

ANEJO 1. CÁLCULO.

Soluciones de cimentación en parcela del Puerto de Valencia

Índice

Índice de tablas

Índice de gráficas

Índice de ilustraciones

1. Introducción	6
2. Datos del terreno.....	6
3. Cimentación directa	8
3.1 Introducción	8
3.2 Comprobación hundimiento.....	8
3.3 Comprobación asiento	18
4. Cimentaciones indirectas	30
4.1 Introducción	30
4.2 Comprobación hundimiento.....	32
4.3 Comprobación asiento	45
4.4 Carga máxima en pilotes.....	48
4.4.1 Tipo 1	48
4.4.2 Tipo 2.....	49
4.4.3 Tipo 3.....	49

Índice de tablas

TABLA 1. Características geomecánicas del Nivel 0.	7
TABLA 2. Características geomecánicas del Nivel A2.	7
TABLA 3. Características geomecánicas del Nivel A3.	7
TABLA 4. Características geomecánicas del Nivel B.	7
TABLA 5. Factores de corrección de BRINCH-HANSEN.	9
TABLA 6. Carga de hundimiento mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, zapatas aisladas.	12
TABLA 7. Carga de hundimiento mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, zapatas corridas.	15
TABLA 8. Parámetros empleados para la determinación de los asientos mediante la expresión de BURLAND-BURBIDGE, zapatas aisladas.	20
TABLA 9. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =3, zapatas aisladas.	20
TABLA 10. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =4, zapatas aisladas.	21
TABLA 11. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =5, zapatas aisladas.	21
TABLA 12. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =6, zapatas aisladas.	22
TABLA 13. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =7, zapatas aisladas.	23
TABLA 14. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =8, zapatas aisladas.	23
TABLA 15. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =9, zapatas aisladas.	24
TABLA 16. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =9, zapatas aisladas.	24

TABLA 17. Cuadro resumen de cargas máximas por condición de asiento, asiento impuesto 2,5 cm, zapatas aisladas.....	25
TABLA 18. Parámetros empleados para la determinación de los asientos mediante la expresión de BURLAND-BURBIDGE, zapatas corridas.....	26
TABLA 19. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =3, zapatas corridas.	27
TABLA 20. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =4, zapatas corridas.	27
TABLA 21. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =5, zapatas corridas.	28
TABLA 22. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =6, 7, 8, 9 y 10, zapatas corridas.	28
TABLA 23. Cuadro resumen de cargas máximas por condición de asiento, asiento impuesto 2,5 cm, zapatas corridas.	29
TABLA 24. Unidades litoestratigráficas.	31
TABLA 25. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel 0, pilote tipo1.	37
TABLA 26. Resistencia unitaria por el fuste a corto plazo, terreno cohesivo Nivel A2, pilote tipo 1.	37
TABLA 27. Resistencia unitaria por el fuste a largo plazo, terreno cohesivo nivel A2, pilote tipo 1.	38
TABLA 28. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular A3, pilote tipo 1.	38
TABLA 29. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular nivel B, pilote tipo 1.	38
TABLA 30. Resistencia unitaria por la punta, terreno granular Nivel B, pilote tipo 1....	38
TABLA 31. Cuadro resumen de la carga de admisible (Q_{adm}) de los pilotes tipo 1 y la carga útil (Q_u) una vez reducida esta por el peso efectivo del propio pilote. .	39
TABLA 32. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel 0, pilote tipo 2.	40
TABLA 33. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel A3, pilote tipo 2... 40	
TABLA 34. Calculo del ángulo de rozamiento interno ponderado dada la afección de la punta al Nivel B, pilotes tipo 2.	40
TABLA 35. Resistencia unitaria por la punta, terreno granular Nivel A3 con afección al Nivel B, pilotes tipo 2.	41
TABLA 36. Cuadro resumen de la carga de admisible (Q_{adm}) de los pilotes tipo 2 y la carga útil (Q_u) una vez reducida esta por el peso efectivo del propio pilote. .	41

