Factor empírico de capacidad de carga
L		Longitud del pilote
N_q^*		Factor dependiente del ángulo de fricción
N_c^*		Factor de capacidad de carga
N_{60}		Valor promedio corregido del número se SPT.
OCR		Tasa de preconsolidación
P_a	kN/m^2	Probabilidad de distribución de los parámetros aleatorios
PDF		Probabilidad de distribución de los parámetros aleatorios
p	m	Perímetro de la sección del pilote
Q_p	kN	Resistencia por por punta de un pilote
Q_s	kN	Resistencia a la fricción de un pilote
q_p	kN	Resistencia unitaria por por punta de un pilote
q_s	kN	Resistencia unitaria a la fricción de un pilote
q_l	kN/m^2	Resistencia de punta límite
S_e	m	Asentamiento total del pilote
S_{e1}	m	Asentamiento elástico del pilote
S_{e2}	m	Asentamiento del pilote causado por Q_p
S_{e3}	m	Asentamiento del pilote causado por Q_s
S_{adm}	m	Asentamiento máximo permitido

Tabla 1.2: Símbolos y abreviaciones

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN
α_p		Factor de adhesión
δ		Valor característico del ángulo de fricción entre la pila y el suelo
Δ		Deformación volumétrica unitaria promedio
ε		Factor de distribución de Q_s a lo largo del fuste del pilote
η	°	Ángulo de la superficie de falla en la punta
λ		Factor dependiente de la longitud del pilote
μ_s		Relación de Poisson del suelo
μ		Valor medio de cada uno de los parámetros
ϕ	°	Ángulo de fricción
ϕ_r	°	Ángulo de fricción drenado de la arcilla remoldeada
σ'_v	kPa	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
τ_n	kN/m ²	Valor de la resistencia a la fricción

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDACIONES PROFUNDAS

Aunque las zapatas corridas son el tipo más común de fundaciones, los ingenieros a menudo se encuentran con circunstancias en las que otros tipos de fundaciones son más eficientes. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Los suelos en las capas superiores son tan débiles y/o las cargas estructurales tan altas, que el diseño con zapatas sería demasiado grandes y menos eficiente. Coduto (1994), propone una regla general para la construcción, la cual refiere que las zapatas dejan de ser económicas cuando el área total de la cimentación es superior a la mitad del área de la planta del edificio.
- Los suelos en las capas superiores son susceptibles a fenómenos de socavación, lo cual puede ocasionar deterioros en la cimentación y pérdida de soporte.
- Si se llegase a presentar una excavación futura junto a la fundación, esta excavación podría debilitar la cimentación superficial

En algunas circunstancias como las descritas anteriormente, una losa de cimentación podría ser una alternativa, pero la solución más común es implementar fundaciones profundas.

Una fundación profunda según Coduto (1994), es una cimentación que transmite una parte o la totalidad de la carga aplicada a los suelos a una longitud considerable por debajo de la superficie del suelo. Estas bases típicamente se extienden a profundidades del orden de 15 m por debajo de la superficie del terreno, pero pueden ser mucho más largos, llegándose a extender a profundidades del orden de 45m. Incluso longitudes más grandes se han empleado en algunas estructuras mar adentro, como plataformas de perforación de petróleo. Dado que los suelos suelen mejorar sus propiedades con la profundidad, y estas fundaciones son realizadas en niveles muy profundos,son capaces de soportar mayores cargas.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDACIONES PROFUNDAS

Prakash (1990), presenta los principales aspectos que se deben tener en cuenta al momento de clasificar los pilotes:

- Metodología de diseño
- Método de instalación
- Tipo de material
- Método de fabricación
- Cantidad de material removido durante la instalación
- Forma de transmitir la carga

Además de estos parámetros, existen diversas clasificaciones para definir a los pilotes en función de sus propiedades. Según Coduto (1994), las cimentaciones profundas abarcan tres grandes grupos como se observa en la Figura 2.1:



Figura 2.1: Clasificación de las fundaciones profundas tomado de Coduto (1994)

En el desarrollo de este trabajo de grado se hace énfasis en los dos primeros ítems presentados anteriormente, ya que el procedimiento constructivo define la metodologías de cálculo . La estructuración de estas divisiones se presentan en la Figura 2.3.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS APLICADAS

Las estructuras pueden imponer cargas normales, cortantes, momentos y cargas torsionales en los cimientos. Dichas cargas se clasifican en dos categorías principales: cargas axiales y cargas laterales.

Las cargas axiales son las que actúan paralelas al eje de la base y las cargas laterales son las que actúan perpendiculares al eje del pilote. Por lo tanto, si el eje es vertical, la sobrecarga impuesta sobre la cimentación y su peso propio inducen cargas axiales en la base, mientras que las cargas de cortante aplicadas y las de momento inducen cargas laterales.

En el desarrollo de este trabajo de grado se estudian únicamente las cargas axiales.

2.4. TRANSFERENCIA DE LAS CARGAS AXIALES AL SUELO

Las cimentaciones profundas transfieren las cargas axiales aplicadas al suelo a través de dos mecanismos: fuste y punta. La resistencia por fuste es el resultado de la fricción del desplazamiento a lo largo de la fundación y la adhesión encontrada entre el suelo y el pilote. Y la capacidad por punta es el resultado de las cargas de compresión entre la parte inferior de la fundación y el suelo como se observa en la Figura 2.2.

Para determinar la capacidad última q_u por carga axial en un pilote deben ser considerados dos aspectos fundamentales según Smoltczyk (2003).

- Capacidad estructural del pilote: El pilote debe ser capaz de resistir las cargas de servicio terminada la construcción y las cargas a las que será sometido durante el proceso constructivo. Esta capacidad estructural del pilote será la máxima fuerza que pueda transferir el pilote al suelo.
- Capacidad última del suelo: Es la capacidad máxima que tienen las diferentes capas de suelo para resistir la carga aplicada. Para este cálculo, se deben tener en cuenta los asentamientos máximos permitidos.

Los pilotes generalmente son empleados en grupo, sin embargo el estudio de los diseños presentados en este trabajo de grado se basan en el diseño de un solo pilote. Al aplicarse únicamente metodologías de diseño geotécnico, no se considerará el diseño estructural del pilote.

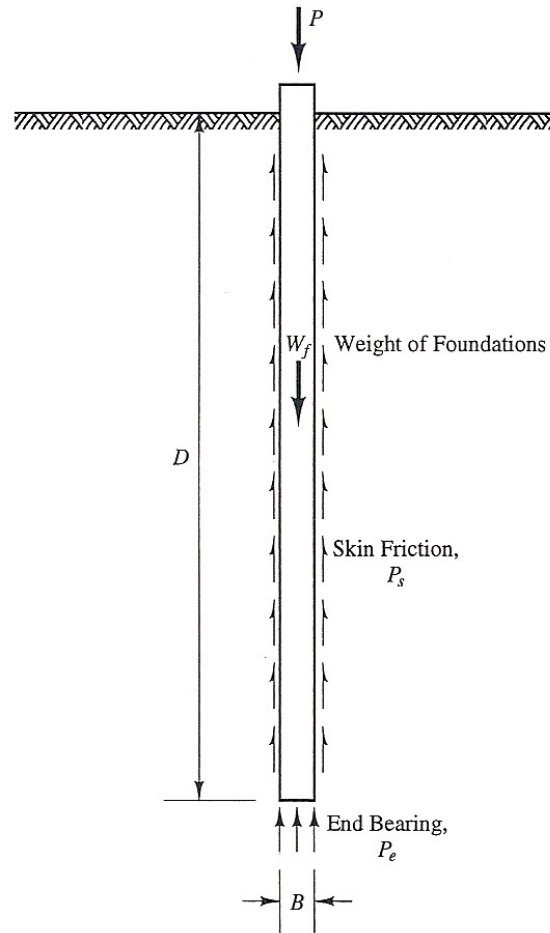


Figura 2.2: Transferencia de cargas axiales tomado de Coduto (1994)

2.5. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE

Coduto (1994) presenta una clasificación de metodologías de diseño de pilotes para evaluar la capacidad portante de un pilote sometido a carga axial. Las metodologías para determinar dicha carga son:

1. Pruebas de carga a escala real: En esta metodología se implementan pruebas a escala real con pilotes cargados axialmente, siendo la más exacta para determinar la capacidad de carga axial del pilote de una manera experimental y también la más costosa. Las demás metodologías que determinan la capacidad portante lo realizan indirectamente con procedimientos teóricos o empíricos, los cuales tienen una menor precisión.

Esta metodología consiste en utilizar pilotes de reacción para así cargar axialmente un pilote a escala real utilizando vigas muy rígidas, de tal forma que se incremente el esfuerzo axial en una relación de 2 a 1, para así determinar la capacidad última del pilote y algunos factores que serán empleados en el cálculo de la capacidad última.

2. Métodos estáticos: En esta metodología se realizan ensayos de las propiedades del suelo y con base a estos resultados, se estima la capacidad última del pilote. Los parámetros se obtienen de ensayos en laboratorios o pruebas in-situ, estos son susceptibles a tener una gran variabilidad en los resultados debido al suelo mismo o a los procedimientos implementados en los laboratorios. Las variaciones pueden sobreestimar la capacidad del pilote o subestimarla, conduciendo a que los cálculos realizados no sean del todo precisos y obliguen a emplear factores de corrección muy grandes. Los ensayos que se realizan para determinar las propiedades del suelo se dividen en dos grandes ramas:

- Análisis basados en propiedades del suelo: En estos análisis se determinan las propiedades del suelo mediante ensayos realizados en laboratorios, encontrando propiedades como: peso unitario, cohesión, relación de vacíos, relación de consolidación y demás, dependiendo de la metodología de cálculo seleccionada. Con las propiedades ya determinadas del suelo se procede a implementar alguna ecuación para determinar la capacidad del pilote.
- Análisis basados en ensayos realizados in-situ: Los análisis realizados in-situ son aquellos que mediante correlaciones, determinan las propiedades del suelo o dan una estimación de la capacidad última del pilote como los ensayos de Stándar Penetration Test y Cone Penetration Test.

3. Métodos Dinámicos: En estos ensayos se determina la capacidad axial de los pilotes dependiendo del grado de dificultad para hincarlos. Usualmente si el pilote presenta un mayor grado de dificultad para ser hincado es porque tiene una mayor capacidad última. La determinación de la resistencia se realizaba inicialmente con correlaciones de energía necesaria para hincar los pilotes variando parámetros como :la altura, el peso del martillo y el número de golpes necesarios. Estas correlaciones son conocidas como "pile driving formulas" y fueron objeto de muchas discusiones debido a que la determinación de la capacidad última del pilote se reducía a un procedimiento y no poseía un análisis de fondo.

Además cuando estos métodos se evaluaban experimentalmente, presentaban incrementos en los asentamientos muy elevados, así que luego de la proposición de estas ecuaciones netamente dinámicas, se decidió tener en cuenta las ondas que se generaban

en el suelo, debido al impacto del martillo, lo que conllevó a generar ecuaciones que tuviesen en cuenta la velocidad con la que viajaba la onda a través del pilote y el suelo.

Hoy en día estas ecuaciones se han convertido en un control de los cálculos durante el proceso constructivo, ya que se ven afectadas por las condiciones frontera del pilote con el suelo.

Al tener conocimiento de las diferentes metodologías propuestas, se estudian en el desarrollo de este trabajo de grado únicamente las metodologías estáticas, como se observa en el siguiente mapa conceptual:

2.5. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE

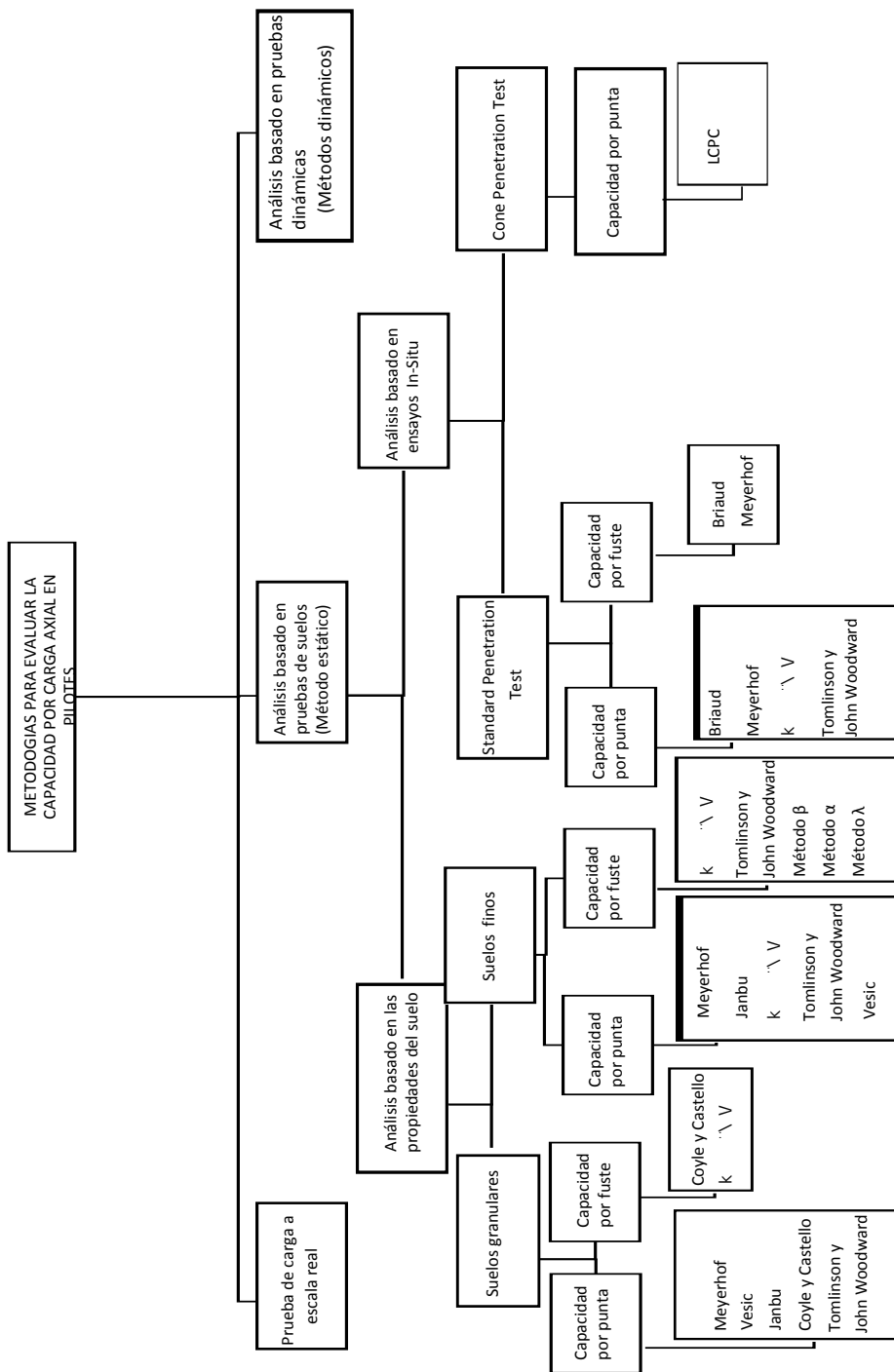


Figura 2.3: Metodologías con cargas axiales empleadas en el desarrollo del trabajo de grado. Modificado de Coduto (1994)

2.5.1. ANÁLISIS BASADO EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

2.5.1.1. SUELOS GRANULARES

2.5.1.1.1 CAPACIDAD POR PUNTA Q_p

- Meyerhof 1976, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

La capacidad de carga de punta Q_p de un pilote, generalmente crece con la profundidad de empotramiento en el estrato de apoyo y alcanza un valor máximo para una relación de empotramiento de:

$$\frac{L_b}{D} = \left(\frac{L_b}{D} \right)_{cr} \quad (2.1)$$

Donde:

Símbolo	Definición
D	Diámetro del pilote
D_{cr}	Diámetro crítico
L_b	Longitud de empotramiento en el estrato de apoyo
L_{bcr}	Longitud de empotramiento en el estrato de apoyo crítico

En la Figura 2.4 se observa la influencia de la relación $\frac{L_b}{D}$ en la resistencia unitaria por punta. Se puede observar que cuando el pilote sobrepasa la distancia de la relación $\left(\frac{L_b}{D} \right)_{cr}$, el valor de Q_p permanece constante para un suelo homogéneo.

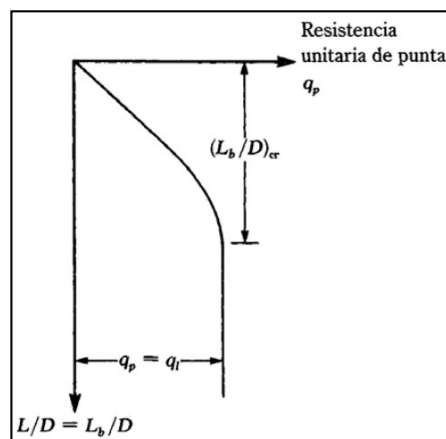


Figura 2.4: Naturaleza de la variación de la resistencia unitaria de punta en una arena homogénea. Tomado de Das (2006)

Si se considera un suelo homogéneo, L_b es igual a la longitud real de empotramiento del pilote L como se observa en la Figura 2.5.

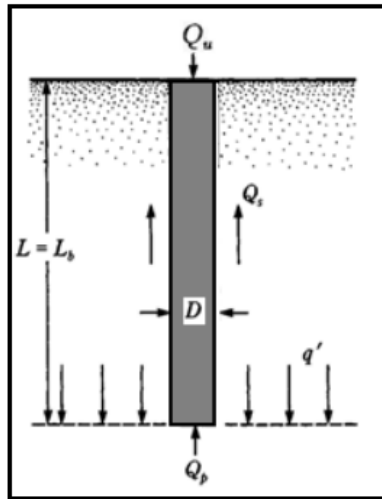


Figura 2.5: Resistencia generada en la punta para una arena homogénea. Tomado de Das (2006)

También se pueden observar casos de pilotes en los cuales la longitud de empotramiento del pilote L_b es menor que L en la Figura 2.6.

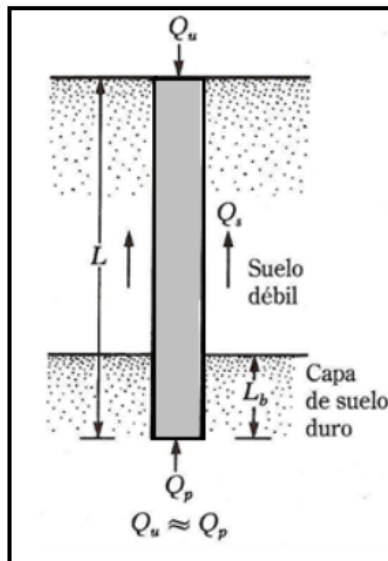


Figura 2.6: Resistencia generada en la punta para una arena homogénea. Tomado de Das (2006)

Ecuaciones:

$$Q_p = A_p \sigma'_v N_q^* \leq A_p q_l \quad (2.2)$$

$$q_l = 0,5 P_a N_q^* \tan \phi \quad (2.3)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga por punta
A_p	Área transversal de la punta del pilote
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
N_q^*	Factor dependiente del ángulo de fricción
q_l	Resistencia de punta límite
P_a	Presión atmosférica(=100 kN/m ²)
ϕ	Ángulo de fricción efectivo del suelo del estrato de apoyo.

Para determinar el factor N_q^* , se emplea la gráfica mostrada a continuación.

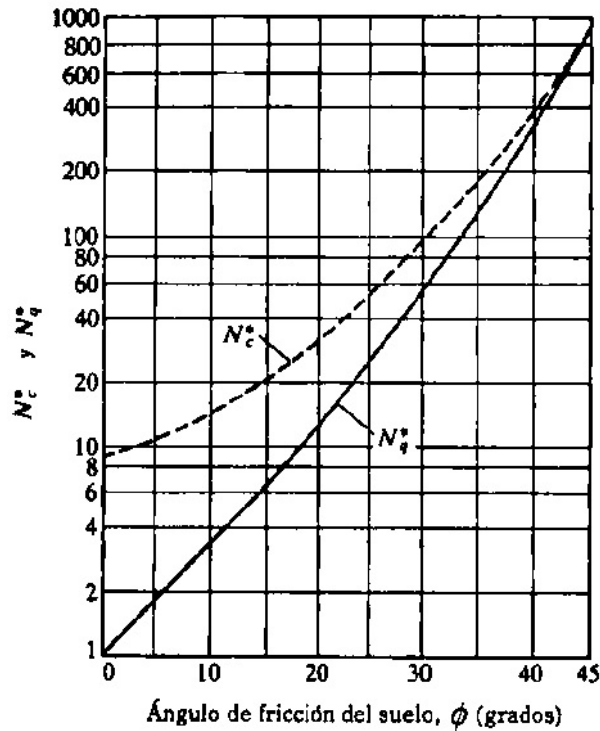


Figura 2.7: Variación de los valores máximos de N_q con el ángulo efectivo de fricción del suelo. Meyerhof (1976) tomado de Das (2006)

La Figura 2.7 propuesta por Meyerhof, en donde se relaciona N_q y el ángulo de fricción del suelo fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones.

Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de sexto orden como se observa en la Figura 2.8.

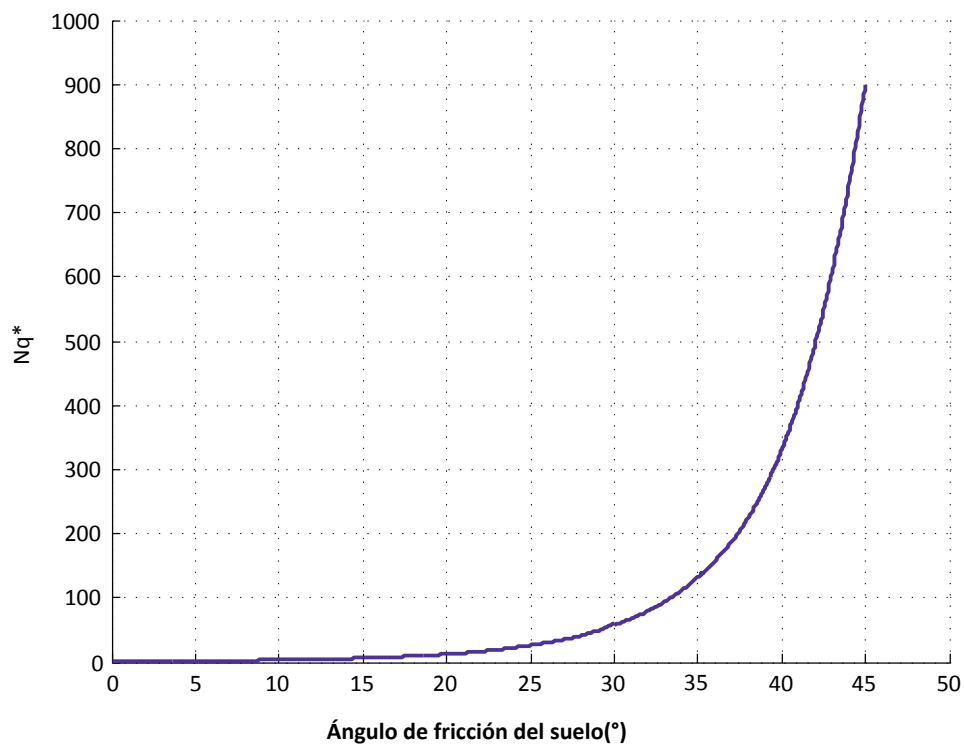


Figura 2.8: Variación de los valores máximos de N_q con el ángulo efectivo de fricción del suelo. Modificado de Meyerhof (1976) tomado de Das (2006)

La Figura 2.8 se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para los dominios presentados:

ϕ de 0° a 15° :

$$N_q = 4,98173894580844E-07\phi^6 - 2,57709712704458E-05\phi^5 + 5,02911436929752E-04\phi^4 - 3,81699671805477E-03\phi^3 + 2,19748038056216E-02\phi^2 + 1,07650914044630E-01\phi + 1,00307478944101E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ de 15° a 30°:

$$N_q = 5,46714431024498E-05\phi^6 - 7,10127812952003E-03\phi^5 + 3,80773818796550E-01\phi^4 - 1,07761862801635E+01\phi^3 + 1,69762543406978E+02\phi^2 - 1,41087958977747E+03\phi + 4,83566440375659E + 03$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ de 30° a 45°:

$$N_q = -7,28523130533176E-05\phi^6 + 1,58395061204822E-02\phi^5 - 1,41528078909398E+00\phi^4 + 6,67474151973798E+01\phi^3 - 1,75540183986699E+03\phi^2 + 2,44370109783662E+04\phi - 1,40784780738156E + 05$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

- Vesic 1977, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

Vesic propuso un método para estimar la capacidad de carga de punta de un pilote con base en la teoría de expansión de cavidades. Esta teoría se encuentra basada en parámetros de esfuerzo efectivo Das (2006).