TABLA 37. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel 0, pilote tipo 3.	42
TABLA 38. Resistencia unitaria por el fuste a corto plazo, terreno cohesivo Nivel A2, pilote tipo 3.	42
TABLA 39. Resistencia unitaria por el fuste a largo plazo, terreno cohesivo Nivel A2, pilote tipo 3.	43
TABLA 40. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel B, pilote tipo 3.	43
TABLA 41. Resistencia unitaria por la punta, terreno granular Nivel B, pilote tipo 3.	43
TABLA 42. Cuadro resumen de la carga de admisible (Q_{adm}) de los pilotes tipo 3 y la carga útil (Q_u) una vez reducida esta por el peso efectivo del propio pilote.	44
TABLA 43. Carga máxima en cabeza de pilote, asiento máximo impuesto 2,5 cm, pilote tipo 1.	46
TABLA 44. Carga máxima en cabeza de pilote, asiento máximo impuesto 2,5 cm, pilote tipo 2.	46
TABLA 45. Carga máxima en cabeza de pilote, asiento máximo impuesto 2,5 cm, pilote tipo 3.	47
TABLA 46. Cuadro resumen carga máxima admisible por condición de hundimiento vs. condición de asiento, pilote tipo 1.	48
TABLA 47. Cuadro resumen carga máxima admisible por condición de hundimiento vs. condición de asiento, pilote tipo 2.	49
TABLA 48. Cuadro resumen carga máxima admisible por condición de hundimiento vs. condición de asiento, pilote tipo 3.	49

Índice de gráficas

GRÁFICA 1. Relación entre la carga de hundimiento, dimensiones de la zapata y profundidad del plano de cimentación, zapatas aisladas.	13
GRÁFICA 2. Relación entre la carga de hundimiento y la profundidad del plano de cimentación, zapatas aisladas.	13
GRÁFICA 3. Relación entre la carga de hundimiento y las dimensiones de la zapata, zapatas aisladas.	14
GRÁFICA 4. Relación entre la carga de hundimiento, dimensión de zapata y profundidad del plano de cimentación, zapatas corridas.	16
GRÁFICA 5. Relación entre la carga de hundimiento y la profundidad del plano de cimentación, zapatas corridas.	16
GRÁFICA 6. Relación entre la carga de hundimiento y la dimensión de la zapata, zapatas corridas.	17
GRÁFICA 7. Tendencia de la carga de hundimiento de los pilotes tipo 1.	39
GRÁFICA 8. Tendencia de la carga de hundimiento de los pilotes tipo 2.	42
GRÁFICA 9. Tendencia de la carga de hundimiento de los pilotes tipo 3.	44

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. Ubicación de la parcela objeto de estudio.	6
ILUSTRACIÓN 2. Ubicación de los tipos de pilotes y su estratigrafía colindante.	31

1. Introducción

En este Anejo se describen los cálculos realizados en este estudio para la verificación de las comprobaciones geotécnicas exigidas por la ROM-05/05 sobre estados límites últimos y de servicio para distintas dimensiones y tipologías de cimentación en la parcela ubicada en la ampliación norte del puerto de Valencia.



ILUSTRACIÓN 1. Ubicación de la parcela objeto de estudio.

Este anejo recoge los cálculos correspondientes a dos tipologías de cimentaciones directas y una de cimentaciones indirectas. Las dos tipologías de cimentaciones directas son: zapatas cuadradas de ancho $B=1, 2, 3, 4$, y 5 m y zapatas corridas de ancho $B=1, 2, 3, 4$ y 5 m . En cuanto a las cimentaciones indirectas se han calculado pilotes individuales de diámetros $0,6, 0,7, 0,8, 0,9$ y 1 m , ubicados en 3 localizaciones distintas, con diferentes parámetros geomecánicos en cada una de ellas.

2. Datos del terreno

Las características del terreno han sido descritas en la memoria del presente trabajo, en el apartado de análisis de la información geotécnica. En este anejo se tendrán en cuenta los parámetros geomecánicos característicos de los estratos denominados niveles 0, A2, A3 y B, el nivel A1 al tratarse de un estrato de pequeña entidad se despreciará para el cálculo y se añadirá su potencia al Nivel 0, con peores características, quedando del lado de la seguridad.

El Nivel 0 con una potencia de $15,5\text{-}17,5\text{ m}$ y contiguo a este el Nivel A2 con una potencia de $3\text{-}5\text{ m}$, subyacente a el nivel A3 con una potencia de $3\text{-}5\text{ m}$ y el nivel B con una potencia de $5,5\text{-}8\text{ m}$, con las siguientes características geotécnicas:

- Nivel 0

		Nivel 0	Unidad
γ_d	Peso específico seco	13	KN/M3
γ_{sat}	Peso específico saturado	17	KN/M3
C_u	Cohesion no drenada	0	kPa
C'	Cohesion efectiva	0	kPa
ϕ'	Angulo de rozamiento	30 °	
E'	Modulo de elasticidad	7	Mpa
OCR	Grado de sobreconsolidacion	1	
ν	Coefficiente de poisson	0,3	
k_v	Permeabilidad vertical	-	m/s
k_h	Permeabilidad horizontal	-	m/s

TABLA 1. Características geomecánicas del Nivel 0.