Ecuaciones:

$$Q_p = A_p(c'N_c^* + \bar{\sigma}_{vk}'N_\sigma^*) \quad (2.4)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga por punta
A_p	Área transversal de la punta del pilote
c'	Cohesión efectiva
$\bar{\sigma}_{vk}'$	Esfuerzo efectivo normal medio a nivel de la punta del pilote = $\frac{1+2K_o}{3} * \bar{\sigma}_v'$
$\bar{\sigma}_v'$	Esfuerzo vertical efectivo en la punta del pilote.
K_o	Coefficiente de presión de tierra en reposo = $1 - \sin \phi'$
N_c^* y N_q^*	Factores de capacidad de carga

Para determinar el factor N_q^* , se emplea la Ecuación 2.5 (Bowles, 1996):

$$N_q^* = \frac{3}{3 - \sin \phi} \exp\left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \tan \phi\right] \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)^2 I_{rr}^{\frac{1.333 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (2.5)$$

$$N_\sigma^* = \frac{3N_q^*}{1 + 2k_o} \quad (2.6)$$

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \phi' \quad (2.7)$$

En caso de conocer la rigidez del suelo:

$$N_\sigma^* = f(I_{rr}) \quad (2.8)$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} \quad (2.9)$$

$$I_r = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)(c' + \sigma'_v \tan \phi')} = \frac{G_s}{c' + \sigma'_v \tan \phi'} \quad (2.10)$$

Donde:

Símbolo	Definición
I_{rr}	Índice de rigidez reducida para el suelo
I_r	Índice de rigidez
E_s	Módulo de elasticidad del suelo
μ_s	Relación de Poisson del suelo
G_s	Módulo cortante del suelo
Δ	Deformación volumétrica unitaria en la zona plástica debajo de la punta del pilote

Valores típicos I_r :

Cuando existe un suelo en condiciones sin cambio de volumen, por ejemplo, arena densa, $\Delta = 0,0$. Así que $I_{rr} = I_r$.

El valor de I_{rr} depende del estado del suelo y/o del esfuerzo normal medio definido por $n\bar{q}$, presentándose en arenas valores bajos de I_r por tanto valores bajos de $n\bar{q}$. Bowles (1996).

Para el análisis de este método se considerará entonces:

- Arenas en caso drenado y no drenado: $\Delta = 0,01$

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

Tabla 2.1: Valores estimados I_r tomado de Bowles (1996)

Tipo de suelo	I_r
Arena ($Dr = 0,5 - 0,8$)	75 - 150

Cuando se tenga una condición no drenada, es decir, $\phi = 0$:

$$N_c^* = \frac{4}{3}(\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (2.11)$$

- Janbu 1976, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

Los factores de capacidad de carga N_c^* y N_q^* se calculan definiendo una superficie de falla en el suelo en la punta del pilote similar a la Figura 2.9, Das (2006):

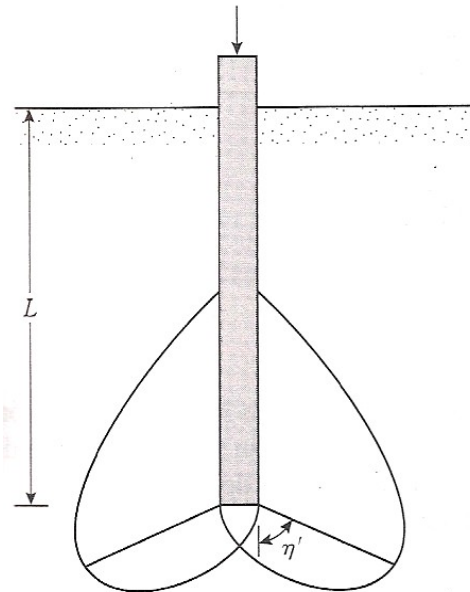


Figura 2.9: Superficie de falla en la punta del pilote Das (2006).

Ecuaciones:

$$Q_p = A_p(c'N'_c + \sigma'_v N'_q) \quad (2.12)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga por punta
A_p	Área transversal de la punta del pilote
c'	Cohesión efectiva del terreno
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
N'_c y N'_q	Factor dependiente del ángulo de fricción

Para determinar los factores N'_c y N'_q se emplean las siguientes ecuaciones:

$$N'_q = (\tan \phi' + \sqrt{1 + \tan^2(\phi')})^2 e^{2\eta' \tan \phi'} \quad (2.13)$$

$$N'_c = (N'_q - 1) \cot \phi' \quad (2.14)$$

Donde:

Símbolo	Definición
ϕ'	Ángulo efectivo de fricción
η'	Ángulo que varía de 60° en arcillas blandas a cerca de 105° en suelos arenosos densos.

Para usos prácticos se recomienda $60^\circ \leq \eta' \leq 90^\circ$

- **Coyle y castello 1981, tomado de Das (2006):**

Consideraciones:

Para estimar Q_p en arenas, Coyle y Castello analizaron 24 pruebas de carga en campo a gran escala de pilotes hincados en arena, trabajando con ángulos de fricción Das (2006).

Ecuaciones:

$$Q_p = \sigma'_v N'_q A_p \quad (2.15)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga de punta
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo a nivel de la punta del pilote.
N'_q	Factor dependiente del ángulo de fricción
A_p	Área transversal de la punta del pilote

Para determinar el factor N_q^* , Coyle y Castello presentan la variación de N_q con $\frac{L}{D}$ y el ángulo de fricción del suelo ϕ como se observa en la Figura 2.10.

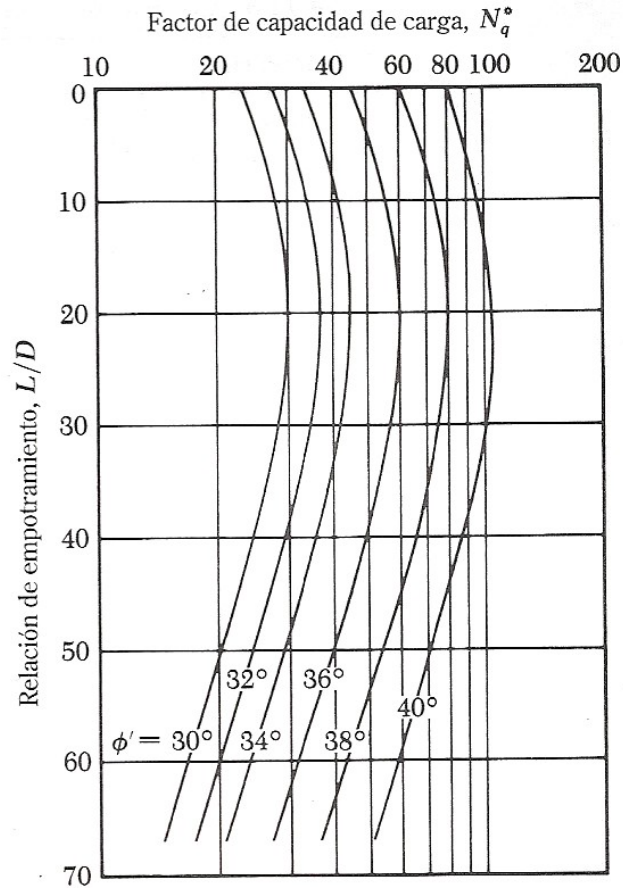


Figura 2.10: Variación de N_q^* con $\frac{L}{D}$ según Coyle y Castello Das (2006).

La Figura 2.10 propuesta por Coyle y Castello en donde se relaciona N_q y $\frac{L}{D}$, fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones.

Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de sexto orden como se muestra en la Figura 2.11:

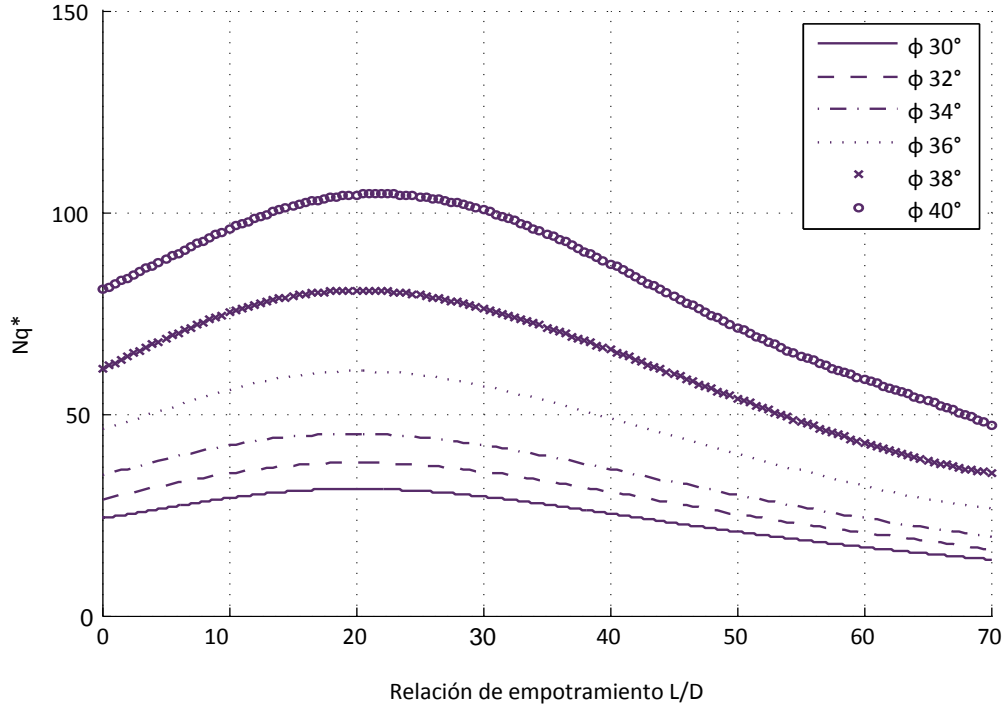


Figura 2.11: Modificación de la variación de N_q^* con $\frac{L}{D}$ según Coyle y CastelloDas (2006).

La Figura 2.11 se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para $D = \{ \frac{L}{D} \epsilon R/0 < \frac{L}{D} < 70 \}$:

ϕ 30°:

$$N_q = 2,199493832265E-09 \frac{L}{D}^6 - 5,759655565398E-07 \frac{L}{D}^5 + 5,670205843919E-05 \frac{L}{D}^4 - 2,395064349632E-03 \frac{L}{D}^3 + 2,635550066229E-02 \frac{L}{D}^2 + 4,295407571810E-01 \frac{L}{D} + 2,406497349595E+01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 32°:

$$N_q = 9,625458587733E-10 \frac{L}{D}^6 - 3,333316039343E-07 \frac{L}{D}^5 + 3,873567416105E-05 \frac{L}{D}^4 - 1,728893795846E-03 \frac{L}{D}^3 + 1,012145349576E-02 \frac{L}{D}^2 + 6,844380761074E-01 \frac{L}{D} + 2,878290995370E+01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 34°:

$$N_q = 2,198514978738E-09 \frac{L^6}{D} - 5,739380183413E-07 \frac{L^5}{D} + 5,604115390291E-05 \frac{L^4}{D} - 2,249850331541E - 03 \frac{L^3}{D} + 1,246904721701E - 02 \frac{L^2}{D} + 7,992185034989E - 01 \frac{L}{D} + 3,476133229551E + 01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 36°:

$$N_q = 6,16235559646E-09 \frac{L^6}{D} - 1,481612160240E-06 \frac{L^5}{D} + 1,362468582462E-04 \frac{L^4}{D} - 5,536139781650E - 03 \frac{L^3}{D} + 6,557983982319E - 02 \frac{L^2}{D} + 7,385137212196E - 01 \frac{L}{D} + 4,642208988344E + 01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 38°:

$$N_q = 4,862383746508E-09 \frac{L^6}{D} - 1,174466941385E-06 \frac{L^5}{D} + 1,090870859421E-04 \frac{L^4}{D} - 4,309784758596E - 03 \frac{L^3}{D} + 2,736545354616E - 02 \frac{L^2}{D} + 1,443882631212E + 00 \frac{L}{D} + 6,122011898964E + 01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 40°:

$$N_q = -6,391169290847E - 10 \frac{L^6}{D} - 3,030484416909E - 07 \frac{L^5}{D} + 7,088189539558E - 05 \frac{L^4}{D} - 4,412496661798E - 03 \frac{L^3}{D} + 5,514207650524E - 02 \frac{L^2}{D} + 1,318696815758E + 00 \frac{L}{D} + 8,086303589248E + 01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

- Tomlinson y John Woodward 2008, tomado del libro Tomlinson and J. (2008):

Consideraciones:

En este método se tienen en cuenta factores de corrección por forma y factores debidos al esfuerzo de confinamiento en la base del pilote.

2.5. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE

Ecuaciones:

$$Q_p = N_q \sigma'_v A_p + 0,5 K_s \sigma'_v \tan(\delta) A_s \quad (2.16)$$

Donde:

Símbolo	Definición
N_q	Factor de capacidad portante.
σ'_v	Esfuerzo efectivo de la presión de confinamiento a nivel de la base del cimiento.
K_s	Coefficiente del esfuerzo de confinamiento
A_p	Área transversal de la punta del pilote.
A_s	Área superficial de contacto.
δ	Valor característico o valor promedio del ángulo de fricción entre la pila y el suelo.

Es importante considerar que el K_s depende de la densidad relativa del suelo y del estado de consolidación del suelo.

Los factores N_q y K_s son empíricos y basados en correlaciones con pruebas de cargas estáticas y δ es obtenido de correlaciones empíricas con pruebas en campo.

El factor N_q depende del ángulo de fricción del suelo y la relación entre la profundidad y el diámetro del pilote. Este factor de capacidad portante se determina a partir de la Figura 2.12:

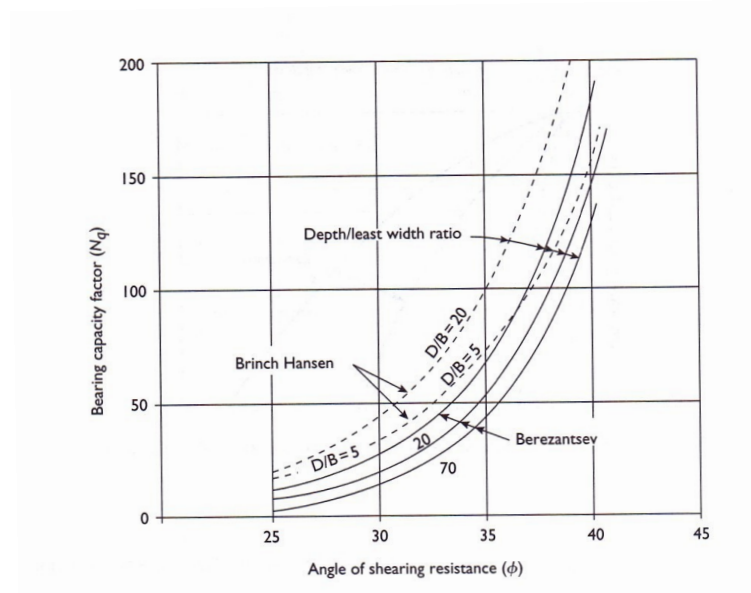


Figura 2.12: Factor de capacidad portante propuestos por Berezantsev y Brinch Hansen. Tomlinson and J. (2008).

La gráfica propuesta por Berezantsev, en donde se relaciona N_q y el ángulo de fricción del suelo fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones.

Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de cuarto orden como se observa en la Figura 2.13.

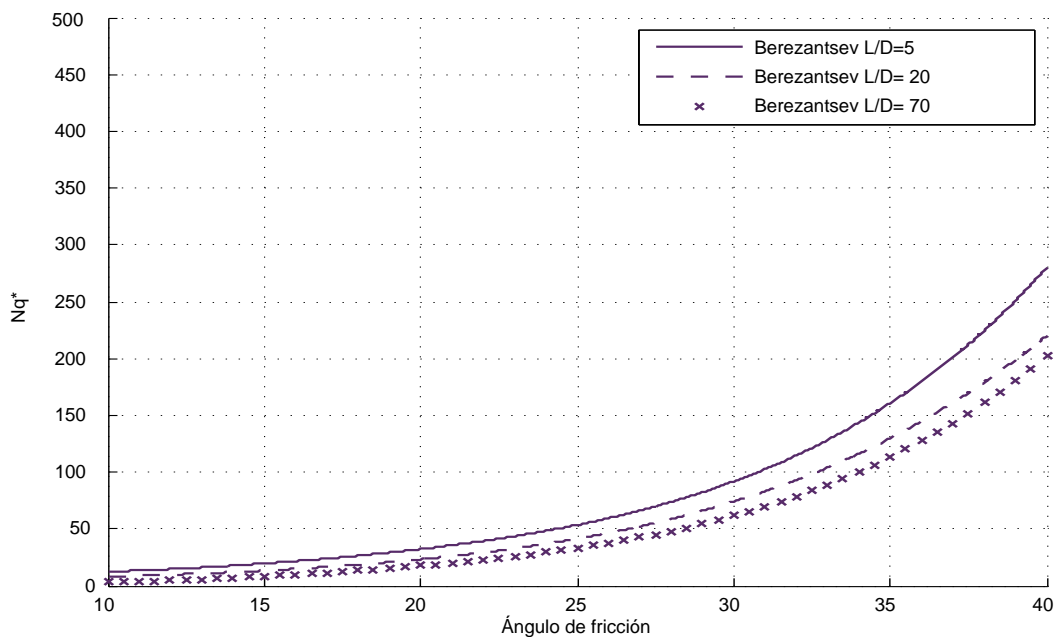


Figura 2.13: Factor de capacidad portante propuestos por Berezantsev y Brinch Hansen. Modificado de Tomlinson and J. (2008).

La anterior gráfica se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para $D = \{ \phi \epsilon R/10 < \phi < 40 \}$:

Para L/D = 70

$$N_q = 2,68091687E-03\phi^4 - 2,98770507E-01\phi^3 + 1,27050465E+01\phi^2 - 2,41674575E+02\phi + 1,72452863E+03$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

Para L/D = 20

$$N_q = 1,80323841E-03\phi^4 - 1,87741384E-01\phi^3 + 7,56986815E+00\phi^2 - 1,38221683E+02\phi + 9,60897994E + 02$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

Para L/D = 5

$$N_q = 3,51493578E-03\phi^4 - 3,92781225E-01\phi^3 + 1,67783716E+01\phi^2 - 3,21023510E+02\phi + 2,31488783E + 03$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

Para seleccionar el valor de K_o se muestran en la Figura 2.2 algunos valores típicos para una arena normalmente consolidada :

Tabla 2.2: Valores típicos para arenas normalmente consolidadas tomado de Tomlinson and J. (2008)

Densidad relativa	K_o
Pobre	0,5
Media-Densa	0,45
Densa	0,35

Para determinar el valor de K_s se presentan algunos valores típicos para pilotes en suelos granulares:

Tabla 2.3: Valores del coeficiente de esfuerzos horizontales. Tomado de Tomlinson and J. (2008)

Método de instalación	$\frac{K_s}{K_o}$
Pilotes hincados con grandes desplazamientos	1 – 2
Pilotes hincados con bajos desplazamientos	0,75 – 1,25
Pilotes perforados y fundidos in situ	0,7 – 1
Pilotes inyectados (Jetted piles)	0,5 – 0,7

Para determinar el valor característico o valor promedio del ángulo de fricción entre la pila y el suelo (δ), se presenta la Tabla 2.4:

Tabla 2.4: Valores del ángulo de fricción entre la pila y el suelo. Tomado de Tomlinson and J. (2008)

Condición de la interface del suelo	δ
Pilotes prefabricados de concreto / arena	$0,8\phi - 1\phi$
Pilotes vaciados in-situ concreto / arena	1ϕ

2.5.1.1.2 CAPACIDAD POR FUSTE Q_f

- Coyle y castello 1981, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

Coyle y Castello analizaron 24 pruebas de carga en campo a gran escala de pilotes hincados en arena, trabaja con ángulos de fricción Das (2006).

Ecuaciones:

$$Q_s = f_{prom}pL = (K\bar{\sigma}'_v \tan \delta)pL \quad (2.17)$$

Donde:

Símbolo	Definición
f_{prom}	Resistencia unitaria por fricción a una profundidad z
p	Perímetro de la sección del pilote
L	Longitud incremental del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes.
K	Coefficiente de presión lateral de tierras
$\bar{\sigma}'_v$	Presión de sobrecarga efectiva promedio.
δ	Ángulo de fricción entre suelo y pilote = $0,8\phi'$

El coeficiente K de presión lateral de tierra fue determinado por Coyle y Castello mediante observaciones en campo. Estos resultados se presentan en la Figura 2.14:

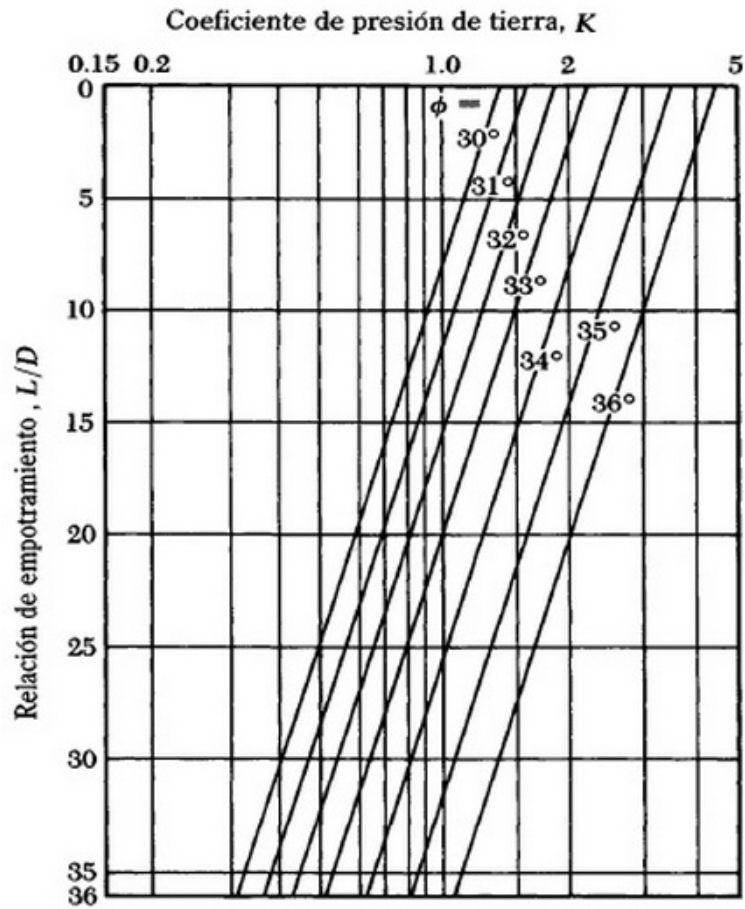


Figura 2.14: Variación de K con $\frac{L}{D}$ según Coyle y CastelloDas (2006).

La Figura 2.14 propuesta por Coyle y Castello en donde se relaciona el coeficiente de presión de tierra K y la relación de empotramiento $\frac{L}{D}$, fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones. Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de sexto orden como se puede apreciar en la Figura 2.15.

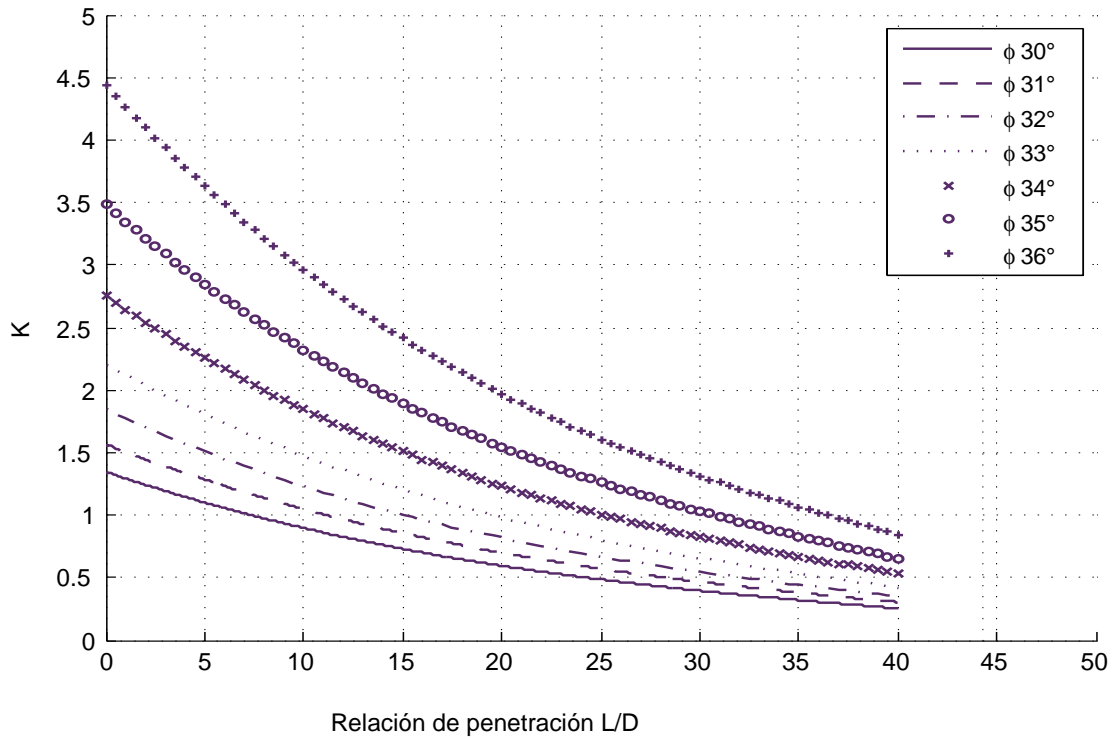


Figura 2.15: Variación de K con $\frac{L}{D}$ según Coyle y CastelloDas (2006).

La Figura 2.15 gráfica se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para el dominio $D = \{ \frac{L}{D} \in \mathbb{R} / 0 < \frac{L}{D} < 40 \}$:

ϕ 30° :

$$K = -7,537015E - 06 \frac{L}{D}^3 + 9,646458E - 04 \frac{L}{D}^2 - 5,384066E - 02 \frac{L}{D} + 1,347309E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 31° :

$$K = -7,989721E - 06 \frac{L}{D}^3 + 1,071307E - 03 \frac{L}{D}^2 - 6,163729E - 02 \frac{L}{D} + 1,568427E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 32°:

$$K = -1,045227E - 05 \frac{L}{D}^3 + 1,322119E - 03 \frac{L}{D}^2 - 7,344642E - 02 \frac{L}{D} + 1,842595E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 33°:

$$K = -1,223695E - 05 \frac{L}{D}^3 + 1,563482E - 03 \frac{L}{D}^2 - 8,754502E - 02 \frac{L}{D} + 2,206557E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 34°:

$$K = -1,500573E - 05 \frac{L}{D}^3 + 1,923947E - 03 \frac{L}{D}^2 - 1,083921E - 01 \frac{L}{D} + 2,750458E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 35°: $K = -2,065425E - 05 \frac{L}{D}^3 + 2,547476E - 03 \frac{L}{D}^2 - 1,395831E - 01 \frac{L}{D} + 3,482796E + 00$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ 36°:

$$K = -2,473145E - 05 \frac{L}{D}^3 + 3,163114E - 03 \frac{L}{D}^2 - 1,767339E - 01 \frac{L}{D} + 4,435874E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

- Reese y O'Neill 1989, tomado de Coduto (1994):

Consideraciones:

Esta es una metodología para pilotes preexcavados la cual tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- El proceso de excavación del pilote deja una superficie del suelo irregular, por lo que la relación $\frac{\phi_s}{\phi}$ deberá ser más alta que para los pilotes hincados.

-El proceso de construcción alivia los esfuerzos laterales en el suelo, mientras que la instalación del pilote aumenta estos esfuerzos. Por lo tanto, la relación $\frac{K}{K_o}$ para el pilote será inferior a la de los pilotes hincados.

Ecuaciones:

La siguiente ecuación representa la resistencia unitaria superficial en suelos arcillosos:

$$f = \beta * \sigma'_v \quad (2.18)$$

Por tanto la resistencia por fuste se calcula como:

$$Q_s = \sum fp\Delta L = \sum \beta * \sigma'_v p \Delta L \quad (2.19)$$

Donde:

Símbolo	Definición
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
p	Perímetro del pilote
ΔL	Longitud del estrato.

Reese y O'Neill propusieron una ecuación empírica para determinar β :

$$\beta = 1,5 - 0,135 \sqrt{\frac{z}{B_r}} \quad 0,25 \leq \beta \leq 1,2 \quad (2.20)$$

Donde:

Símbolo	Definición
z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el punto medio de los estratos.
B_r	Ancho de referencia=300mm.

2.5.1.2. SUELOS FINOS

2.5.1.2.1 CAPACIDAD POR PUNTA Q_p

- Meyerhof 1976, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

Las siguientes ecuaciones son consideradas para arcillas. Se encuentran afectadas por un factor dependiente del ángulo de fricción.

Ecuaciones:

$$Q_p = N_c^* c_u A_p \quad (2.21)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga por punta
N_c^*	Factor dependiente del ángulo de fricción
c_u	Cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.
A_p	Área transversal de la punta del pilote

Para arcillas saturadas bajo condiciones no drenadas, es decir, cuando el ángulo efectivo de fricción es 0 ($\phi' = 0$), se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_p = 9c_u A_p \quad (2.22)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga de punta
c_u	Cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.
A_p	Área transversal de la punta del pilote

Para determinar el factor N_c^* , se emplea la Figura 2.16.

Nótese que la gráfica propuesta por Meyerhof, en donde se relaciona N_c y el ángulo de fricción del suelo fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones. Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de sexto orden.

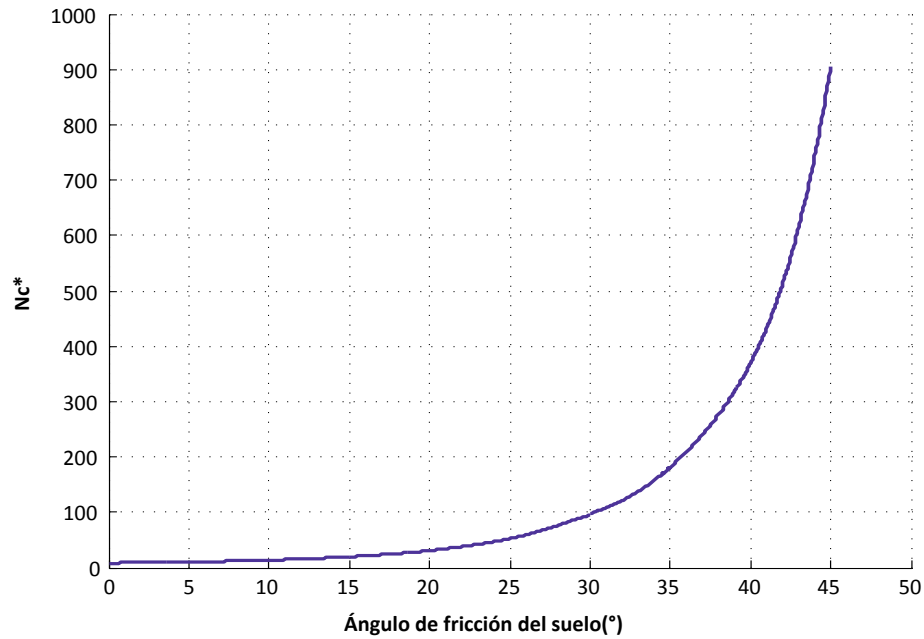


Figura 2.16: Variación de N_c^* con el ángulo de fricción modificado de Meyerhof Das (2006).

La Figura 2.16 se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para los dominios presentados:

ϕ de 0° a 15° :

$$N_c = 4,99379047114168E-06\phi^6 - 2,36265375303112E-04\phi^5 + 4,37104113668356E-03\phi^4 - 3,80017281973268E-02\phi^3 + 1,83098792177713E-01\phi^2 - 3,41754348016958E-02\phi + 8,71492067344850E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ de 15° a 30° :

$$N_c = -6,75583647513633E-05\phi^6 + 8,86408960919932E-03\phi^5 - 4,79462415180134E-01\phi^4 + 1,36976989911903E+01\phi^3 - 2,17938088125063E+02\phi^2 + 1,83209700447781E+03\phi - 6,34484074040627E + 03$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

ϕ de 30° a 45°:

$$N_c = -1,68965701519141E-04\phi^6 + 3,88103351656970E-02\phi^5 - 3,67238972561327E+00\phi^4 + 1,83568902329009E+02\phi^3 - 5,11748475485324E+03\phi^2 + 7,54964902905567E+04\phi - 4,60701681952209E+05$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

▪ **Janbu 1976, tomado de Das (2006):**

Remitirse al ítem 2.5.1.1.1

▪ **Reese y O'Neill 1989, tomada de Coduto (1994):**

Consideraciones:

Reese y O'Neill elaboraron una ecuación empírica para determinar la capacidad por punta en suelos cohesivos.

Ecuaciones:

Para $D < 1900$ mm:

$$Q_p = N_c^* c_u A_p \leq 4000 \text{ KPa} \quad (2.23)$$

Donde:

Símbolo	Definición
N_c^*	Factor de capacidad de carga.
c_u	Cohesión no drenada del suelo .

c_u debe ser tomada debajo de la punta del pilote a una distancia de $2B_b$ debajo de la base.

El factor de capacidad de carga N_c se determina empleando la Ecuación 2.24:

$$N_c^* = 6 \left[1 + 0,2 \frac{L}{D} \right] \leq 9 \quad (2.24)$$

Donde:

Símbolo	Definición
L	Longitud del pilote.
D	Diámetro de la base del pilote.

Para $D > 1900$ mm:

Si la base del pilote es mayor a 1900 mm de diámetro, el valor Q_p podría resultar con asentamientos mayores a 25 mm, lo cual podría ser inaceptable para cualquier construcción. Así que para mantener los asentamientos dentro de los límites tolerables, el valor de Q_p debe ser reducido a la ecuación mostrada a continuación:

$$Q'_p = F_r Q_p \quad (2.25)$$

$$F_r = \frac{2,5}{120\Psi_1 \frac{D}{B_r} + \Psi_2} \leq 1 \quad (2.26)$$

$$\Psi_1 = 0,0071 + 0,0021 \frac{L}{D} \leq 0,015 \quad (2.27)$$

$$\Psi_2 = 1,59 \sqrt{\frac{S_u}{\sigma_r}} \quad (2.28)$$

$$0,5 \leq \Psi_2 \leq 1,5$$

Donde:

Símbolo	Definición
B_r	Ancho de referencia= 300 mm
L	Longitud del pilote.
D	Diámetro de la base del pilote.

■ Tomlinson y John Woodward 2008, tomado de Tomlinson and J. (2008):

Consideraciones:

Cuando un pilote se introduce en un suelo de grano fino, el suelo se desplaza lateralmente y en una dirección ascendente, inicialmente en una medida igual al volumen de la pila

que entra en el suelo. La arcilla cerca de la superficie del pilote es ampliamente remodelada y las altas presiones de poros pueden tomar semanas o meses para disiparse. Durante este tiempo la fricción del pilote y la capacidad portante, en la medida en que están relacionados con la presión de sobrecarga efectiva, se desarrollan lentamente.

Ecuaciones:

$$Q_p = N_c c_{ub} A_p \tag{2.29}$$

Donde:

Símbolo	Definición
N_c	Factor de capacidad portante.
c_{ub}	Esfuerzo cortante no drenado en la base del pilote.
A_p	Área transversal de la punta del pilote

N_c se supone como 9 si el pilote esta enterrado a una profundidad mayor a 5 veces el diámetro.

▪ **Vesic 1977, tomado de Das (2006):**

Remitirse al item 2.5.1.1.1

Valores típicos I_r :

Cuando existe un suelo en condiciones sin cambio de volumen, por ejemplo, arcilla saturada, $\Delta = 0,0$. Así que $I_{rr} = I_r$.

El valor de I_{rr} depende del estado del suelo y/o del esfuerzo normal medio definido por $n\bar{q}$, presentandose en arcillas valores altos de I_r por tanto valores altos de $n\bar{q}$. El valor más pequeño de I_r es aproximadamente 10 y es usado para arcillas con un elevado OCR y un bajo $n\bar{q}$ Bowles (1996).

Para el análisis de este método se considerará entonces:

- Arcillas en caso no drenado: $\Delta = 0,0$
- Arcillas en caso drenado : $\Delta = 0,1$

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

Tabla 2.5: Valores estimados I_r tomado de Bowles (1996)

Tipo de suelo	I_r
<i>Limo</i>	50 – 75
<i>Arcilla</i>	150 – 250

Cuando se tenga una condición no drenada, es decir, $\phi = 0$:

$$N_c^* = \frac{4}{3}(\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (2.30)$$

2.5.1.2.2 CAPACIDAD POR FUSTE Q_f

- Reese y O'Neill 1989, tomado de Coduto (1994):

Remitirse al ítem 2.5.1.1.2

- Michael Tomlinson y John Woodward 2008, tomado del libro Tomlinson and J. (2008):

Consideraciones:

Esta metodología tiene en cuenta un factor de corrección debido a la longitud del pilote.

Ecuaciones:

$$Q_s = F * \alpha_p * C_u * p * L \quad (2.31)$$

Donde:

Símbolo	Definición
F	Factor de longitud del pilote (permite la relación de flexibilidad y esbeltez del pilote).
α_p	Factor de adhesión.
C_u	Cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.
p	Perímetro de la sección del pilote
L	Longitud incremental del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes del pilote.

Para determinar el factor de longitud del pilote F se emplea la Figura 2.17:

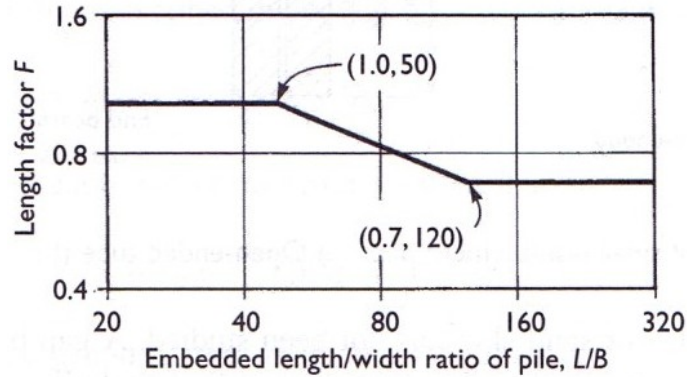


Figura 2.17: Factor de adhesión para pilotes hincados a la penetración profunda en arcillas. Factor de longitud. Tomlinson and J. (2008).

Se elaboró la Figura 2.18 para determinar el factor F , encontrándose ecuaciones lineales que representarían el comportamiento original de estas relaciones como se muestran a continuación, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación:

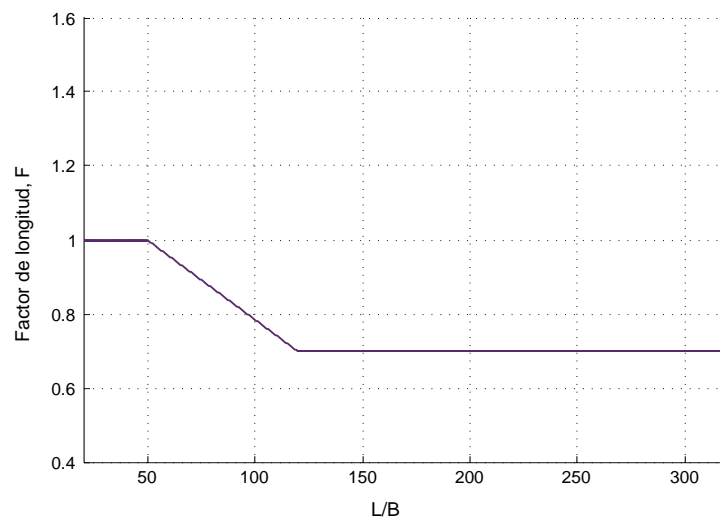


Figura 2.18: Factor de adhesión para pilotes hincados a la penetración profunda en arcillas. Factor de longitud. Modificada de Tomlinson and J. (2008).

Estas ecuaciones son únicamente válidas para los dominios presentados a continuación:

$\frac{L}{B}$ de 20 a 50:

$$F = 1$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

$\frac{L}{B}$ de 50 a 120:

$$F = \frac{-0,3}{70} \frac{L}{B} + 1,214$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

$\frac{L}{B}$ de 120 a 320:

$$F = 0,7$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

Para determinar el factor de α_p se emplea la Figura 2.19 gráfica:

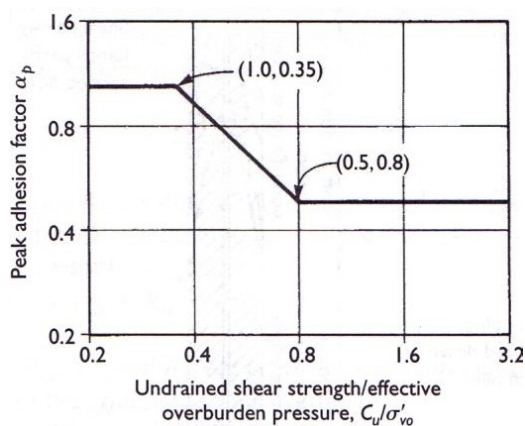


Figura 2.19: Factor de adhesión para pilotes hincados a la penetración profunda en arcillas. Factor de adhesión vs resistencia al corte sobre la presión de sobrecarga efectiva. Tomlinson and J. (2008).

Se elaboró la Figura 2.20 para determinar el factor α_p , encontrándose ecuaciones lineales que representaran el comportamiento original de estas relaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación.

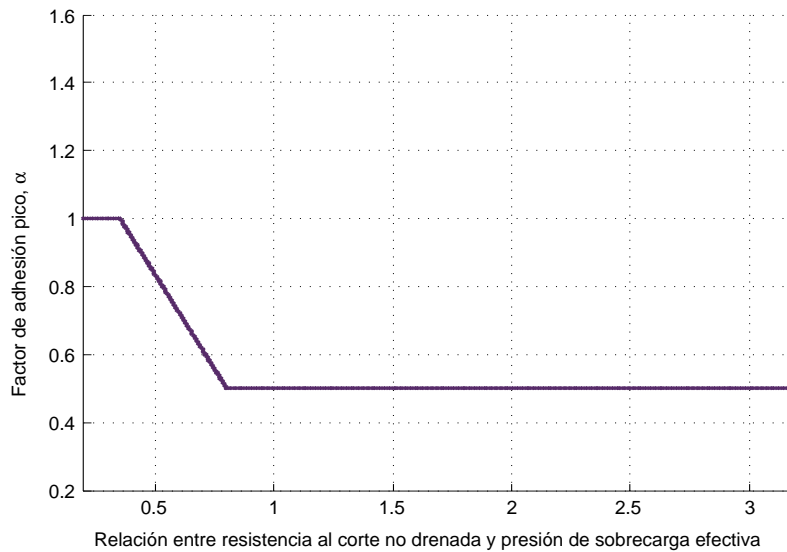


Figura 2.20: Factor de capacidad portante propuestos por Berezantsev y Brinch Hansen. Modificada de Tomlinson and J. (2008).

Estas ecuaciones son únicamente válidas para los dominios presentados:

$\frac{C_u}{\sigma'_{vo}}$ de 0.2 a 0.35:

$$\alpha_p = 1$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

$\frac{C_u}{\sigma'_{vo}}$ de 0.35 a 0.8:

$$\alpha_p = \frac{-0,5}{0,45} * \frac{C_u}{\sigma'_{vo}} + 1,39$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

$\frac{C_u}{\sigma'_{vo}}$ de 0.8 a 3.2:

$$\alpha_p = 0,5$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

- Método β 1973, tomado de Coduto (1994):

Consideraciones:

Cuando los pilotes se hincan en arcillas saturadas, la presión de poros en el suelo alrededor de los pilotes aumenta. Este exceso de presión de poro en arcillas normalmente consolidadas es de cuatro a seis veces C_u . Sin embargo, en aproximadamente un mes, esta presión se disipa gradualmente. Por consiguiente la resistencia unitaria por fricción en el pilote se determina con base en los parámetros de esfuerzo efectivo de la arcilla en un estado remoldeado (c=0)Das (2006).

Ecuaciones:

Por consiguiente la siguiente ecuación representa la resistencia unitaria superficial en suelos arcillosos a cualquier profundidad:

$$f_{prom} = \beta * \sigma'_v \quad (2.32)$$

$$\beta = K * \tan \phi_r \quad (2.33)$$

Donde:

Símbolo	Definición
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
ϕ_r	Ángulo de fricción drenado de la arcilla remoldeada.
K_o	Coefficiente de presión de tierras.

Conservadoramente, la magnitud K_o es el coeficiente de la presión de la tierra en reposo:

Para arcillas normalmente consolidadas:

$$K_o = 1 - \sin \phi_r \quad (2.34)$$

y para arcillas preconsolidadas:

$$K_o = 1 - \sin \phi_r \sqrt{OCR} \quad (2.35)$$

Donde:

Símbolo	Definición
OCR	Tasa de preconsolidación.

Combinando las ecuaciones anteriores:

Para arcillas normalmente consolidadas se tiene:

$$f_{prom} = (1 - \sin \phi_r) \tan \phi_r \sigma'_v \quad (2.36)$$

Para arcillas preconsolidadas se tiene:

$$f_{prom} = (1 - \sin \phi_r) \tan \phi_r \sqrt{OCR} * \sigma'_v \quad (2.37)$$

Bhusan (1982) sugirió la siguiente fórmula para pilotes preexcavados de alto desplazamiento en arenas Coduto (1994):

$$\beta = 0,18 + 0,65D_r \quad (2.38)$$

Donde:

Símbolo	Definición
D_r	Densidad realtiva para arenas expresada en forma decimal

Al determinar el valor de f se evalúa la resistencia por fricción como:

$$Q_s = \Sigma f_{prom} * p * \Delta L \quad (2.39)$$

- **Método α 1985, tomado de Coduto (1994):**

a *Pilotes hincados:*

Consideraciones:

Este método define la resistencia al fuste empleando un factor de adhesión α .

Algunos factores que afectan α según Coduto (1994):

- Remoldeo del suelo durante la construcción
- Consolidación del suelo que rodea el pilote durante la construcción
- Traspaso del suelo de una capa a otra en pilotes hincados
- Métodos para determinar c_u
- Tipo, diámetro, longitud y reducción del diámetro del pilote
- Tipo de proceso constructivo (Preexcavado o inyección a presión)

Ecuaciones:

La siguiente ecuación representa la resistencia unitaria superficial en suelos arcillosos:

$$f = \alpha * c_u \tag{2.40}$$

Por tanto la resistencia por fuste se calcula como:

$$Q_s = \sum fp\Delta L = \sum \alpha c_u p \Delta L \tag{2.41}$$

Donde:

Símbolo	Definición
f	Factor de adhesión= αc_u .
c_u	Cohesión no drenada.
p	Perímetro del pilote
ΔL	Espesor del estrato.

El mejor camino para determinar α , es llevar a cabo pruebas de carga in-situ sobre la pila y comparar la medición de la capacidad de la pila con el promedio del valor de c_u ya sea determinado en laboratorio o en ensayos in-situ.

Pero cuando la prueba de carga no se encuentra disponible, se debe determinar el valor de α de una función genérica de α . Usualmente se expresa únicamente en función de c_u (Sladen, 1992) como se muestra en la siguiente gráfica:

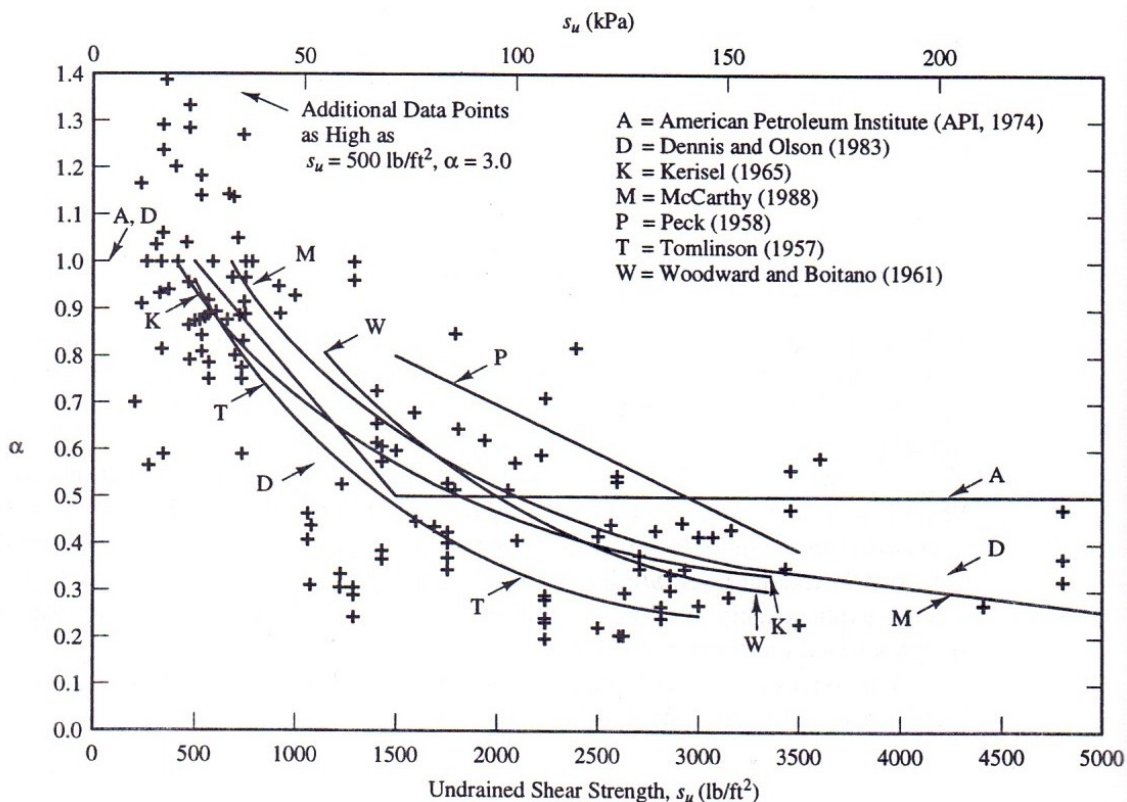


Figura 2.21: Funciones propuestas para el factor de adhesión α , comparados con los valores actuales de α y c_u obtenidos de pruebas de carga (Pruebas de cargas son adaptadas de Veis, 1977) Coduto (1994).

La función α propuesta por API(1974), mostrada en la Figura 2.21 es una de las funciones más comunes. Pero de acuerdo con Dennis y Olson (1983), a pesar de que el cálculo de capacidad en promedio sea correcto, la dispersión es muy amplia, siendo esta a veces tan baja como 1/3 de la capacidad actual y otras de hasta 3 veces más alta a la capacidad actual.

Por esta razón se decide emplear la función de α propuesta por Dennis y Olson (1983).

La figura 2.21 fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de dichas relaciones. Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de cuarto orden.