- Nivel A2

		Nivel A2	Unidad
γ_d	Peso específico seco	17	KN/M3
γ_{sat}	Peso específico saturado	20,5	KN/M3
C_u	Cohesion no drenada	65	kPa
C'	Cohesion efectiva	20	kPa
ϕ'	Angulo de rozamiento	31 °	
E'	Modulo de elasticidad	10	Mpa
OCR	Grado de sobreconsolidacion	1	
ν	Coefficiente de poisson	0,3	
k_v	Permeabilidad vertical	1,0 E-8	m/s
k_h	Permeabilidad horizontal	1,0 E-7	m/s

TABLA 2. Características geomecánicas del Nivel A2.

- Nivel A3

		Nivel A3	Unidad
γ_d	Peso específico seco	16	KN/M3
γ_{sat}	Peso específico saturado	18,5	KN/M3
C_u	Cohesion no drenada	0	kPa
C'	Cohesion efectiva	0	kPa
ϕ'	Angulo de rozamiento	31 °	
E'	Modulo de elasticidad	26	Mpa
ν	Coefficiente de poisson	0,3	
k_v	Permeabilidad vertical	7,0 E-4	m/s
k_h	Permeabilidad horizontal	7,0 E-3	m/s

TABLA 3. Características geomecánicas del Nivel A3.

- Nivel A3

		Nivel B	Unidad
γ_d	Peso específico seco	16	KN/M3
γ_{sat}	Peso específico saturado	18	KN/M3
C_u	Cohesion no drenada	-	kPa
C'	Cohesion efectiva	0	kPa
ϕ'	Angulo de rozamiento	37 °	
E'	Modulo de elasticidad	35	Mpa
ν	Coefficiente de poisson	0,3	
k_v	Permeabilidad vertical	1,0 E-3	m/s
k_h	Permeabilidad horizontal	1,0 E-3	m/s

TABLA 4. Características geomecánicas del Nivel B.

3. Cimentación directa

3.1 Introducción

Para el análisis del comportamiento de las cimentaciones directas se establecen las siguientes tipologías: zapatas cuadradas y zapatas corridas.

En cuanto a las dimensiones de las zapatas, tanto aisladas como corridas, se van a modelizar en este trabajo las siguientes combinaciones: 1, 2 3, 4 y 5 m de lado con plano de cimentación a profundidades de 1, 2 y 3 m.

Las comprobaciones geotécnicas que se van a realizar serán las de hundimiento (=Estado Límite Último) y deformaciones excesivas comúnmente denominadas asientos (=Estado límite de Servicio).

Puesto que no se conocen las cargas que se van a transmitir, para la combinación de modelo que se va a calcular se va a suponer que las cargas serán verticales y centradas de modo que no serán necesarias las comprobaciones de deslizamiento y vuelco. En el caso de que se construya definitivamente una estructura completa habrá que completar este trabajo con esos cálculos siempre que los esfuerzos horizontales transmitidos a la cimentación superen el 10 % de los esfuerzos verticales.

3.2 Comprobación hundimiento

3.2.1 Método de cálculo

La metodología de cálculo empleada frente a la comprobación de hundimiento, es la descrita en la ROM 0.5-05 en su apartado “3.5 CIMENTACIONES SUPERFICIALES” concretamente el método descrito en el subapartado “3.5.4.8 Cálculo analítico de la carga de hundimiento” y mediante la fórmula polinómica, la utilizada con mayor frecuencia para la verificación de la seguridad frente a hundimiento de las cimentaciones superficiales y la que recomienda la citada norma es la conocida bajo el nombre de BRINCH-HANSEN:

$$q_{vh} = q \cdot N_q \cdot f_q + c \cdot N_c \cdot f_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B^* \cdot N_\gamma \cdot f_\gamma$$

donde:

q =sobrecarga debida al peso de tierras a la profundidad de la cimentación, en el entorno del cimientto. Tanto la sobrecarga debida al peso de tierras a la profundidad de la cimentación, como el peso específico del suelo serán en efectivas

- c = cohesión.
- γ = peso específico del suelo.
- N_q, N_c, N_γ = coeficientes de capacidad de carga.
- f_q, f_c, f_γ = factores de corrección.
- B^* = ancho eficaz de la cimentación superficial, en nuestro caso como se consideran cargas centrada el ancho eficaz coincidirá con el ancho real.

3.2.1.1 Coeficiente de capacidad de carga

Los coeficientes de capacidad de carga son función exclusiva del Angulo de rozamiento del terreno y pueden obtenerse mediante las expresiones analíticas siguientes:

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot e^{\pi \tan \phi} \quad N_c = \frac{N_q - 1}{\tan \phi} \quad N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi$$

3.2.1.2 Factores de corrección

Por último, se encuentran los factores de corrección, que se obtendrán siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.5.4.8.2 de la ROM 0.5-05, donde esta norma dice: “cada uno de los tres términos de la forma polinómica debe ser afectado por un coeficiente de corrección, f , cuyo subíndice indicara el término al que corresponde”, se consideraran los siguientes efectos:

Efecto	Coeficiente
Forma de la cimentación	s
Inclinación de la carga	i
Resistencia del terreno ubicado sobre el plano de apoyo	d
Inclinación del plano de apoyo	r
Pendiente del terreno en el entorno de la cimentación	t

TABLA 5. Factores de corrección de BRINCH-HANSEN.