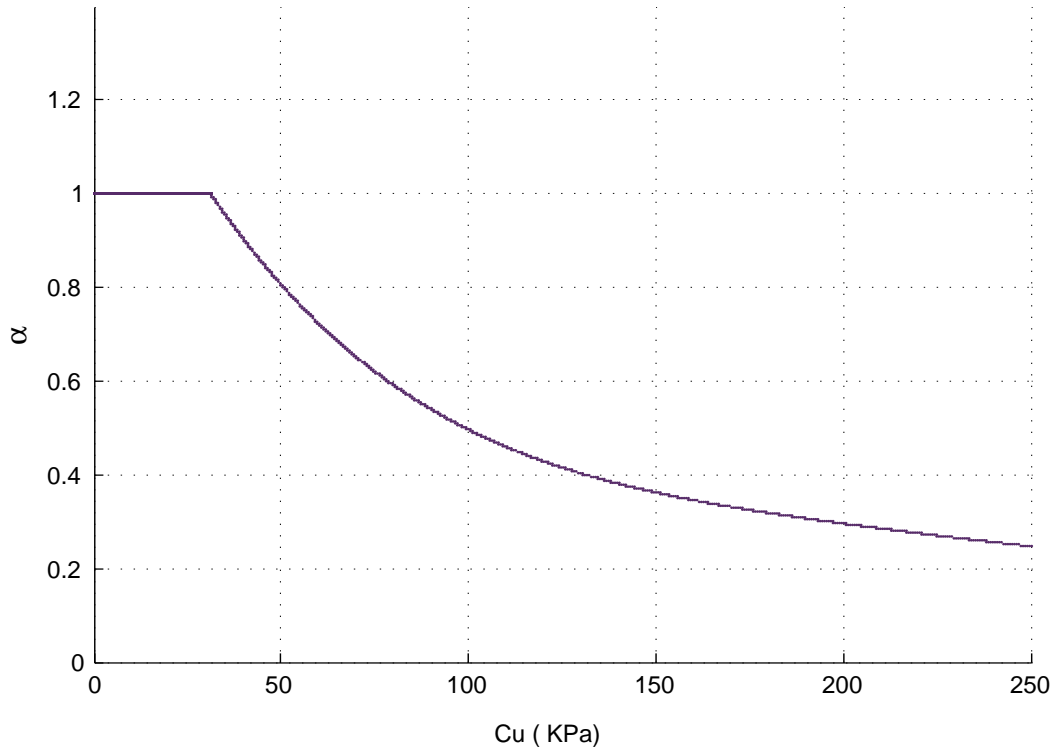


Figura 2.22: Función propuesta por Dennis y Olson (1983) para el factor de adhesión α , Modificado de Coduto (1994).

La Figura 2.22 se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para los dominios presentados:

C_u de 0 a 31.2 KPa:

$$\alpha = 1$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

C_u de 31.2 a 250 KPa:

$$\alpha = 3,78240572E - 10 * C_u^4 - 3,31984692E - 07 * C_u^3 + 1,11020645E - 04 * C_u^2 - 1,77480319E - 02 * C_u + 1,45524427E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

b Pilotes preexcavados:

Consideraciones:

Este método define la resistencia al fuste empleando un factor de adhesión α .

Ecuaciones:

La siguiente ecuación representa la resistencia unitaria superficial en suelos arcillosos:

$$f = \alpha * C_u \quad (2.42)$$

Por tanto la resistencia por fuste se calcula como:

$$Q_s = \sum fp\Delta L = \sum \alpha C_u p \Delta L \quad (2.43)$$

Donde:

Símbolo	Definición
f	αC_u
α	Factor de adhesión
C_u	Cohesión no drenada.
p	Perímetro del pilote
ΔL	Espesor del estrato.

Para determinar el factor α se emplea la siguiente gráfica para pilotes preexcavados:

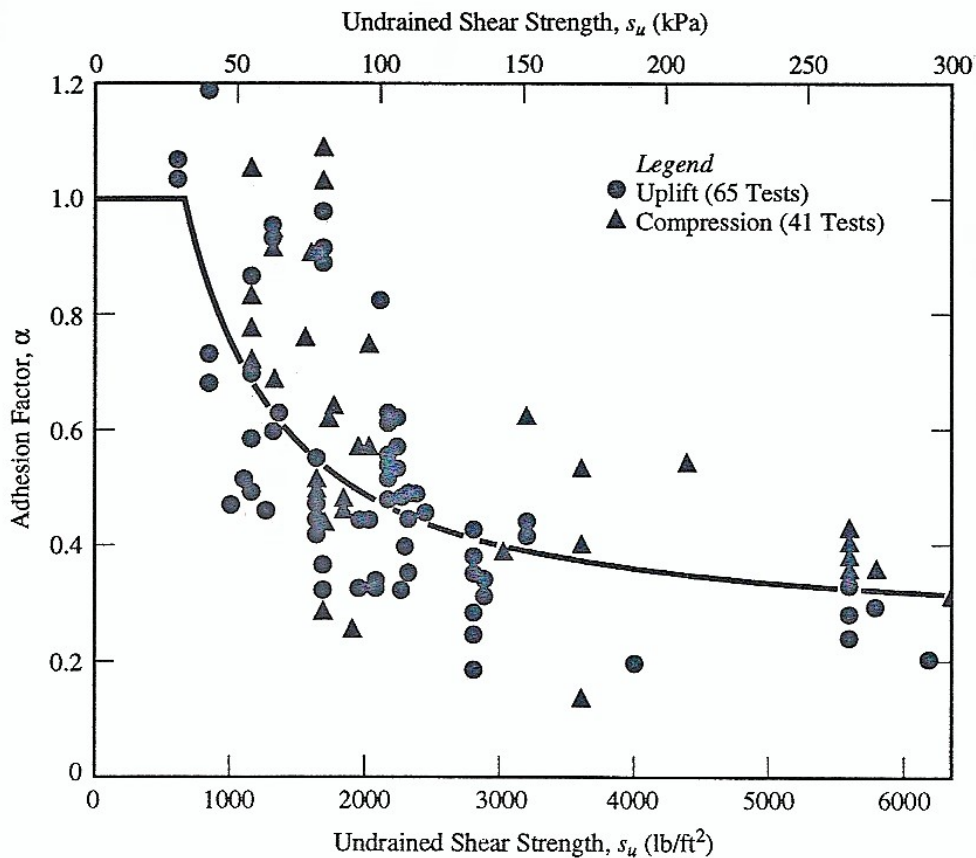


Figura 2.23: Variación de α con c_u en pilotes preexcavados (Adaptado de Kulhawy y Jackson) Coduto (1994).

La Figura 2.23 en donde se relaciona α con c_u , fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de dichas relaciones.

Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de sexto orden como se observa en la Figura 2.24.

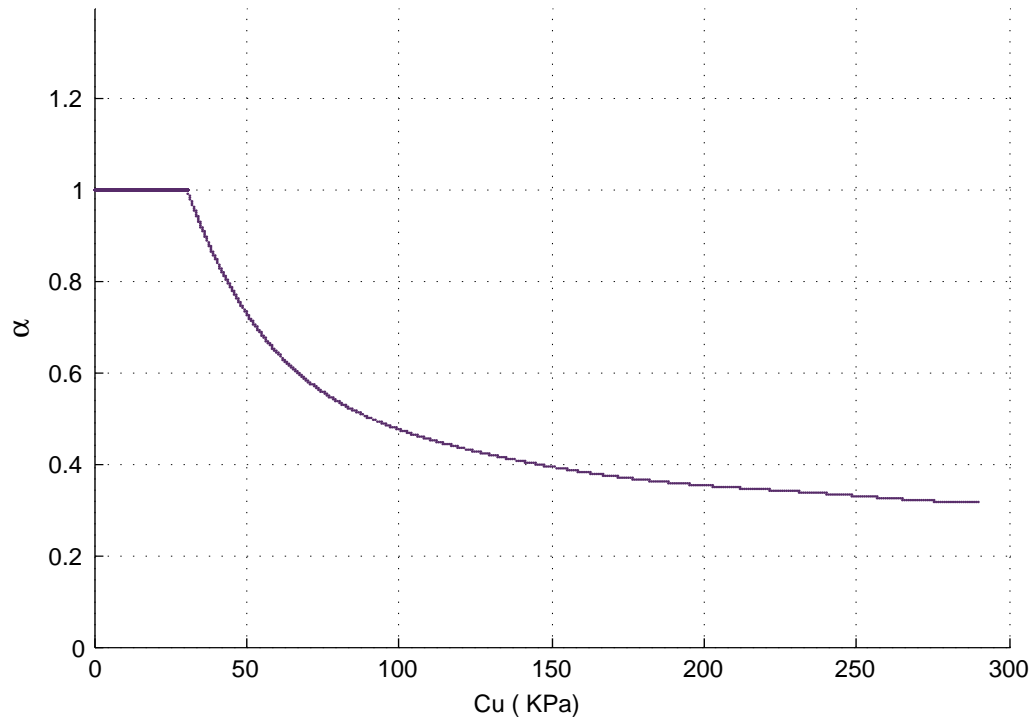


Figura 2.24: Variación de α con c_u . Modificado de Coduto (1994)

La Figura 2.24 se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación. Estas ecuaciones son únicamente válidas para los dominios presentados:

c_u de 0 a 30.9 KPa:

$$\alpha = 1$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

c_u de 30.9 a 290 KPa:

$$\alpha = 3,786611559E - 14 * C_u^6 - 4,207794602E - 11 * C_u^5 + 1,903879311E - 08 * C_u^4 - 4,515010467E - 06 * C_u^3 + 6,013687256E - 04 * C_u^2 - 4,458323295E - 02 * C_u + 1,915018634E + 00$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

▪ **Método λ 1972, tomado de Coduto (1994):**

Consideraciones:

Este método fue propuesto por Vijayvergiya y Focht(1972). 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.

Ecuaciones:

La resistencia unitaria superficial promedio es:

$$f_{prom} = \lambda(\bar{\sigma}'_v + 2c_u) \quad (2.44)$$

Donde:

$\bar{\sigma}'_v$: Esfuerzo vertical efectivo medio para toda la longitud de penetración

λ : Factor dependiente de la longitud del pilote.

c_u :Cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.

Por tanto:

$$Q_s = pL f_{prom} \quad (2.45)$$

Debe tenerse cuidado al obtener los valores de $\bar{\sigma}'_v$ y c_u en suelos estratificados. La Figura 2.25 ayuda a explicar la razón:

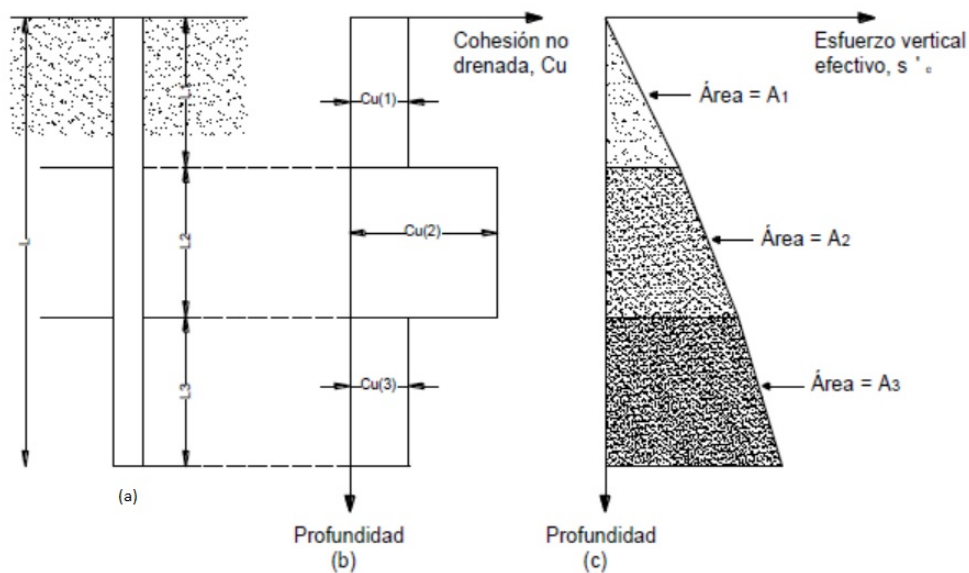


Figura 2.25: Aplicación del método λ en suelo estratificado Das (2006).

En la Figura 2.25(a) se muestra un pilote que penetra a tres estratos de arcillas.

En la Figura 2.25 (b) se muestra el valor medio de c_u el cual se calcula como:

$$\frac{c_{u(1)}L_1 + c_{u(2)}L_2 + c_{u(3)}L_3 + \dots + c_{u(n)}L_n}{L} \quad (2.46)$$

En la Figura 2.25 (c) se muestra la variación del esfuerzo efectivo con la profundidad, produciendo un esfuerzo medio efectivo calculado de la siguiente manera:

$$\bar{\sigma}'_v = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{L} \quad (2.47)$$

Para determinar el factor λ se emplea la Figura 2.26 propuesta por McClelland, 1974:

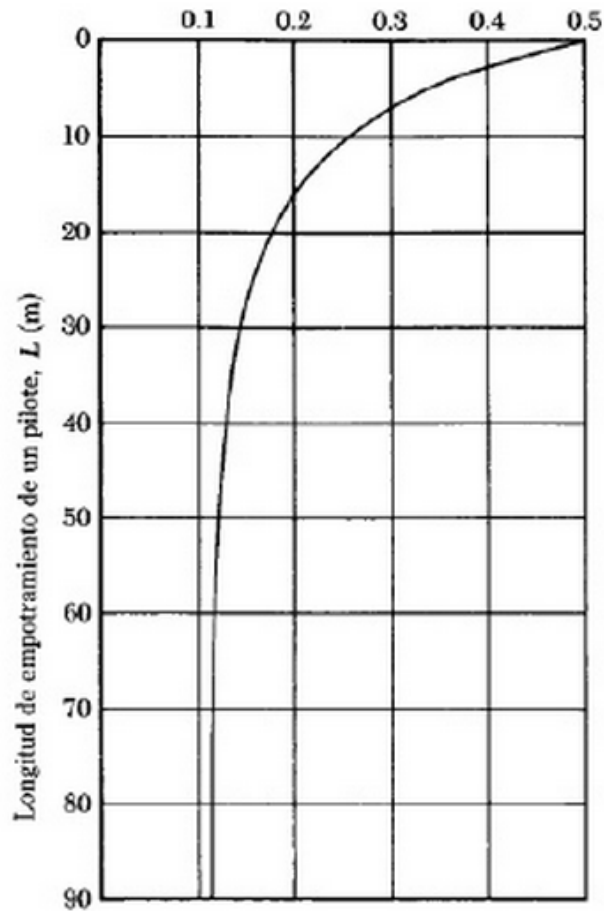


Figura 2.26: Variación de λ con la longitud de empotramiento de un pilote Das (2006).

La Figura 2.26 propuesta por McClelland, en donde se relaciona λ y la longitud de empotramiento del pilote fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones.

Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de sexto orden como se observa en la Figura 2.27.

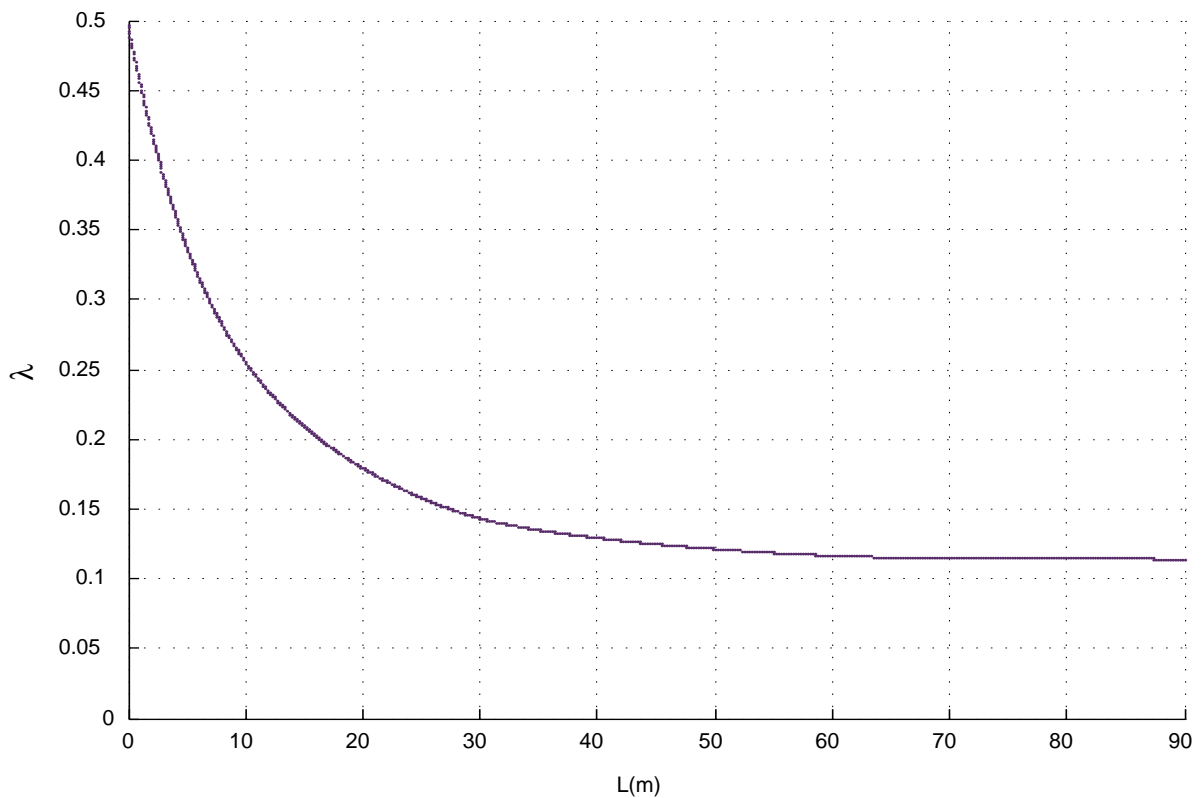


Figura 2.27: Variación de λ con la longitud de empotramiento de un pilote. Modificado de Das (2006).

La Figura 2.27 se encuentra descrita por las siguientes ecuaciones, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación:

L de 0 a 30 m:

$$\lambda = 1,82793952E - 10 * L^6 - 3,63644422E - 08 * L^5 + 2,89583736E - 06 * L^4 - 1,20138308E - 04 * L^3 + 2,89226613E - 03 * L^2 - 4,36000069E - 02 * L + 4,96658921E - 01$$

Con :
 $R^2 = 1,000$

L de 30 a 90 m:

$$\lambda = 4,22484139E - 12 * L^6 - 1,64175208E - 09 * L^5 + 2,59573158E - 07 * L^4 - 2,15029789E - 05 * L^3 + 1,00276243E - 03 * L^2 - 2,60278438E - 02 * L + 4,28288934E - 01$$

Con :
 $R^2 = 1,000$

2.5.2. ANÁLISIS BASADO EN ENSAYOS IN SITU

2.5.2.1. SPT

2.5.2.1.1 CAPACIDAD POR PUNTA Q_p

- Briaud 1985, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

El ensayo de penetración estándar no parece ser un indicador fiable de la capacidad de pilotes en suelos cohesivos Coduto (1994).

Ecuaciones:

Briaud propuso la siguiente fórmula para evaluar la capacidad unitaria por punta:

$$q_p = 19,7 * \sigma'_v * N1_{60}^{0,36} \quad (2.48)$$

Donde:

Símbolo	Definición
q_p	Capacidad de carga por punta unitaria
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
$N1_{60}$	Valor corregido promedio de la resistencia a la penetración estándar.

Siendo la capacidad por punta total:

$$Q_p = q_p * A_p \quad (2.49)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga por punta
A_p	Área transversal de la punta del pilote

- Meyerhof 1976, tomado de Das (2006):

Ecuaciones:

Con base en observaciones de campo (1976). Meyerhof sugirió que la capacidad por punta Q_p en un suelo granular homogéneo ($L = L_b$) puede obtenerse a través de números de penetración estándar como, Das (2006):

$$Q_p = 0,4PaN_{160} \frac{L}{D} \leq 4PaN_{160} \quad (2.50)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga por punta
Pa	Presión atmosférica ($100kN/m^2$ o $2000lb/pie^2$)
N_{160}	Valor promedio corregido del número de penetración estándar
L	Longitud de empotramiento en el estrato de apoyo.
D	Diámetro del pilote.

El N_{160} debe ser tomado cerca de la punta del pilote (aproximadamente 10D arriba y 4D debajo de la punta del pilote).

- Reese y O´Neill 1989, tomado de Coduto (1994):

Consideraciones:

La capacidad portante final para pilotes preexcavados en suelos no cohesivos es menor que para los pilotes hincados porque:

- El suelo es perturbado por el proceso de preexcavado.
- La compresión del suelo que se produce por debajo de los pilotes no está presente
- Existe un descanso temporal en el esfuerzo mientras la excavación se encuentra abierta.

- El diámetro y la profundidad de influencia son mayores

Estos y otros factores no habían sido considerados, así que la simple y conservativa formulación empírica de Reese y O'Neill presentada a continuación representa un nivel apropiado de sofisticación para el desarrollo del método Coduto (1994).

Ecuaciones:

$$Q_p = 0,6\sigma_r N_{160} \leq 4500kN/m^2 \quad (2.51)$$

Donde:

Símbolo	Definición
σ_r	Esfuerzo de referencia= 100kPa.
N_{160}	Valor promedio corregido del número de penetración estándar

El valor N_{160} debe estar cerca de la punta del pilote (a una profundidad aproximadamente 2 veces el diámetro de la base del pilote debajo de este)

Si la base del pilote es mayor a 1200 mm de diámetro, el valor Q_p podría resultar con asentamientos mayores a 25 mm, lo cual podría ser inaceptable para cualquier construcción. Así que para mantener los asentamientos dentro de los límites tolerables, el valor de Q_p debe ser reducido a la ecuación mostrada a continuación:

$$Q'_p = 4,17 \frac{B_r}{D} Q_p \quad (2.52)$$

Donde:

Símbolo	Definición
B_r	Ancho de referencia= 300 mm
D	Diámetro de la base del pilote preexcavado (Debe ser mayor a 1200 mm)

- **Michael Tomlinson y John Woodward 2008, tomado del libro Tomlinson and J. (2008):**

La relación entre el SPT y el ángulo de fricción establecida por Peck es mostrada en la siguiente figura:

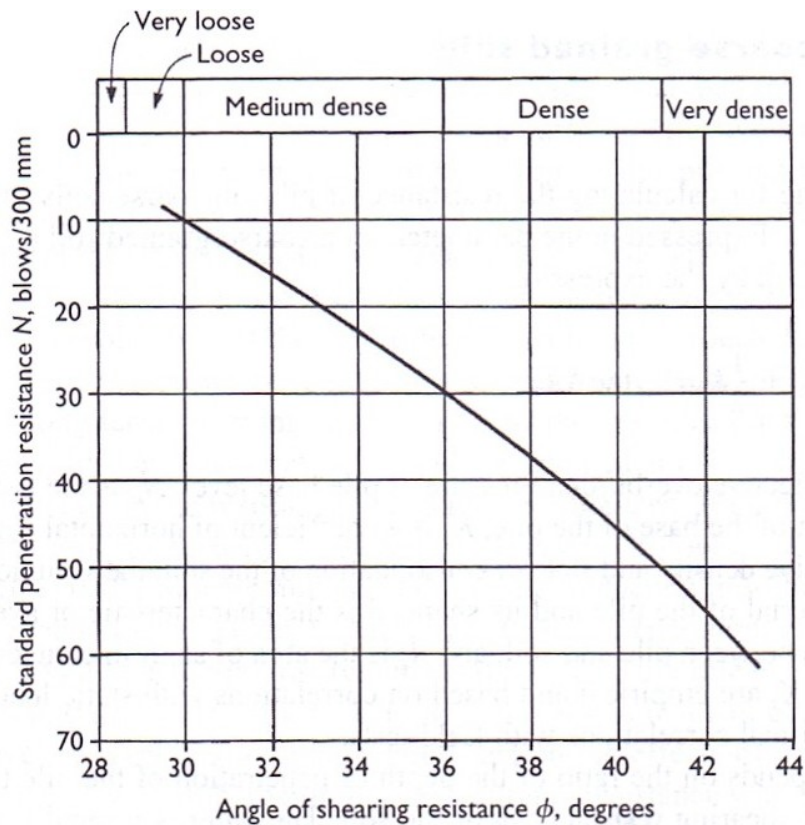


Figura 2.28: Relación entre SPT y el ángulo de fricción ϕ . Tomlinson and J. (2008).

Nótese que la gráfica propuesta por Peck, en donde se relaciona *SPT* y el ángulo de fricción del suelo fue modificada para encontrar ecuaciones que representaran el comportamiento original de estas relaciones. Para esto se establecieron ejes lineales y ecuaciones polinómicas de segundo orden como se aprecia en la Figura 2.29.

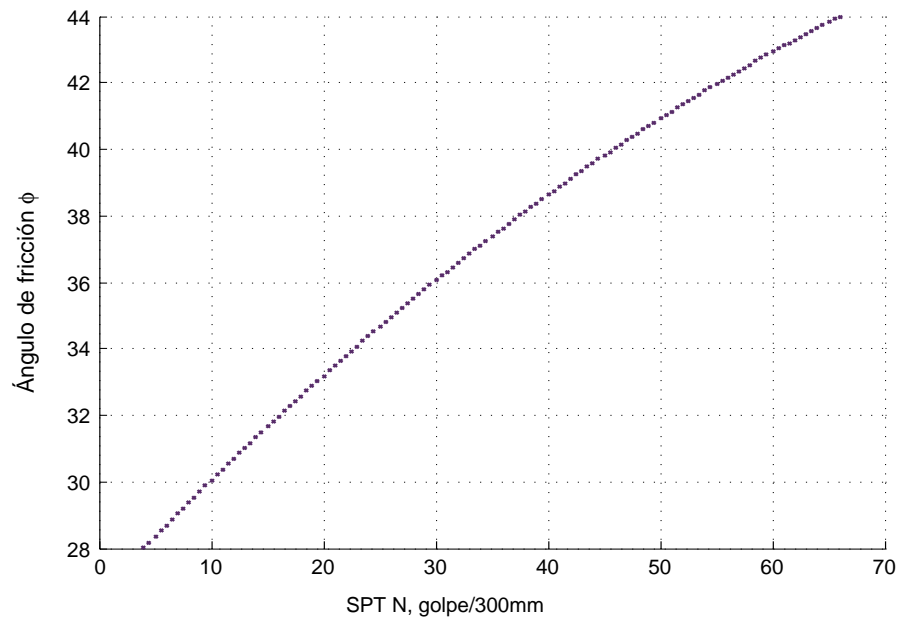


Figura 2.29: Relación entre SPT y el ángulo de fricción ϕ .Modificada de Tomlinson and J. (2008).

La Figura 2.29 se encuentra descrita por la siguiente ecuación, la cual es válida únicamente en el rango presentado de la anterior gráfica, donde R representa el coeficiente de correlación de la ecuación,:

$$\phi = -1,4288E - 03 * N_{60}^2 + 3,5776E - 01 * N_{60} + 2,6606E + 01$$

Con :

$$R^2 = 1,000$$

Estos valores de ángulo de fricción son aplicables en la ecuación 2.16 para determinar la capacidad por punta del pilote.

2.5.2.1.2 CAPACIDAD POR FUSTE Q_f

- **Briaud 1985, tomado de Das (2006):**

Consideraciones:

Remitirse al ítem 2.5.2.1.1

Ecuaciones:

Briaud propuso la siguiente fórmula para evaluar la capacidad unitaria por fuste:

$$f_{prom} = 0,224 * \sigma'_v * N1_{60}^{0,29} \quad (2.53)$$

Donde:

Símbolo	Definición
f_{prom}	Resistencia unitaria por fricción promedio a cualquier profundidad z.
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
$N1_{60}$	Valor corregido promedio de la resistencia a la penetración estándar.

Siendo la capacidad por fuste total:

$$Q_s = pL f_{prom} \quad (2.54)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_s	Capacidad de carga por fuste
p	Perímetro de la sección del pilote.
L	Longitud incremental del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes del pilote.
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo en el terreno al nivel de la punta
$N1_{60}$	Valor corregido promedio de la resistencia a la penetración estándar.

▪ Meyerhof 1976, tomado de Das (2006):

Consideraciones:

Meyerhof indicó que la resistencia por fricción unitaria promedio f_{prom} , depende del proceso constructivo, ya sean pilotes hincados de alto desplazamiento o pilotes hincados de bajo desplazamiento.

Ecuaciones:

La resistencia por fricción se determina de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_s = pL f_{prom} \quad (2.55)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_s	Capacidad de carga por fuste
p	Perímetro de la sección del pilote.
L	Longitud incremental del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes del pilote.
f_{prom}	Resistencia unitaria por fricción promedio a cualquier profundidad z .

La resistencia por fricción unitaria para pilotes de alto desplazamiento es:

$$f_{prom} = 0,02PaN1_{60} \quad (2.56)$$

La resistencia por fricción unitaria para pilotes de bajo desplazamiento es:

$$f_{prom} = 0,01PaN1_{60} \quad (2.57)$$

Donde:

Símbolo	Definición
$N1_{60}$	Valor corregido promedio de la resistencia a la penetración estándar.
Pa	Presión atmosférica ($100kN/m^2$ o $2000lb/pie^2$)

2.5.2.2. CPT

2.5.2.2.1 CAPACIDAD POR PUNTA Q_p

- **LCPC 1976, tomado de Das (2006) y Coduto (1994):**

Consideraciones:

Este método fue desarrollado por el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en Francia, ha sido desarrollado mediante ensayos empíricos en campo CPT (Das, 2006).

Aplica una amplia variedad de condiciones de suelo (arcillas, limos, arenas, gravas, caliza) y considera fundaciones hincadas y preexcavadas (Coduto, 1994).

Ecuaciones:

$$Q_p = q_{c(eq)} * K_b \quad (2.58)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Capacidad de carga de punta
$q_{c(eq)}$	Es la resistencia equivalente promedio del cono.
K_b	Factor empírico de capacidad de carga.

La magnitud $q_{c(eq)}$ se determina de la siguiente manera:

Considere la resistencia q_c en la punta del cono dentro de un intervalo de $1,5D$ debajo de la punta a $1,5D$ arriba de la punta del pilote, como se muestra la Figura 2.30 :

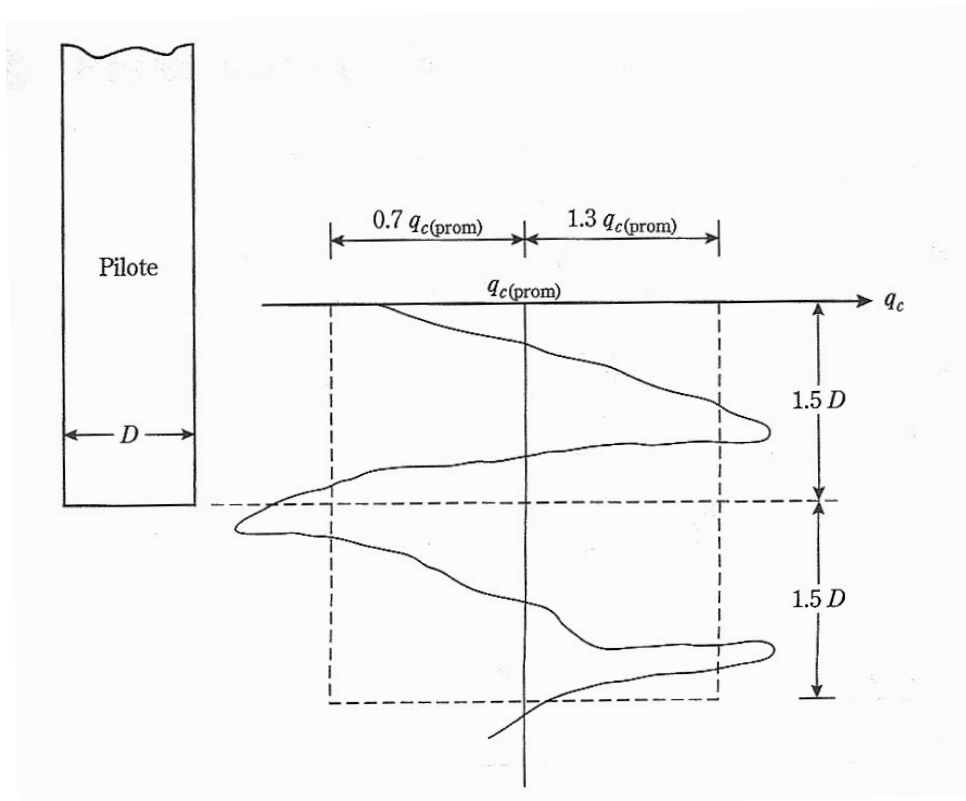


Figura 2.30: Variación de q_c^* Das (2006).

Luego se debe calcular el valor promedio de $q_{c(prom)}$ dentro de la zona mostrada en la figura anterior.

2.5. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD PORTANTE

Posteriormente se eliminan los valores q_c que son mayores que $1,3q_{c(prom)}$ y los valores q_c que son menores que $0,7q_{c(prom)}$ y se calcula $q_{c(prom)}$ promediando los valores q_c restantes.

Para determinar el factor K_b , Briaud y Mirian (1991) proponen los siguientes valores Coduto (1994):

Tabla 2.6: Factor K_b para el método LCPC Coduto (1994)

Tipo de suelo	Pilotes preexcavados	Pilotes hincados
Arcillas y limos	0,375	0,600
Arenas y gravas	0,150	0,375
Caliza	0,200	0,400

2.6. ASENTAMIENTOS

El asentamiento elástico de un pilote bajo una carga vertical de trabajo Q_w se determina mediante tres factores Das (2006):

$$S_e = S_{e1} + S_{e2} + S_{e3} \quad (2.59)$$

Donde:

Símbolo	Definición
S_e	Asentamiento total del pilote
S_{e1}	Asentamiento elástico del pilote
S_{e2}	Asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote
S_{e3}	Asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote

2.6.1. ASENTAMIENTO ELÁSTICO DEL PILOTE, S_{e1}

Si el material del pilote se supone elástico, la deformación del fuste del pilote se evalúa usando los principios fundamentales de la mecánica de materiales:

$$S_{e1} = \frac{(Q_p + \xi Q_s)L}{A_p E_p} \quad (2.60)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Resistencia por punta de un pilote
Q_s	Resistencia a la fricción de un pilote
A_p	Área de la sección transversal del pilote
L	Longitud del pilote
E_p	Módulo de elasticidad del material del pilote

La magnitud de ξ depende de la naturaleza de la distribución de la fricción unitaria (superficial) a lo largo del fuste del pilote. Si la distribución de f es uniforme o parabólica, como se muestra en la Figura 2.31, $\xi = 0,5$. Sin embargo, para una distribución triangular de f , la magnitud de ξ es aproximadamente 0.67 (Vesic, 1977).

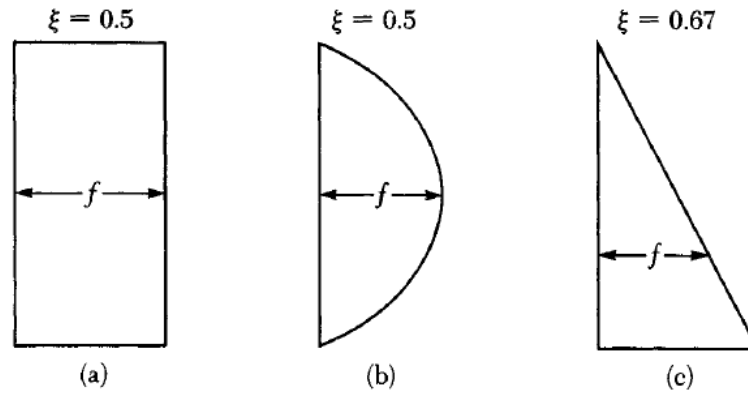


Figura 2.31: Diversos tipos de distribución de la resistencia unitaria por fricción (superficial) a lo largo del fuste del pilote Das (2006).

2.6.2. ASENTAMIENTO DEL PILOTE CAUSADO POR LA CARGA EN LA PUNTA DEL PILOTE, S_{e2}

El asentamiento de un pilote causado por la carga tomada en la punta de éste se expresa como Das (2006):

$$S_{e2} = \frac{(q_p D)}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (2.61)$$

Donde:

Símbolo	Definición
D	Diámetro del pilote.
q_p	Resistencia unitaria por punta de un pilote = Q_{wp}/A_p
E_s	Módulo de elasticidad del suelo en o debajo de la punta del pilote
μ_s	Relación de Poisson del suelo
I_{wp}	Factor de influencia $\approx 0,85$

Vesic(1977) también propuso un método semiempírico para obtener la magnitud del asentamiento, S_{e2} :

$$S_{e2} = \frac{(Q_p C_p)}{D q_p} \quad (2.62)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_p	Resistencia por punta de un pilote
C_p	Coficiente empírico
D	Diámetro del pilote.
q_p	Resistencia unitaria por punta de un pilote

Los valores representativos de C_p para distintos suelos se muestran en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7: Valores típicos de C_p recomendados por Vesic(1977). Tomado de Das (2006)

Tipo de suelo	Pilotes hincados	Pilotes preexcavados
Arena (densa a suelta)	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
Arcilla (firme a blanda)	0,02 – 0,03	0,03 – 0,06
Limo (denso a suelto)	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

2.6.3. ASENTAMIENTO DEL PILOTE CAUSADO POR LA CARGA TRANSMITIDA A LO LARGO DEL FUSTE DEL PILOTE, S_{e3}

El asentamiento de un pilote causado por la carga tomada a lo largo del fuste del pilote se encuentra dado por la siguiente relación Das (2006):

$$S_{e3} = \frac{Q_s D}{pL E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (2.63)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_s	Resistencia a la fricción de un pilote
p	Perímetro del pilote.
L	Longitud empotrada del pilote.
I_{ws}	Factor de influencia.

El factor de influencia I_{ws} posee una relación empírica propuesta por (Vesic, 1977):

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad (2.64)$$

Vesic(1977) también propuso una relación empírica simple similar a la ecuación para obtener S_{e3} :

$$S_{e3} = \frac{Q_s C_s}{L q_p} \quad (2.65)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Q_s	Resistencia a la fricción de un pilote
C_s	Constante empírica

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}} \right) C_p \quad (2.66)$$

Los valores de C_p se estiman de la Tabla 2.7.

2.7. MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

2.7.1. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN PUNTUAL

La metodología de estimación puntual se desarrolló en este trabajo de grado a partir de las proposiciones de Rosenblueth (1975), quien parte de tres casos, Baecher (2003):

- CASO 1: Cuando Y es una función de una variable X , cuya media, varianza y asimetría son conocidas.
- CASO 2 :Cuando Y es una función de una variable X , cuya distribución es simétrica y aproximadamente Gaussiana.
- CASO 3 :Cuando Y es una función de n variables X_1, X_2, \dots, X_n , cuyas distribuciones son simétricas y pueden ser correlacionadas.

En la mayoría de los casos, los cálculos se realizan en dos puntos, y Rosenblueth utiliza la siguiente notación:

$$E[Y^m] \approx P_+ Y_+^m + P_- Y_-^m \quad (2.67)$$

Donde:

Símbolo	Definición
Y	Función determinística de $X, Y = g(X)$.
$E[Y^m]$	Valor esperado de Y elevado a la potencia m .
Y_+	Valor de Y evaluado al punto X_+ , el cual es mayor que la media, μ_x .
Y_-	Valor de Y evaluado al punto X_- , el cual es menor que la media μ_x .
P_+, P_-	Ponderaciones.

El caso a emplear para el desarrollo de esta metodología de estimaciones puntuales es el caso 3.

2.7.1.1. CASO 3

Según Baecher (2003), es la aplicación más utilizada por el método de Rosenblueth. En éste caso Y es una función de n variables cuya asimetría es cero, y las variables no son

correlacionadas.

Rosenblueth propone que cuando las variables no son correlacionadas, la generalización para más de dos variables cumple con la siguiente regla: Si existen n variables aleatorias, entonces 2^n puntos son seleccionados para incluirse en las posibles combinaciones, para las cuales cada variable posee una desviación estándar por encima o por debajo de su media. Lo que conlleva a que $P = 1/2^n$

Por lo tanto si existieran dos variables X_1 y X_2 , los cuatro puntos serían:

$$(\mu_{x1} + \sigma_{x1}, \mu_{x2} + \sigma_{x2}), (\mu_{x1} + \sigma_{x1}, \mu_{x2} - \sigma_{x2}), (\mu_{x1} - \sigma_{x1}, \mu_{x2} + \sigma_{x2}) \text{ y } (\mu_{x1} - \sigma_{x1}, \mu_{x2} - \sigma_{x2})$$

Rosenblueth presenta las siguientes aproximaciones para variables no correlacionadas :

$$\frac{\bar{Y}}{y} = \frac{\bar{Y}_1}{y} \frac{\bar{Y}_2}{y} \dots \frac{\bar{Y}_n}{y} \tag{2.68}$$

$$1 + V_y^2 = (1 + V_{y1})^2 (1 + V_{y2})^2 \dots (1 + V_{yn})^2 \tag{2.69}$$

Donde:

Símbolo	Definición
\bar{Y}	Estimación del valor esperado de Y .
y	Valor de Y evaluado en los valores medios de las variables.
\bar{Y}_i	Media del valor de Y calculado con todas las variables, pero la variable i_{th} permanece constante con sus valores medios.
V_y	Coefficiente de variación de Y calculado como si la i_{th} variable fuera solo una variable aleatoria y los otros permanecieran constantes con sus valores medios.

\bar{Y}_i y V_{yi} , pueden ser determinados usando los procedimientos de la ecuación 2.67 y de la siguientes ecuaciones:

$$P_+ = P_- = \frac{1}{2} \tag{2.70}$$

$$x_+ = \mu_x + \sigma_x \tag{2.71}$$

$$x_- = \mu_x - \sigma_x \tag{2.72}$$

2.7.2. MÉTODO DE MONTECARLO

En la simulación por Montecarlo se genera un gran número de valores aleatorios para los parámetros de incertidumbre, los cuales pueden seguir funciones de probabilidad diferentes como normal, triangular o lognormal.

Al tener estos números aleatorios, se procede a ajustarlos con una distribución con media y desviación igual a los de la variable aleatoria.

Posteriormente se evalúan en la función objetivo para registrar la frecuencia de los casos en los cuales el factor de seguridad es menor a 1 y el margen de seguridad es menor a 0.

$$P(F.S.) = \sum \frac{\text{combinaciones donde el } F.S. < 1}{\text{No. total de combinaciones realizadas}} \quad (2.73)$$

$$P(M.S.) = \sum \frac{\text{combinaciones donde el } M.S. < 0}{\text{No. total de combinaciones realizadas}} \quad (2.74)$$

Los valores de índice de confiabilidad y valores de probabilidad de falla pueden ser obtenidos directamente de los resultados de las combinaciones de los valores aleatorios.

2.7.3. MÉTODO DE SERIES DE TAYLOR

La metodología Series de Taylor, también denominada "First Order Second Moment", describe la aproximación del primer orden de la media, varianza y desviación estándar de una función F , basado en los primeros términos de una expansión de la serie de Taylor de la función de desempeño para estimar $E(y)$ y $V(y)$ Baecher (2003).

Cuando las variables no son correlacionadas, como es nuestro caso, las ecuaciones a emplear son:

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.75)$$

El cálculo de los momentos estadísticos se determina de la siguiente manera:

$$E[F] = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{d^2 f(x_1, \dots, x_n)}{d(x_i x_j)} cov(x_i, x_j) \quad (2.76)$$

para $i \neq j$.

Donde μ_n son los valores medios de la variable aleatorias. Por tanto el cálculo de la varianza es:

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{df(x_1, \dots, x_n)}{dx_i} \frac{df(x_1, \dots, x_n)}{dx_j} cov(x_i, x_j) \quad (2.77)$$

Donde $cov(x_i, x_j) = 0$ ya que las variables son independientes entre si. De tal forma que los momentos estadísticos se simplifican de la siguiente manera:

$$E[F] = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (2.78)$$

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{df(x_1, \dots, x_n)}{dx_i} \right]^2 V(x_i) \quad (2.79)$$

Capítulo 3

PROGRAMA DAP-C

3.1. INICIO

Al iniciar el programa DAP-C, se presentará la siguiente ventana:

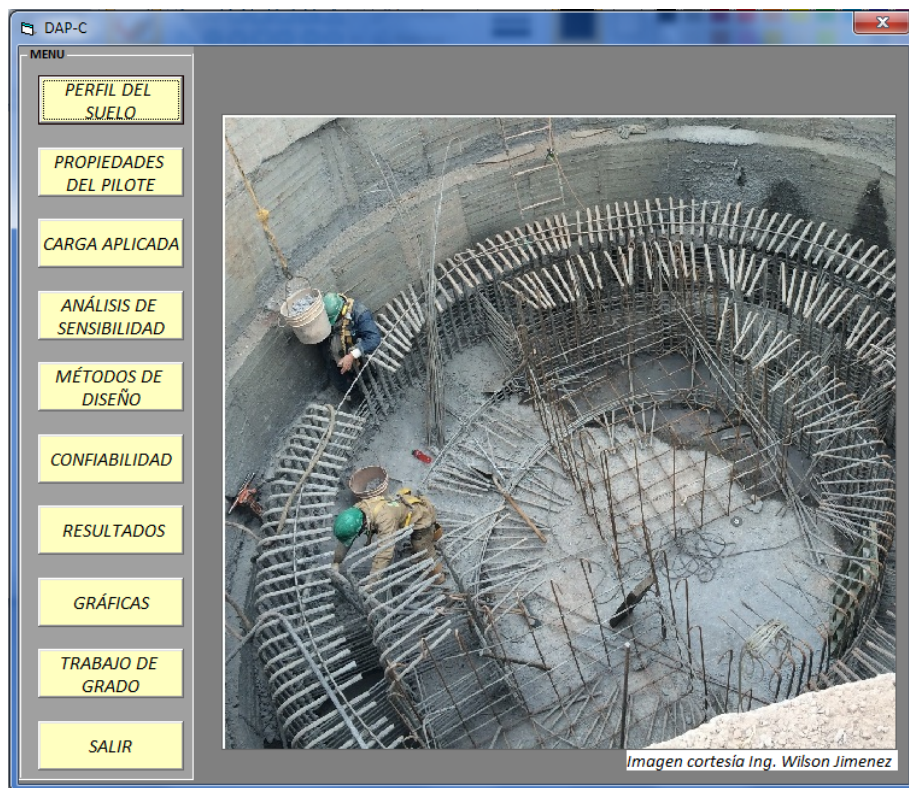


Figura 3.1: Inicio

El menú se encuentra ubicado en la parte izquierda de la ventana, de tal forma que el usuario pueda acceder a las diferentes opciones en el siguiente orden:

En la parte superior izquierda de la ventana se encuentra el número de capa para la cual se deben ingresar las propiedades como espesor, tipo de suelo, peso unitario, cohesión, ángulo de fricción, SPT, y nivel freático en las unidades presentadas.

Al finalizar el llenado de la capa dar click en *AGREGAR* y si se desea, se puede seleccionar la siguiente capa con las flechas presentadas en la parte superior izquierda para continuar con el registro de los parámetros del perfil del suelo.

Cuando se haya finalizado el ingreso, dar click en *GUARDAR/VOLVER* para retornar a la ventana de inicio.

Esta ventana también ofrece la opción *GRAFICAR*, ubicada en la parte inferior de la ventana, la cual genera una gráfica del esfuerzo efectivo en función de la profundidad.

3.3. PROPIEDADES DEL PILOTE

En esta ventana se deben ingresar las propiedades del pilote como diámetro, longitud, módulo de elasticidad.

También se debe seleccionar el método constructivo y el asentamiento máximo permisible.

Al finalizar el ingreso de datos se debe dar click en *GUARDAR/VOLVER*

Figura 3.3: Propiedades del pilote

3.4. CARGA APLICADA

En la opción *CARGA APLICADA*, se ingresa el valor de la carga sobrepuesta al pilote en kN. No es necesario incluir el peso del pilote, ya que el programa lo calcula.

Esta carga será empleada para determinar el factor de seguridad, margen de seguridad y probabilidad de falla.

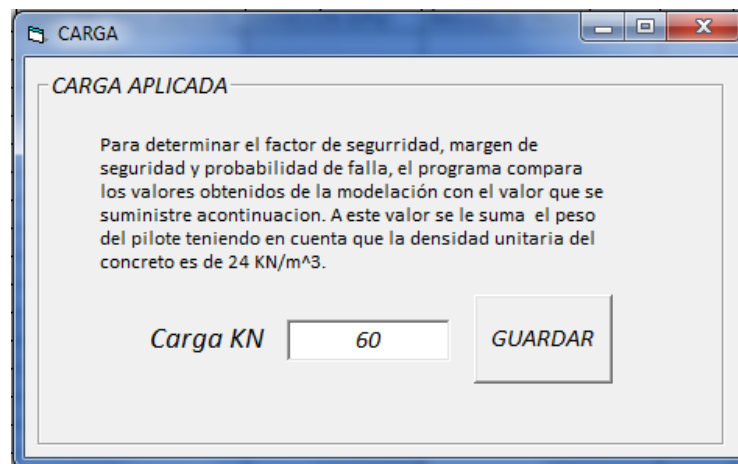


Figura 3.4: Carga aplicada

3.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El programa presenta la opción *ANALISIS DE SENSIBILIDAD*, el cual ofrece la opción de variar el diámetro o la longitud desde un valor inicial hasta un valor final con un intervalo dado.

Esté análisis permite generar gráficas en función de:

- Longitud del pilote vs el factor de seguridad
- Diámetro del pilote vs el factor de seguridad
- Longitud del pilote vs probabilidad de falla
- Diámetro del pilote vs probabilidad de falla

Si no se desea realizar análisis de sensibilidad dar click en *No realizar analisis de sensibilidad*

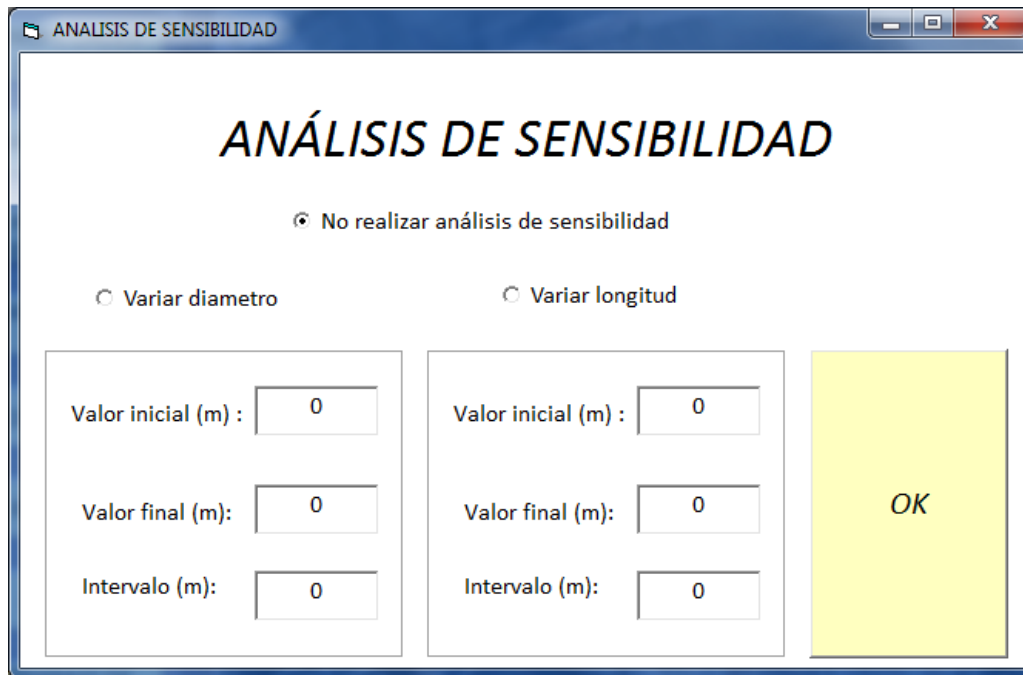


Figura 3.5: Análisis de sensibilidad

3.6. MÉTODOS DE DISEÑO

En esta ventana se presentan las metodologías disponibles para el cálculo de capacidad portante de los pilotes.

El programa DAP-C ofrece la posibilidad de elegir para cada capa una metodología distinta de capacidad por fuste (Q_s) y para la capa en donde finalice el pilote una metodología de capacidad por punta (Q_p).

No se recomienda mezclar metodologías al momento de diseñar sin conocer las consideraciones de cada una de estas. Por esta razón al frente de cada metodología en la opción *VER MAS* se encuentra un resumen detallado de las consideraciones y ecuaciones empleadas para cada una de estas.

Al finalizar el ingreso de las metodologías seleccionadas dar click en *GUARDAR/VOLVER*

3.7.1. MONTECARLO

En el caso de seleccionar *MONTECARLO* se genera la siguiente ventana:

The screenshot shows a software window titled "ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD" with a sub-header "PARÁMETROS DE ENTRADA ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD". The interface is divided into several sections:

- PARAMETROS:**
 - Estrato:** A dropdown menu currently showing "1", with left and right arrow buttons.
 - Distribution Type:** Two checkboxes, "Normal" and "Triangular", are present.
 - Peso Unitario:** Input fields for mean (μ KN/m³) and CV (%).
 - Cohesión:** Input fields for mean (μ KN/m²) and CV (%).
 - Ángulo de fricción:** Input fields for mean (μ ϕ) and CV (%).
 - SPT:** Input fields for mean (μ N 60) and CV (%).
- Buttons:** "AGREGAR" and "CALCULAR" buttons are located on the right side.
- Table:** A table with 10 columns: "CAPA", "CLASIFICACIÓN", "PESO UNITARIO KN/m³", "Media", "Coeficiente de variación", "PDF", "COHESIÓN KPa", "Media", "Coeficiente de variación", "PDF". The table is currently empty.
- Footer:**
 - Text: "El análisis de confiabilidad esta enfocado las siguientes propiedades y parametros del suelo, los cuales son los que mas influyen en el calculo de la resistencia del pilote."
 - Buttons: "GENERADOR DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD" and "GUARDAR/VOLVER".

Figura 3.8: Parámetros Montecarlo

En esta ventana se definen los valores medios μ y los coeficientes de variación CV de los parámetros definidos en el perfil del suelo para cada capa.

El programa DAP-C ofrece la posibilidad de generar distribuciones de probabilidad normal, triangular y lognormal para cada parámetro del suelo sin importar la capa en la que se encuentre.

Luego de ingresar los datos correspondientes en cada casilla dar click en *CALCULAR*. En esta opción se debe ingresar el número de simulaciones que se desee para realizar el procedimiento de Montecarlo.

Adicional a esto, en la parte inferior de esta ventana se encuentra la opción *GENERADOR DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD*, la cual permite observar los números aleatorios generados con el histograma de frecuencias.

Cuando se haya ingresado el número de simulaciones deseadas dar click en *INICIAR*. Luego se generarán los números aleatorios con base en las funciones de probabilidad seleccionadas apareciendo la siguiente ventana:

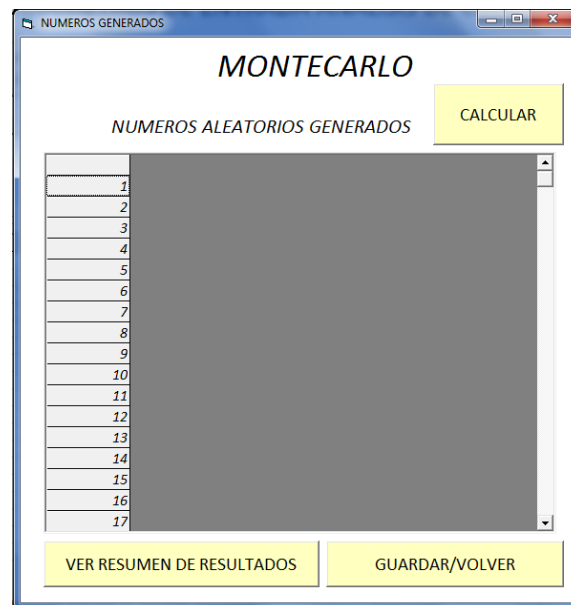


Figura 3.9: Montecarlo

Finalmente dar click en *CALCULAR*. Esta opción muestra los resultados de :

- Media del factor de seguridad
- Media del margen de seguridad
- Probabilidad de falla del factor de seguridad
- Probabilidad de falla del margen de seguridad
- Índice de confiabilidad del factor de seguridad
- Índice de confiabilidad del margen de seguridad

En la tabla de resumen que se muestra a continuación:

Los índices de confiabilidad son importantes ya que se pueden comparar con la Figura 3.11

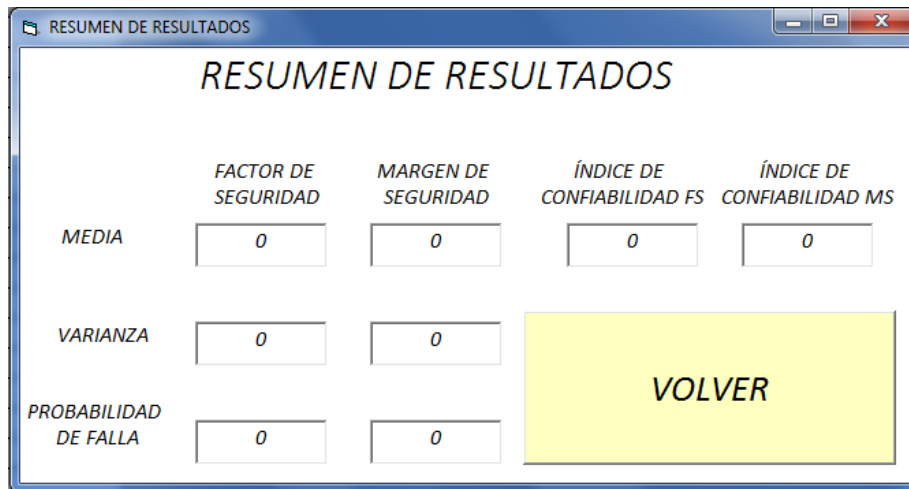


Figura 3.10: Montecarlo

Nivel de comportamiento esperado	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla
Alto	5.0	0.0000003
Bueno	4.0	0.000003
Por encima del promedio	3.0	0.001
Por debajo del promedio	2.5	0.006
Pobre	2.0	0.023
Insatisfactorio	1.5	0.07
Peligroso	1.0	0.16

Figura 3.11: Índice de confiabilidad. Tomado de Sivakumar Babu y Murthy (2005).

3.7.2. ESTIMATIVOS PUNTUALES

En el caso de seleccionar *ESTIMATIVOS PUNTUALES* se genera la siguiente ventana:

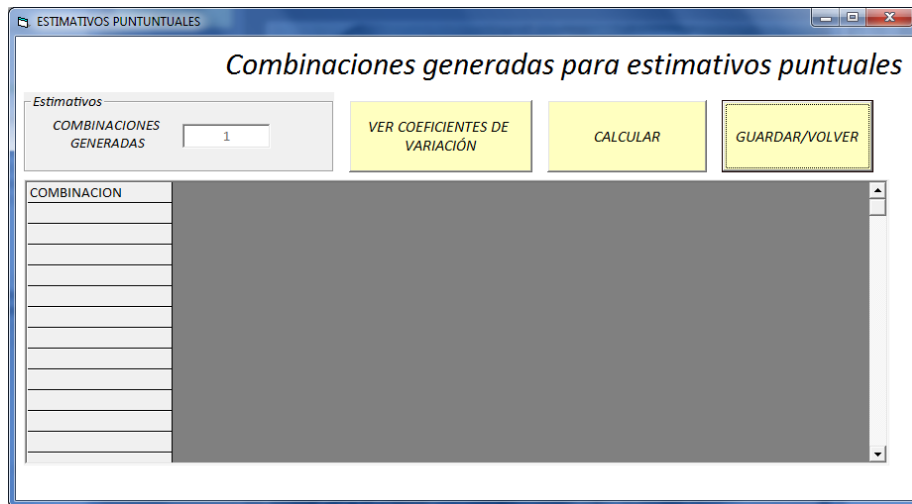


Figura 3.13: Estimativos puntuales

Luego de que se generan las combinaciones dar click en *CALCULAR*

Esta opción muestra los resultados de :

- Media del factor de seguridad
- Media del margen de seguridad
- Probabilidad de falla del factor de seguridad
- Probabilidad de falla del margen de seguridad
- Índice de confiabilidad del factor de seguridad
- Índice de confiabilidad del margen de seguridad

En la tabla de resumen que se muestra a continuación:

	FACTOR DE SEGURIDAD	MARGEN DE SEGURIDAD	ÍNDICE DE CONFIABILIDAD FS	ÍNDICE DE CONFIABILIDAD MS
MEDIA	0	0	0	0
VARIANZA	0	0	VOLVER	
PROBABILIDAD DE FALLA	0	0		

Figura 3.14: Estimativos puntuales

Los índices de confiabilidad son importantes ya que se pueden comparar con la Figura 3.11

3.7.3. SERIES DE TAYLOR

Series de Taylor se encuentra programada para tres metodologías como se observa en la Figura 3.15.

Al hacer click en *CALCULAR* muestra los resultados de factor de seguridad y probabilidad de falla vs longitud, según los parámetros que se hayan ingresado en la opción *ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD*.

Nota: Las derivadas programadas se encuentran solo programadas para una capa con nivel freático variable.

Form2

SERIES DE TAYLOR

Método lamda

Meyerhof arenas

Meyerhof Arcillas

COMPROVACIÓN DE DATOS

NOTA: Las derivadas programadas se encuentran disponibles para una capa de suelo sin nivel freático.

Calcular

Longitud	Probabilidad de falla falla F_s	F_s

Figura 3.15: Series de Taylor

3.8. RESULTADOS

Se genera una tabla con los resultados de la simulación realizada.

3.9. GRÁFICAS

Se generan gráficas de los resultados como factor de seguridad vs longitud, como se observa en la siguiente ventana:

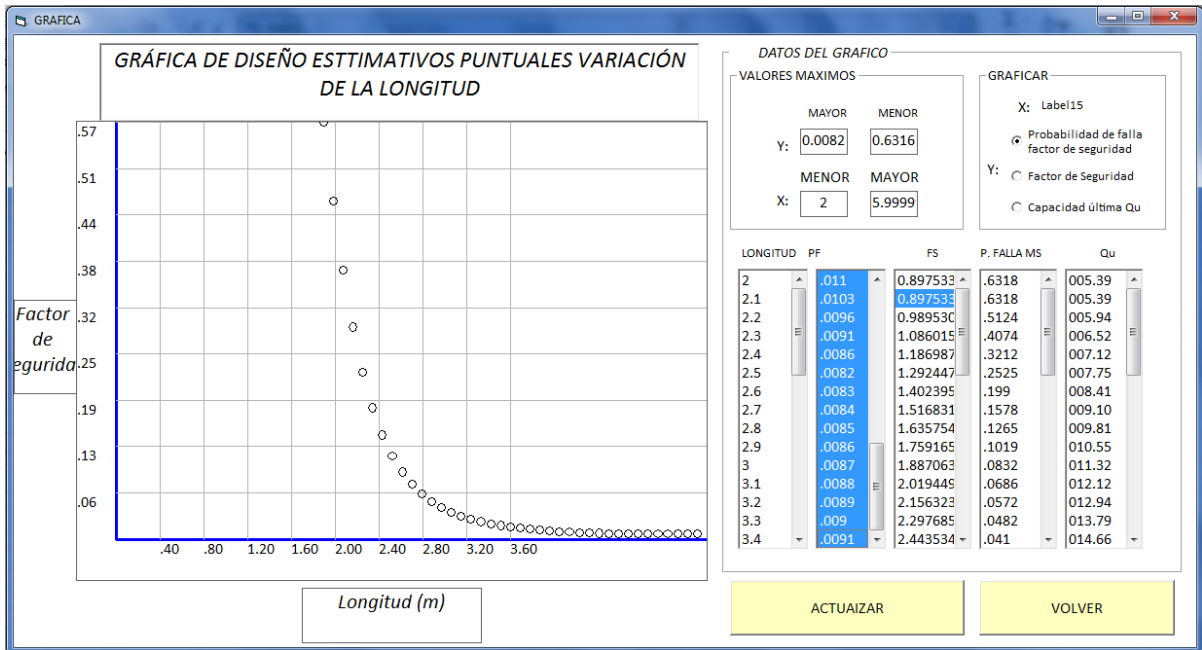


Figura 3.16: Gráficas

3.10. RECOMENDACIONES

Es importante que el usuario tenga presente que al momento de realizar un análisis de sensibilidad con la metodología de Montecarlo, no se ingrese un número de simulaciones mayor 1000 si se ha elegido realizar un análisis de sensibilidad con un intervalo muy pequeño.

Si el usuario ha ingresado un número de simulaciones en el procedimiento de Montecarlo mayor a 20000, el programa puede tardar algunos minutos.

Para almacenar los datos generados por el programa, es posible seleccionar la lista de datos como se muestra en la Figura 3.16 y arrastrarlos a un archivo de excel.

Capítulo 4

EJEMPLO DE APLICACIÓN

4.1. PERFIL DE SUELO

El estrato seleccionado para la generación de resultados en el programa es el siguiente :

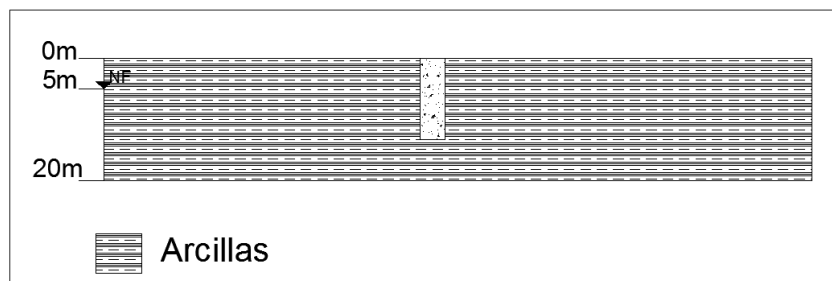


Figura 4.1: Perfil de suelo empleado para el análisis de resultados

Para establecer los rangos del coeficiente de variación de cada parámetro del suelo se emplearon la Figura 4.2 , la Figura 4.3 y la Figura 4.4.

Soil type	COV	Source
Various soils	9	(Lumb 1966)
Clay	40	(Kotzias <i>et al.</i> 1993)
Alluvial	16	(Wolff 1996)
Sands	2–5	(Lacasse and Nadim 1996)
Tailings	5–20	(Baecher <i>et al.</i> 1983)

Figura 4.2: Variabilidad de la medición del ángulo ϕ para distintos suelos, tomado de Baecher (2003)

Test type	Property	Soil type	Mean	Units	COV(%)
CPT	q_T	Clay	0.5–2.5	MN/m ²	<20
	q_c	Clay	0.5–2	MN/m ²	20–40
	q_c	Sand	0.5–30	MN/m ²	20–60
VST	s_u	Clay	5–400	kN/m ²	10–40
SPT	N	Clay & Sand	10–70	blows/ft	25–50
DMT	A Reading	Clay	100–450	kN/m ²	10–35
	A Reading	Sand	60–1300	kN/m ²	20–50
	B Reading	Clay	500–880	kN/m ²	10–35
	B Reading	Sand	350–2400	kN/m ²	20–50
	I_D	Sand	1–8		20–60
	K_D	Sand	2–30		20–60
PMT	E_D	Sand	10–50	MN/m ²	15–65
	p_L	Clay	400–2800	kN/m ²	10–35
	p_L	Sand	1600–3500	kN/m ²	20–50
	E_{PMT}	Sand	5–15	MN/m ²	15–65
Lab Index	w_n	Clay and silt	13–100	%	8–30
	W_L	Clay and silt	30–90	%	6–30
	W_p	Clay and silt	15–15	%	6–30
	PI	Clay and silt	10–40	%	– ^a
	LI	Clay and silt	10	%	– ^a
	γ, γ_d	Clay and silt	13–20	KN/m ³	<10
	D_r	Sand	30–70	%	10–40; 50–70 ^b

^aCOV = (3–12%)/mean.

^bThe first range of variables gives the total variability for the direct method of determination, and the second range of values gives the total variability for the indirect determination using SPT values.

Figura 4.3: Coeficientes de variación para algunas mediciones comunes en campo (Phoon and Kulhawy 1999), tomado de Baecher (2003)

Design property ^a	Test ^b	Soil type	Point COV (%)	Spatial average COV ^c (%)	Correlation equation
s_u (UC)	Direct (lab)	Clay	20–55	10–40	—
s_u (UU)	Direct (lab)	Clay	10–35	7–25	—
s_u (CIUC)	Direct (lab)	Clay	20–45	10–30	—
s_u (field)	VST	Clay	15–50	15–50	14
s_u (UU)	q_T	Clay	30–40 ^d	30–35 ^d	18
s_u (CIUC)	q_T	Clay	35–50 ^d	35–40 ^d	18
s_u (UU)	N	Clay	40–60	40–55	23
s_u ^e	K_D	Clay	30–55	30–55	29
s_u (field)	PI	Clay	30–55 ^d	—	32
$\bar{\phi}$	Direct (lab)	Clay, sand	7–20	6–20	—
$\bar{\phi}$ (TC)	q_T	Sand	10–15 ^d	10 ^d	38
$\bar{\phi}_{cv}$	PI	Clay	15–20 ^d	15–20 ^d	43
K_h	Direct (SBPMT)	Clay	20–45	15–45	—
K_v	Direct (SBPMT)	Sand	25–55	20–55	—
K_o	K_D	Clay	35–50 ^d	35–50 ^d	49
K_o	N	Clay	40–75 ^d	—	54
E_{PMT}	Direct (PMT)	Sand	20–70	15–70	—
E_D	Direct (DMT)	Sand	15–70	10–70	—
E_{PMT}	N	Clay	85–95	85–95	61
E_D	N	Silt	40–60	35–55	64

^a E_D , dilatometer modulus; E_{PMT} , pressuremeter modulus; K_h , in situ horizontal stress coefficient; s_u , undrained shear strength; s_u (field), corrected s_u from vane shear test; $\bar{\phi}$, effective stress friction angle; $\bar{\phi}_{cv}$, constant-volume $\bar{\phi}$; TC, triaxial compression; UC, unconfined compression test.

^b K_D , dilatometer horizontal stress index; N , standard penetration test blow count; PI, plasticity index; q_T , corrected cone tip resistance.

^cAveraging over 5 m.

^dCOV is a function of the mean; refer to COV equations in the text for details.

^eMixture of s_u from UU, UC, and VST.

Figura 4.4: Guía para determinar la variabilidad de algunas propiedades del suelo de diseño, tomado de Phoon and Kulhawy (1999)

Para el perfil mostrado en la Figura 4.1 se realizaron pruebas en el programa para determinar la capacidad portante del pilote, manteniendo los valores medios constantes y

cambiando los coeficientes de variación (CV) como se muestra en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Parámetros empleados para el perfil del suelo

			Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Parámetro	Media	Unidades	CV_1	CV_2	CV_3
γ	18	kN/m ³	2 %	5 %	7 %
c_u	30	kN/m ²	10 %	20 %	30 %
ϕ	20	°	10 %	20 %	30 %

4.1.1. PRUEBA 1

En la prueba 1 se realizó la capacidad del pilote por punta presentada por la metodología de Meyerhof, determinada por los procedimientos de evaluación de confiabilidad como estimativos puntuales, series de Taylor y Montecarlo.

En la Tabla 4.2 se presentan los parámetros de entrada para la generación de la Figura 4.5 y la Figura 4.6.

Tabla 4.2: Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1

Parámetro	Media	Unidades	CV_1
γ	18	kN/m ³	2 %
c_u	30	kN/m ²	10 %
ϕ	20	°	10 %
Longitud del pilote	2	m	0 %
Carga aplicada	30	kN	0 %

El diámetro para esta prueba varia desde 0.1m hasta 0.6m

En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros de entrada para la generación de la Figura 4.7 y la Figura 4.8.

El diámetro para esta prueba varia desde 0.1m hasta 0.6m

En la Tabla 4.4 se presentan los parámetros de entrada para la generación de la Figura 4.9 y la Figura 4.10.

Tabla 4.3: Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1

Parámetro	Media	Unidades	CV_1
γ	18	kN/m ³	5 %
c_u	30	kN/m ²	20 %
ϕ	20	°	20 %
Longitud del pilote	2	m	0 %
Carga aplicada	30	kN	0 %

Tabla 4.4: Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1

Parámetro	Media	Unidades	CV_1
γ	18	kN/m ³	7 %
c_u	30	kN/m ²	30 %
ϕ	20	°	30 %
Longitud del pilote	2	m	0 %
Carga aplicada	30	kN	0 %

El diámetro para esta prueba varia desde 0.1m hasta 0.6m

4.1.2. PRUEBA 2

En la prueba 2 se realizó la capacidad del pilote por fuste presentada por la metodología de λ determinada por las metodologías de estimativos puntuales, series de Taylor y Montecarlo.

Para los coeficientes de variación CV_1 , los resultados generados por el programa para los valores presentados en la Tabla 4.5 son la Figura 4.11 y la Figura 4.12.

Tabla 4.5: Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1

Parámetro	Media	Unidades	CV_1
γ	18	kN/m ³	2 %
c_u	30	kN/m ²	10 %
ϕ	20	°	10 %
Diámetro del pilote	0.3	m	0 %
Carga aplicada	60	kN	0 %

La longitud para esta prueba varia desde 4 m hasta 8 m.

Para los coeficientes de variación CV_2 , los resultados generados por el programa para los valores presentados en la Tabla 4.6 son la Figura 4.13 y la Figura 4.14.

Para los coeficientes de variación CV_2 , los resultados generados por el programa para los valores presentados en la Tabla 4.6 son la Figura 4.13 y la Figura 4.14.

Tabla 4.6: Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1

Parámetro	Media	Unidades	CV_1
γ	18 kN/m ³	5 %	
c_u	30	kN/m ²	20 %
ϕ	20	°	20 %
Longitud del pilote	2	m	0 %
Carga aplicada	30	kN	0 %

El diámetro para esta prueba varia desde 0.1m hasta 0.6m

Para los coeficientes de variación CV_3 , los resultados generados por el programa para los valores presentados en la Tabla 4.7 son la Figura 4.15 y la Figura 4.16.

Tabla 4.7: Parámetros empleados para los resultados del perfil del suelo, tomando en cuenta los coeficientes de variación CV_1

Parámetro	Media	Unidades	CV_1
γ	18	kN/m ³	7 %
c_u	30	kN/m ²	30 %
ϕ	20	°	30 %
Longitud del pilote	2	m	0 %
Carga aplicada	30	kN	0 %

El diámetro para esta prueba varia desde 0.1m hasta 0.6m

Para un análisis más preciso en la modelación Montecarlo, se recomienda emplear un número de simulaciones mayor a 10000 como se observa en las Figura 4.17 y en la Figura 4.18.

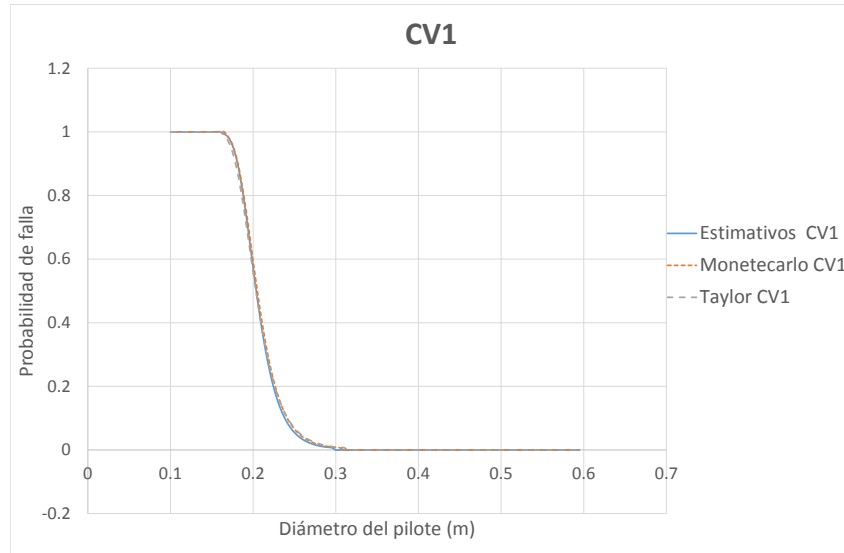


Figura 4.5: Probabilidad de falla vs diámetro del pilote

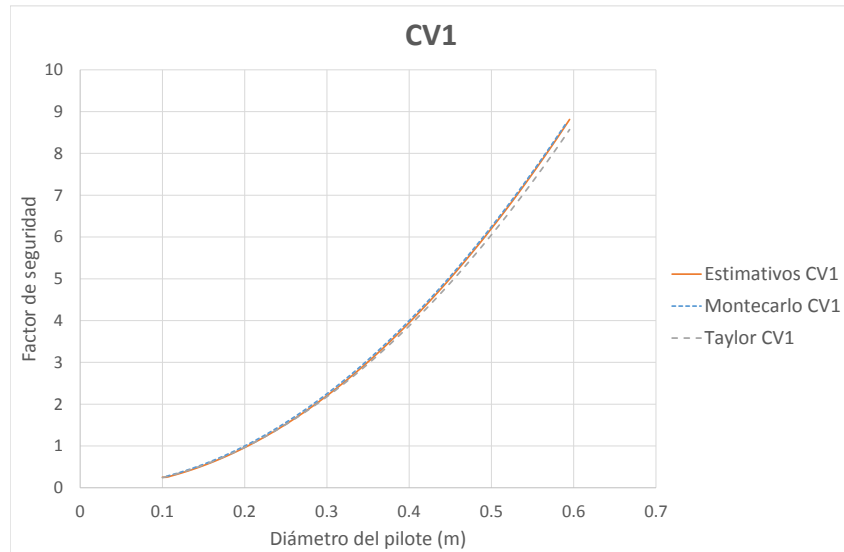


Figura 4.6: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

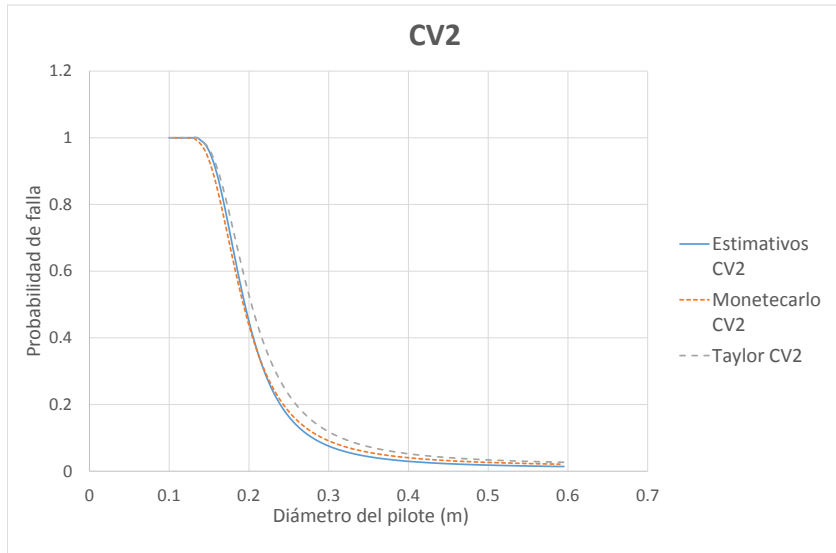


Figura 4.7: Probabilidad de falla vs diámetro del pilote

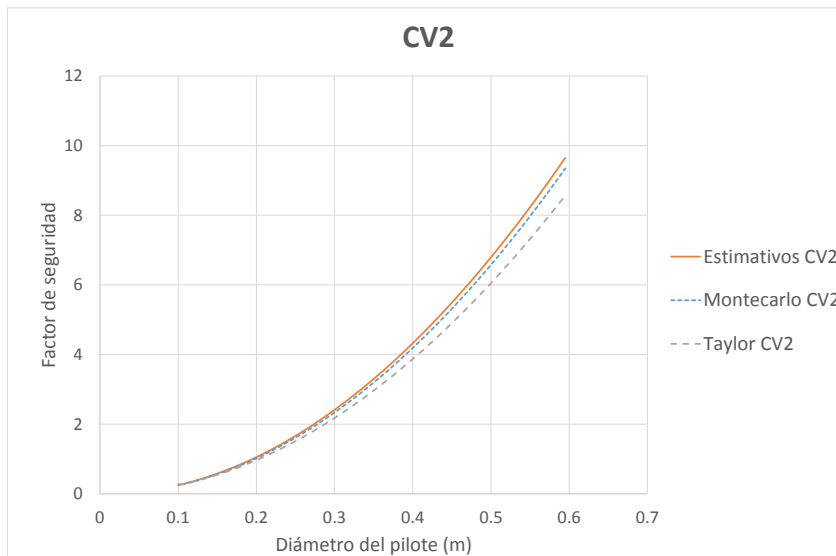


Figura 4.8: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

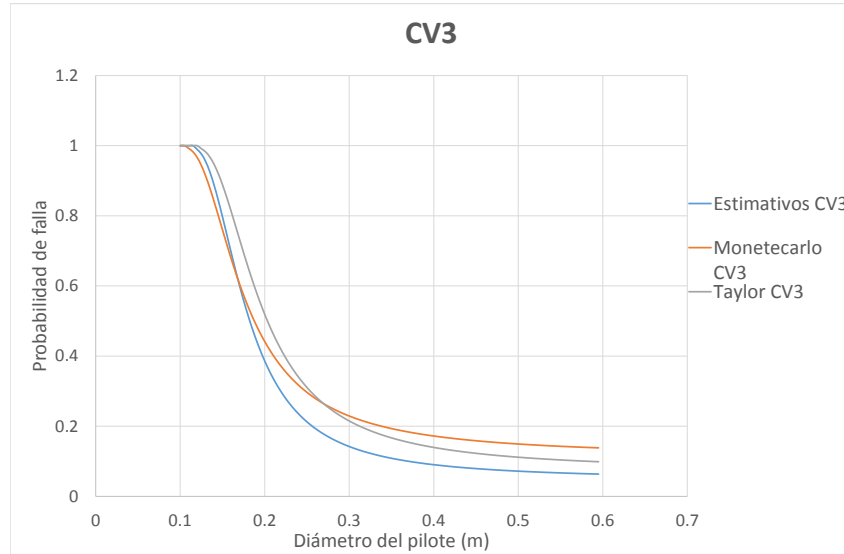


Figura 4.9: Probabilidad de falla vs diámetro del pilote

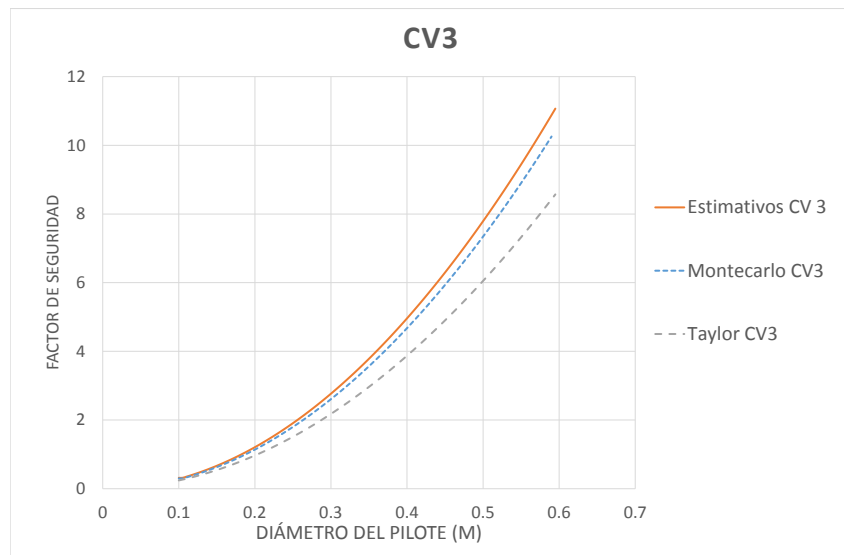


Figura 4.10: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

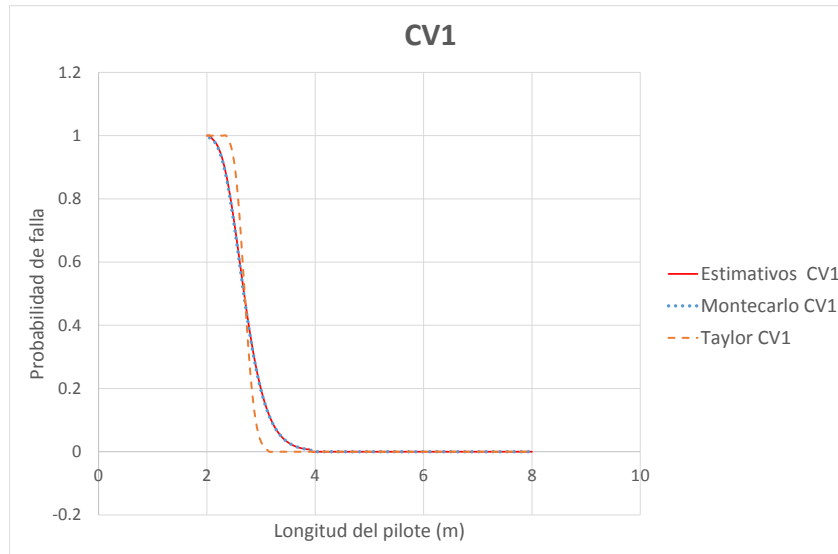


Figura 4.11: Probabilidad de falla vs diámetro del pilote

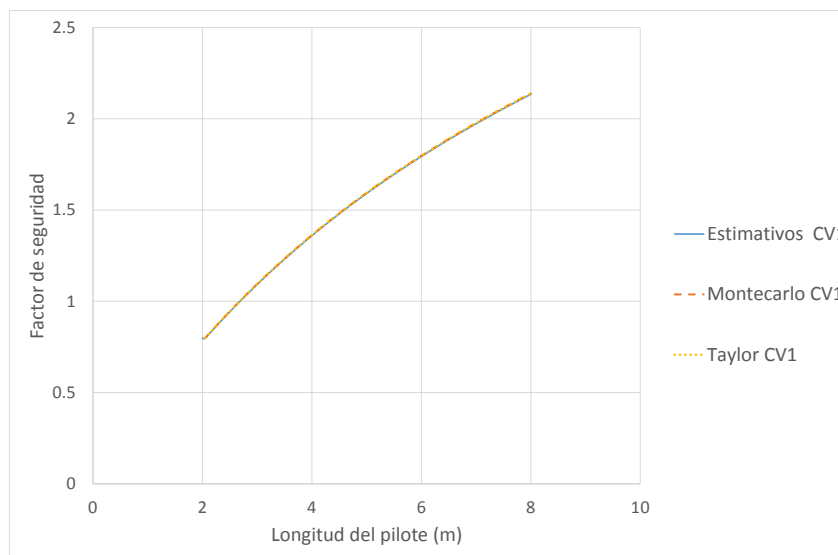


Figura 4.12: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

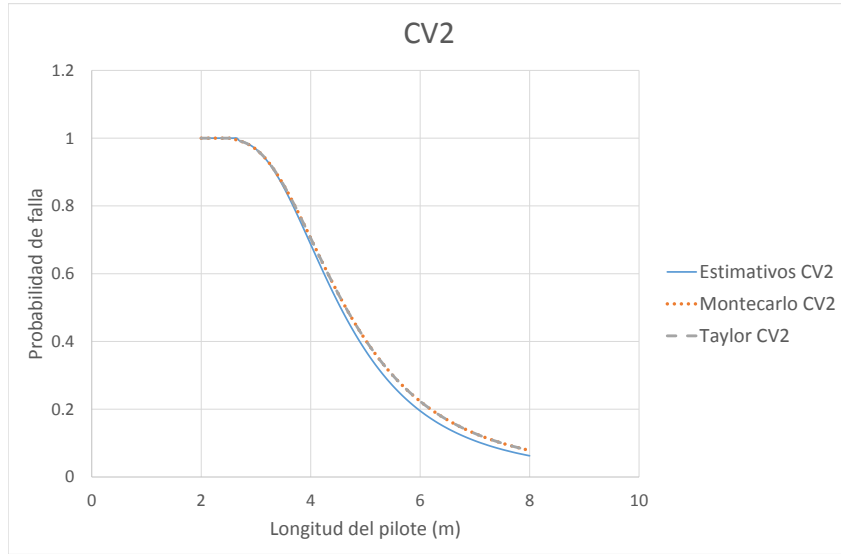


Figura 4.13: Probabilidad de falla vs diámetro del pilote

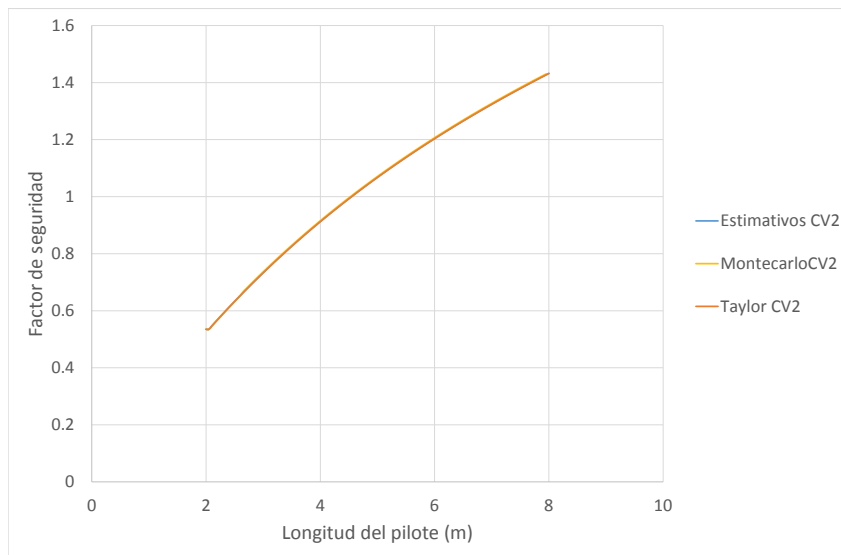


Figura 4.14: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

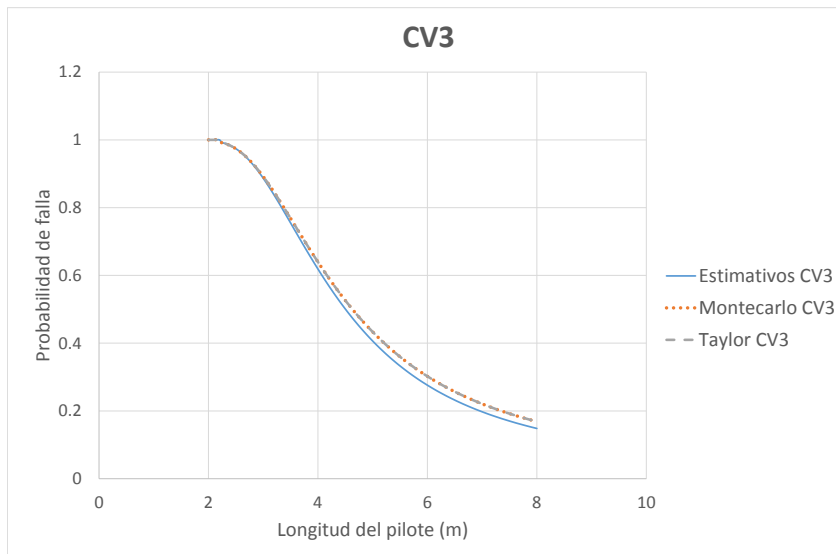


Figura 4.15: Probabilidad de falla vs diámetro del pilote

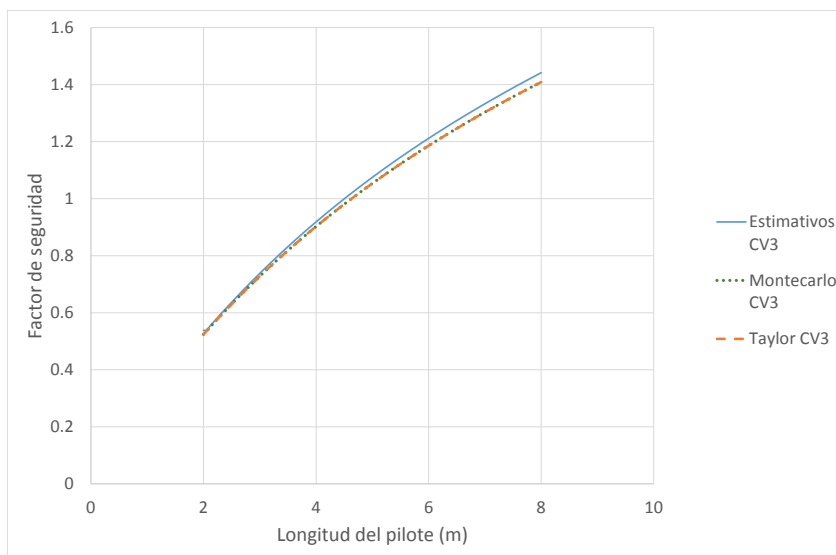


Figura 4.16: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

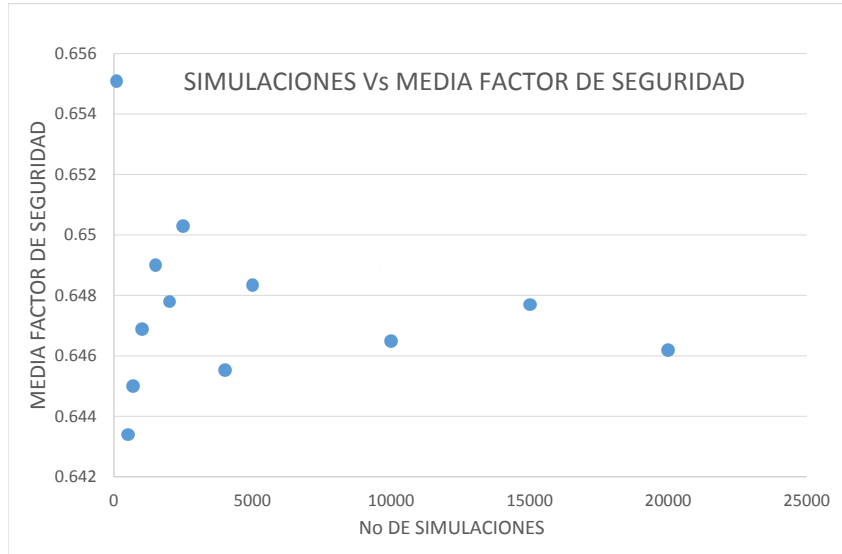


Figura 4.17: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

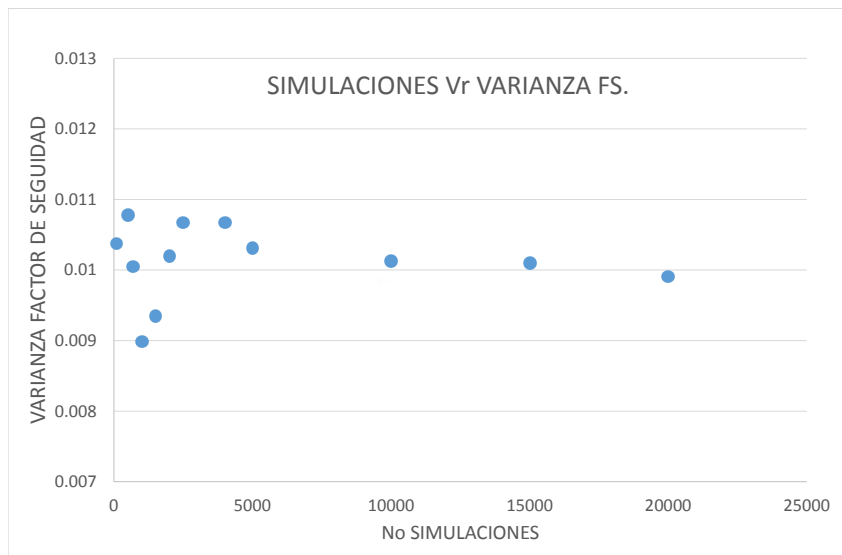


Figura 4.18: Factor de seguridad vs diámetro del pilote

Capítulo 5

COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS

5.1. PERFIL DE ARCILLAS

Se realizaron pruebas en el programa DAP-C, para determinar la capacidad portante para diferentes métodos de un pilote de 4.5 m de longitud, variando su diámetro desde 0.3 m hasta 0.6 m. A este pilote se le aplica una carga de 120 kN y se encuentra ubicado en un perfil de suelo, cuyos parámetros son presentados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros empleados para el perfil del suelo

Parámetro	Media	Unidades	<i>CV</i>
γ	18	kN/m ³	25 %
c_u	30	kN/m ²	25 %
ϕ	20	°	25 %
G_s	25000	kPa	
Nivel freático	5	m	
Espesor de la capa	20	m	

Las gráficas que se obtienen con los resultados del programa para capacidad por punta, factor de seguridad y probabilidad de falla, son presentadas en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 respectivamente.

En estas figuras, se presentan comportamientos diferentes para cada uno de los métodos. En el caso de los métodos Reese O'Neill y Tomlinson, los cuales presentan factores de capacidad de carga N_c diferentes, el diámetro no genera mayor influencia ya que el factor de capacidad de carga supera en el método de Reese O'Neill el valor de 9 y en el método de Tomlinson adopta un valor de 9, por tanto la capacidad por punta es constante

para las relaciones L/D que se están evaluando, lo cual no presenta cambios en el factor de seguridad y en la probabilidad de falla.

Por el contrario, las metodologías propuestas por Janbu, Vesic y Meyerhof, presentan comportamientos similares en los cuales influye el diámetro, tanto en la capacidad por punta como en el factor de seguridad y en la probabilidad de falla. Estas metodologías proponen ecuaciones similares con diferentes ecuaciones que describen los factores de corrección y capacidad portante.

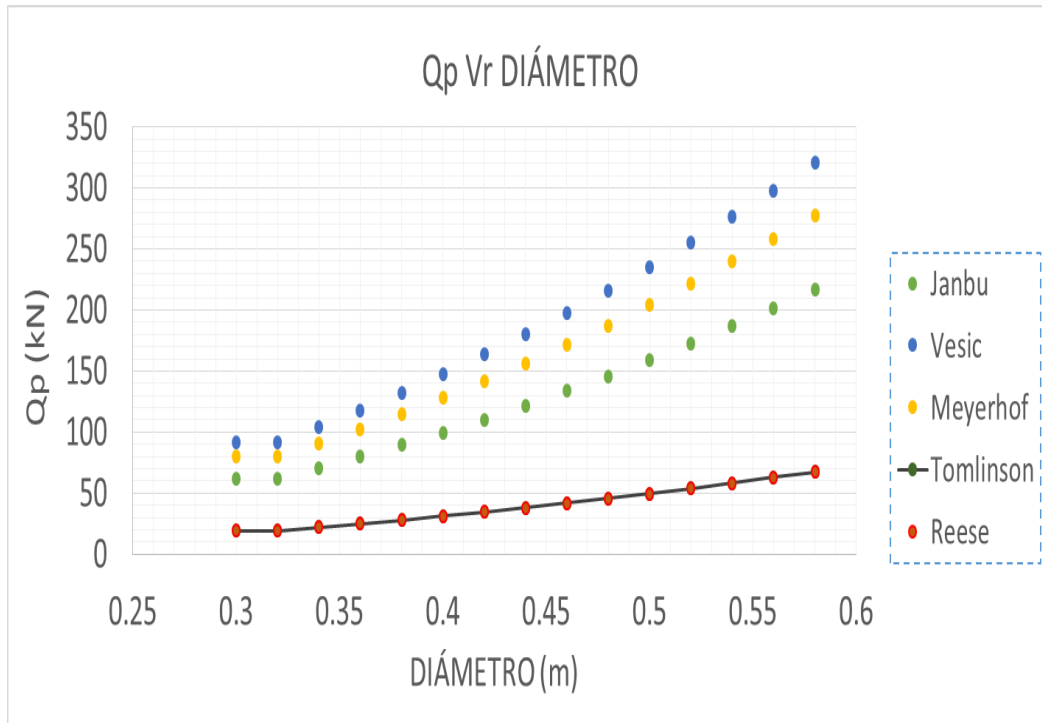


Figura 5.1: Q_p vs diámetro del pilote

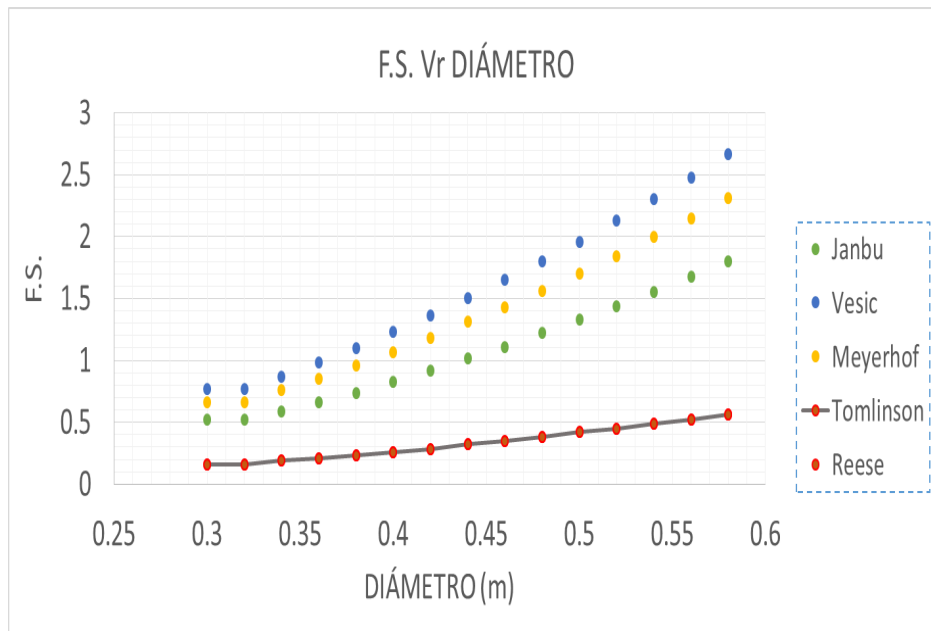


Figura 5.2: Factor de seguridad para Q_p vs diámetro del pilote

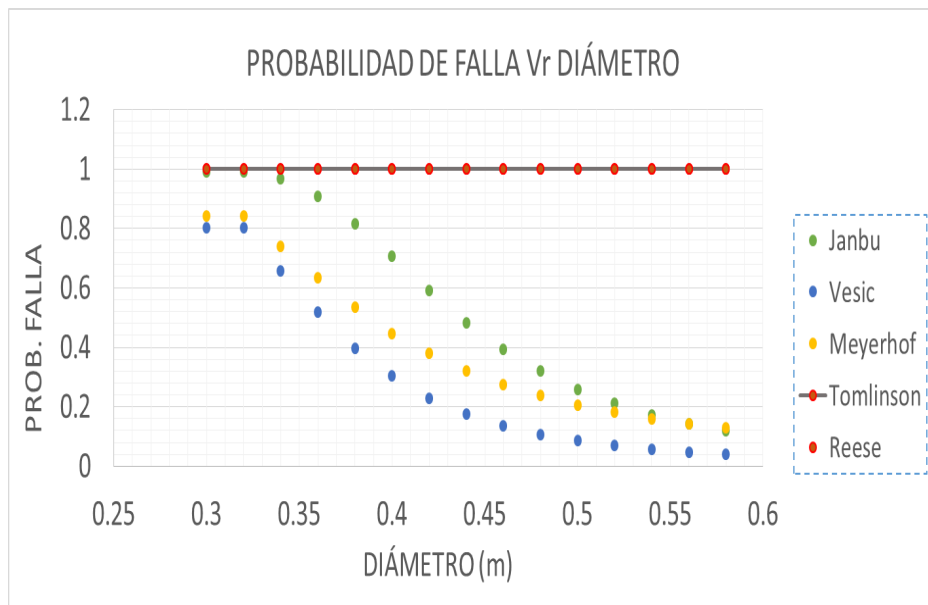


Figura 5.3: Probabilidad de falla para Q_p vs diámetro del pilote

Las gráficas que se obtienen con los resultados del programa para capacidad por fuste son presentadas en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6.

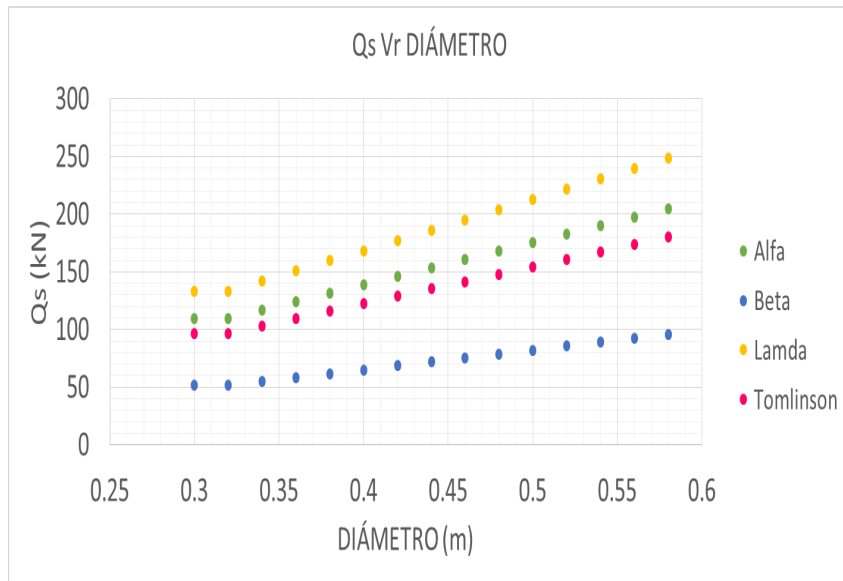


Figura 5.4: Qs vs diámetro del pilote

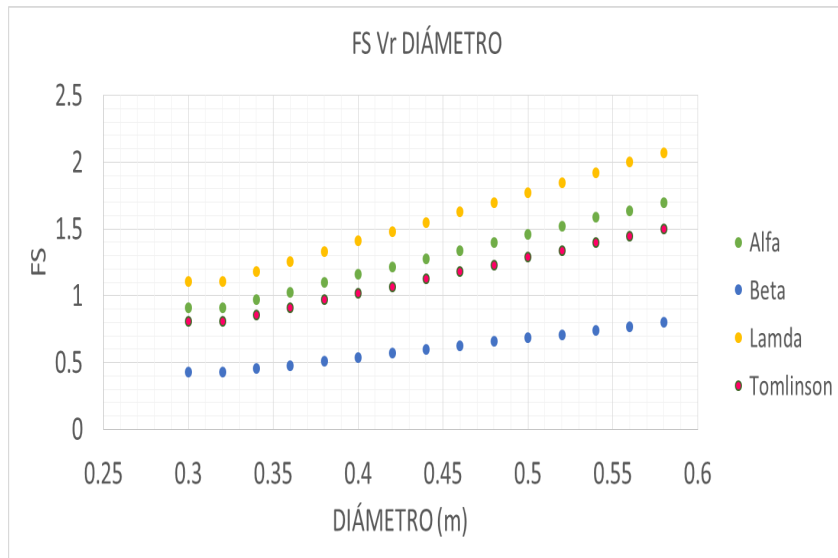


Figura 5.5: Factor de seguridad para Qs vs diámetro del pilote

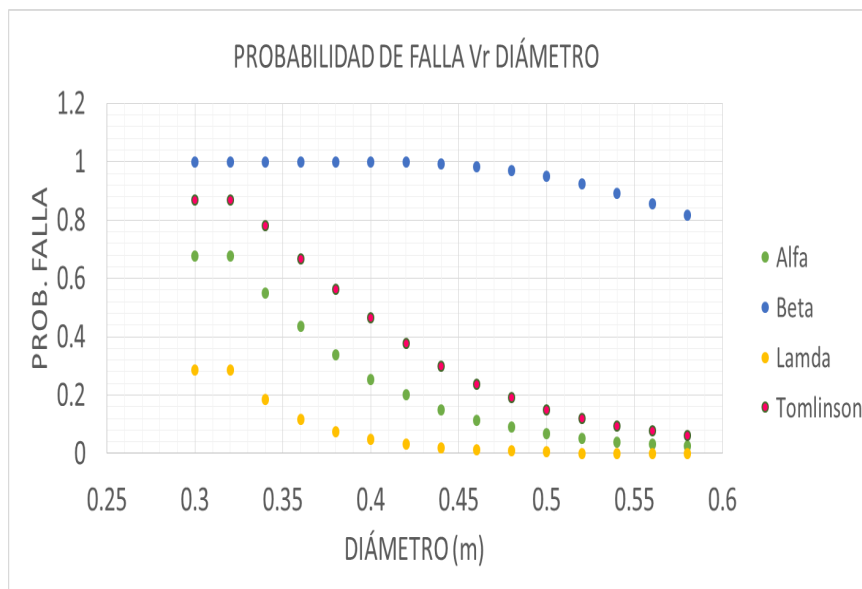


Figura 5.6: Probabilidad de falla para Q_s vs diámetro del pilote

5.2. PERFIL DE ARENAS

Se realizaron pruebas en el programa DAP-C, para determinar la capacidad portante para diferentes métodos de un pilote de 4.5 m de longitud, variando su diámetro desde 0.3 m hasta 0.6 m. A este pilote se le aplica una carga de 300 kN para determinar la capacidad por punta y de 1000kN para determinar la capacidad por fuste. Este pilote se encuentra ubicado en un perfil de suelo, cuyos parámetros son presentados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros empleados para el perfil del suelo

Parámetro	Media	Unidades	CV
γ	18	kN/m ³	25 %
c_u	0	kN/m ²	
ϕ	33	°	3 %
Nivel freático	5	m	
Espesor de la capa	20	m	

Las gráficas que se obtienen con los resultados del programa para capacidad por punta son presentadas en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 y para capacidad por fuste son presentadas en las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12.

En todos los métodos se presenta un comportamiento similar. El método que presentó

una mayor capacidad portante fue el Meyerhof debido a que este autor presenta ecuaciones en las cuales el diámetro posee una gran influencia.

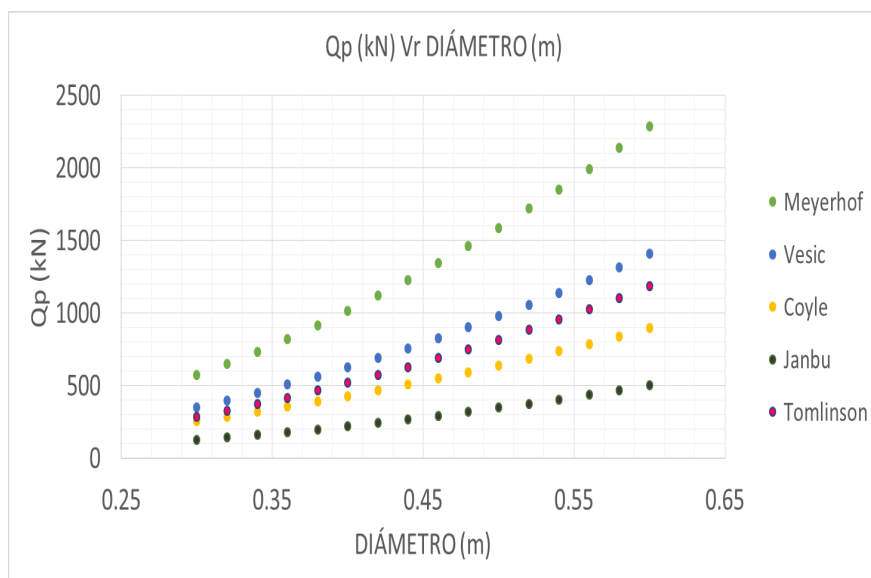


Figura 5.7: Q_p vs diámetro del pilote

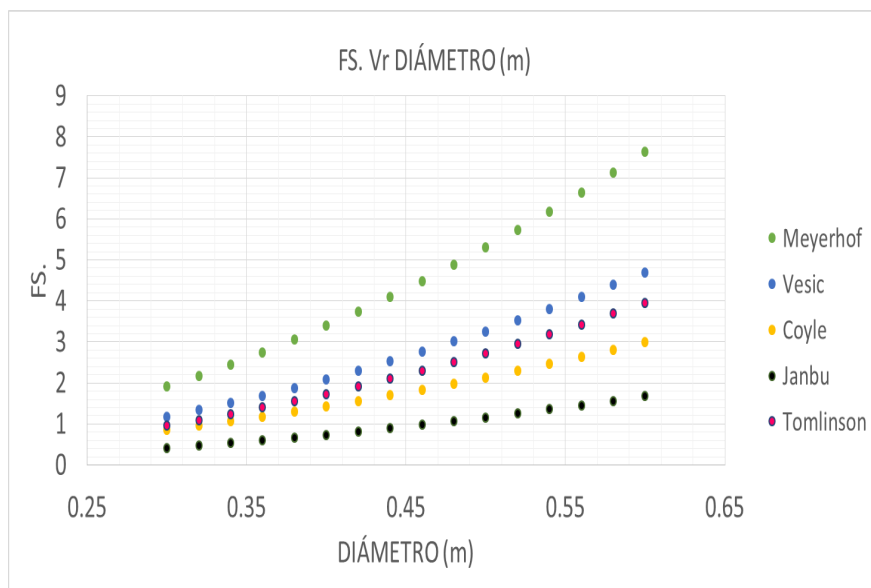


Figura 5.8: Factor de seguridad para Q_p vs diámetro del pilote

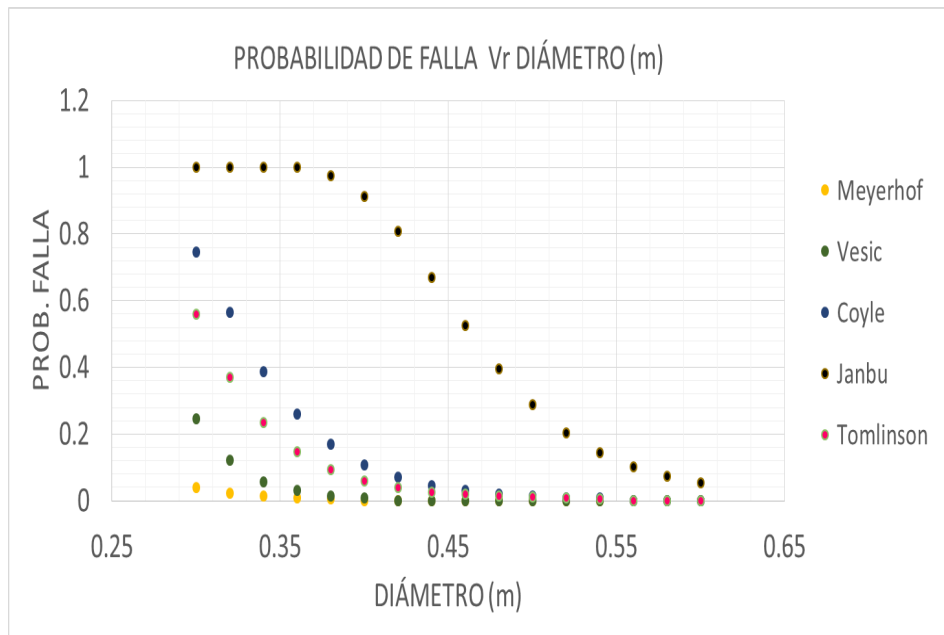


Figura 5.9: Probabilidad de falla para Q_p vs diámetro del pilote

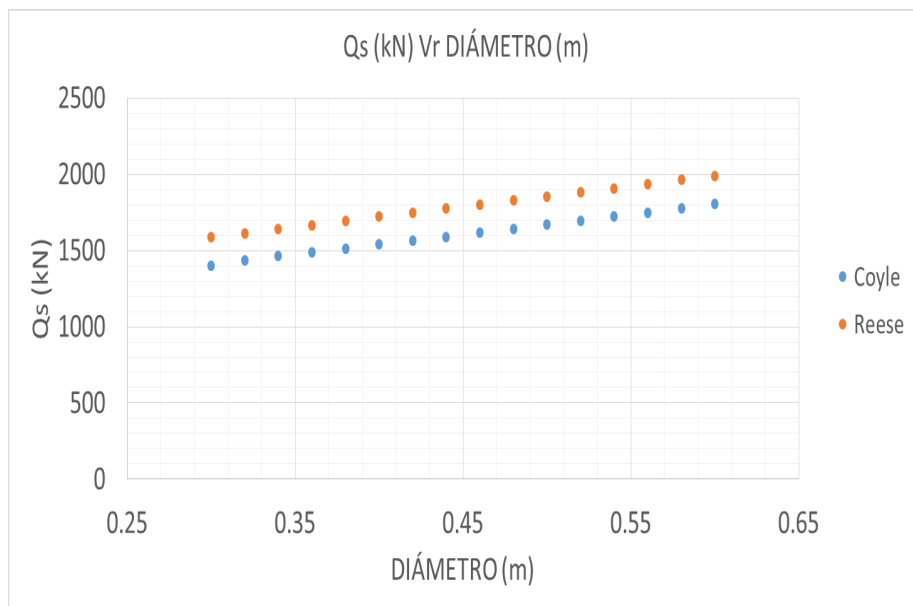


Figura 5.10: Q_s vs diámetro del pilote

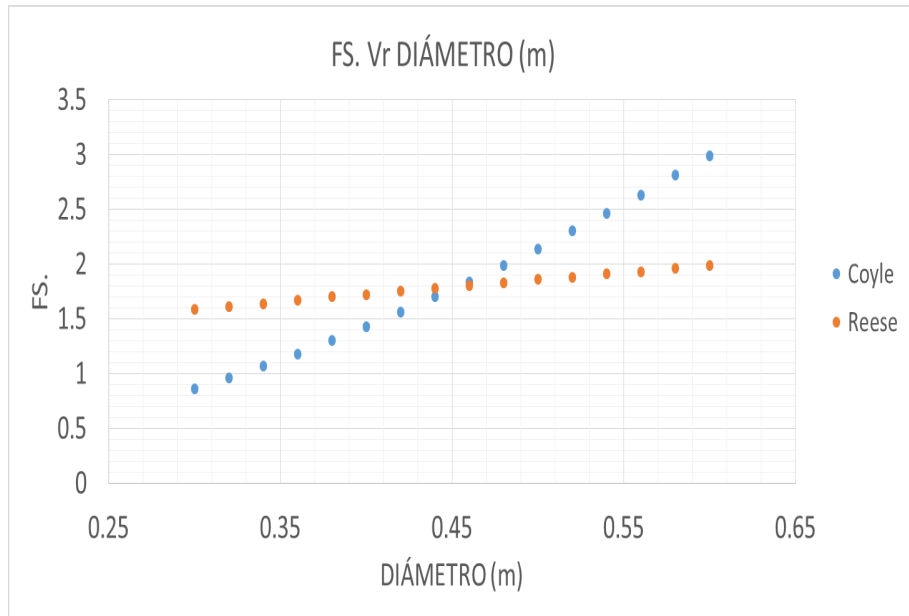


Figura 5.11: Factor de seguridad para Qs vs diámetro del pilote

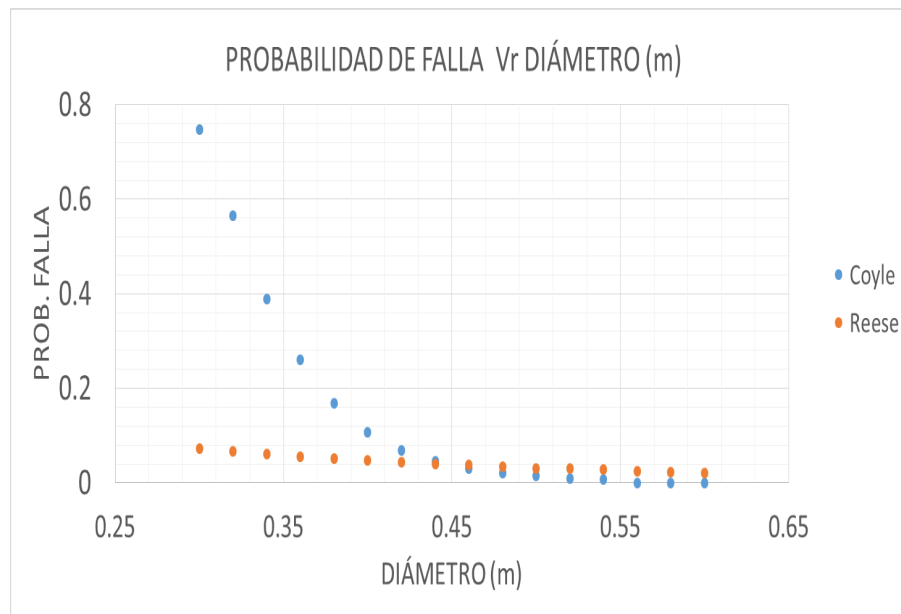


Figura 5.12: Probabilidad de falla para Qs vs diámetro del pilote

Capítulo 6

COMENTARIOS

- Para el cálculo de la capacidad última de un pilote es necesario conocer las propiedades del suelo en el que va a ser cimentado. Debido a que en la práctica no se tiene certeza de los valores de las propiedades, es útil tener una herramienta que permita determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento, específicamente la probabilidad de falla.
- Al presentarse varias ecuaciones empíricas y analíticas en el cálculo de la resistencia última del pilote y debido a la incertidumbre que se presenta en estas metodologías, se implementó un análisis de probabilidad como una herramienta para la modelación de los parámetros con mayor influencia en el cálculo de la capacidad portante. Lo cual permitió conocer la influencia de la incertidumbre en el factor de seguridad y la probabilidad de falla.
- A diferencia de otros software, el programa desarrollado en este trabajo de grado permite a los usuarios conocer las consideraciones y parámetros empleados en el desarrollo de cada una de las metodologías, de tal forma que el usuario sea consciente y tenga control de las incertidumbres y suposiciones que cada autor plantea.
- Las distribuciones de probabilidad aplicada en la ingeniería pueden simular el comportamiento de alguna variable. El programa puede generar variables que representen el suelo con funciones de probabilidad normales, triangulares y lognormales. El modelo realizado describe la probabilidad de que un evento ocurra en este caso la resistencia de un pilote con una función de probabilidad de distribución normal.
- Al analizar el comportamiento de los coeficientes de variación, se evidencia que el coeficiente de variación es menos representativo en la incertidumbre cuando la función de probabilidad es simétrica.
- Es importante mencionar que al adoptar variables de entrada no correlacionadas los resultados del programa presentarán incertidumbres menores debido a que se tendrán

en cuenta más eventos probables. Además si la incertidumbre para encontrar un coeficiente de variación es elevada, encontrar el coeficiente de variación entre dos variables con certeza tendría una mayor incertidumbre.

- Cabe resaltar que las metodologías de capacidad portante presentan una gran variabilidad en los resultados debido a que en su mayoría son producto de correlaciones empíricas, o son el resultado de la investigación de un solo tipo de suelo.

Capítulo 7

ANEXOS

Ver CD-Room DAP-C

Bibliografía

- Baecher, Gregory B. y Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. Wiley.
- Bowles, J. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill, Singapore, 5th edition.
- Coduto, D. (1994). *Foundation Design. Principles and Practices*. Prentice Hall, New Jersey, 1nd edition.
- Das, B. M. (2006). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. International Thomson editores, 5 edition.
- Phoon, K.-K. and Kulhawy, F. H. (1999). Evaluation of geotechnical property variability. page 637.
- Poulos, H. and Davis, E. (1980). *Piles Foundation Analysis and Design*. Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, Canada, 1st edition.
- Prakash, S. (1990). *Pile foundations in engineering practice*. Wiley Interscience, f, f edition.
- Smolczyk, U. (2003). *Geotechnical Engineering Handbook, Volume 3, Elements and Structures*. Wiley.
- Tomlinson, M. J. and J., W. (2008). *Pile design and construction practice*. Taylor and Francis, London, 5 edition.

ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES (Licencia de uso)

Bogotá, D.C., 10 de julio de 2014

Señores
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.
Pontificia Universidad Javeriana
Ciudad

Los suscritos:

Ana Maria López Rovira	,	con C.C. No	1018462398
Juan Sebastian Murcia Plaza	,	con C.C. No	1018447026
	,	con C.C. No	

En mi (nuestra) calidad de autor (es) exclusivo (s) de la obra titulada:

Desarrollo de un programa de diseño geotécnico de pilotes en arenas y arcillas con carga axial empleando métodos de análisis basados en confiabilidad

_____ (por favor señale con una “x” las opciones que apliquen)

Tesis doctoral Trabajo de grado Premio o distinción: Si No

cual:

presentado y aprobado en el año 2014, por medio del presente escrito autorizo (autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mi (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	x	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	x	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	x	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	X	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	X	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de

acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Pregrado ingeniería civil

ANEXO 3
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO
FORMULARIO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO						
Desarrollo de un programa de diseño geotécnico de pilotes en arenas y arcillas con carga axial empleando métodos de análisis basados en confiabilidad						
SUBTÍTULO, SI LO TIENE						
AUTOR O AUTORES						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
López Rovira			Ana Maria			
Murcia Plaza			Juan Sebastian			
DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Prada Sarmiento			Luis Felipe			
Ramos Cañon			Alfonso Mariano			
FACULTAD						
Ingeniería						
PROGRAMA ACADÉMICO						
Tipo de programa (seleccione con "x")						
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado			
X						
Nombre del programa académico						
Ingeniería civil						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
Maria Patricia León Neira						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
Ingeniero civil						
PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO			NÚMERO DE PÁGINAS	
Bogotá D.C.		2014			116	
TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con "x")						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
x		x				
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
<p>Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.</p>						
Visual Basic 6.0.						

MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo	7.92	1	X		
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Pilotes			Piles		
Carga axial			Axial load		
Capacidad por fuste			Skin friction		
Capacidad por punta			End bearing		
Análisis de confiabilidad			Reliability analysis		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS					
<p>Programa de computador que emplea diferentes metodologías para el diseño geotécnico de pilotes sometidos a carga axial, de tal forma que se evalúe tanto la capacidad por punta como la capacidad por fuste empleando la teoría de la confiabilidad. Este programa ofrece la posibilidad de analizar distintas probabilidades de falla para el factor de seguridad y margen de seguridad, al igual que el índice de confiabilidad para un pilote definido en una interfaz del suelo establecida.</p> <p>Computer program that uses different methods for the geotechnical design of piles under axial load, evaluating skin friction and end bearing capacity using reliability theory. This program offers the possibility to analyze different probabilities of failure for the safety factor and margin, as well as the reliability index defined for a pile in a ground set interface.</p>					