Cada uno de los coeficientes, f , será resultado del producto de los coeficientes de la tabla de la siguiente forma:

$$f = s \cdot i \cdot d \cdot r \cdot t$$

Se obtendrán los coeficientes de la tabla del siguiente modo:

○ Coeficiente de forma

Este coeficiente hace referencia a la relación entre el ancho y el largo de la cimentación, teniendo en cuenta las proporciones de las dimensiones en planta de la cimentación equivalente.

$$s_q = 1 + \frac{B^*}{L^*} \cdot \frac{N_q}{N_c} \quad s_c = s_q \quad s_\gamma = 1 - 0,4 \cdot \frac{B^*}{L^*}$$

○ Coeficiente de inclinación

Este coeficiente contempla la desviación de la dirección de la acción resultante sobre el plano de apoyo respecto a la dirección vertical.

Como se ha establecido en los criterios iniciales las cargas serán perpendiculares y centradas al plano de cimentación, por esto los coeficientes tomarán valor igual a la unidad.

$$i_q = i_c = i_\gamma = 1$$

○ Efecto de la resistencia del terreno sobre el plano de cimentación

Este coeficiente permite aumentar la carga de hundimiento en las situaciones en las que el terreno del entorno de la cimentación, se encuentra permanentemente integro, si grietas naturales o artificiales, dado que el terreno sobre el que se prevé cimentar se trata de rellenos artificiales, se entiende que la condición expuesta anteriormente no se cumple por lo que no se permitirá aumentar la carga de hundimiento y se tomará este coeficiente con valor la unidad.

$$d_q = d_c = d_\gamma = 1$$

○ Efecto de inclinación del plano de cimentación

Este coeficiente pondera de manera que, si el terreno sobre el que se va a cimentar esta inclinado la carga de hundimiento se verá reducida, en el estudio que se está tratando se establece que el plano de cimentación no tendrá ningún tipo de inclinación por lo que este coeficiente no afectará a la carga de hundimiento, se tomará este valor como la unidad.

$$r_q = r_c = r_\gamma = 1$$

○ Cimentaciones en zonas de pendiente

Este coeficiente minora la carga de hundimiento por cimentación próxima a un talud o terreno inclinado, de este modo el terreno sobre el que se pretende cimentar no presenta esta característica por lo que este coeficiente no afectara al cálculo de la carga de hundimiento y se tomara este valor como la unidad.

$$t_q = t_c = t_\gamma = 1$$

Una vez obtenida la carga de hundimiento mediante la fórmula polinómica de BRINCH-HANSEN se realizará una reducción de esta para cumplir la exigencia de seguridad frente a hundimiento expuesta en el apartado 3.5.4.9 de la ROM 0.5-05, se utiliza la siguiente relación:

$$F = \frac{q_{vh}}{q_v}$$

De la tabla 3.5.4 “Coeficientes de seguridad frente al hundimiento de cimentaciones superficiales. Valores mínimos reconocidos para las obras de carácter ISA bajo” de la ROM 0.5-05, tomamos el valor de F igual a 3, de este modo se queda del lado de la seguridad.

3.2.2 Resultados obtenidos

3.2.2.1 Zapatas aisladas

A continuación, se detalla el cálculo de los coeficientes de la expresión de BRINCH-HANSEN, así como el cálculo de la carga de hundimiento empleando la citada expresión de cálculo, estableciendo los siguientes criterios:

- Zapatas cuadradas de dimensión B= (1, 2, 3, 4, 5) m.
- Cargas centradas.
- El terreno de apoyo lo constituye un relleno granular de procedencia diversa.
- Profundidades de cimentación consideradas D= (1, 2 y 3) m

Los coeficientes dados estos criterios son los siguientes:

- Coeficientes de capacidad de carga:

Dado que los coeficientes de capacidad de carga son relación directa del Angulo de rozamiento interno y este es el mismo para todos los casos, los coeficientes son: $N_q=18,40$, $N_c=30,14$ Y $N_\gamma=20,09$.

▪ Factores de corrección.

Al tratarse de zapatas cuadradas la relación entre ancho y largo es 1 en todos los casos y dado que el coeficiente de forma viene determinado por dicha relación, los coeficientes son los siguientes: $s_q=1,61$, $s_c=1,61$ y $s_\gamma=0,6$.

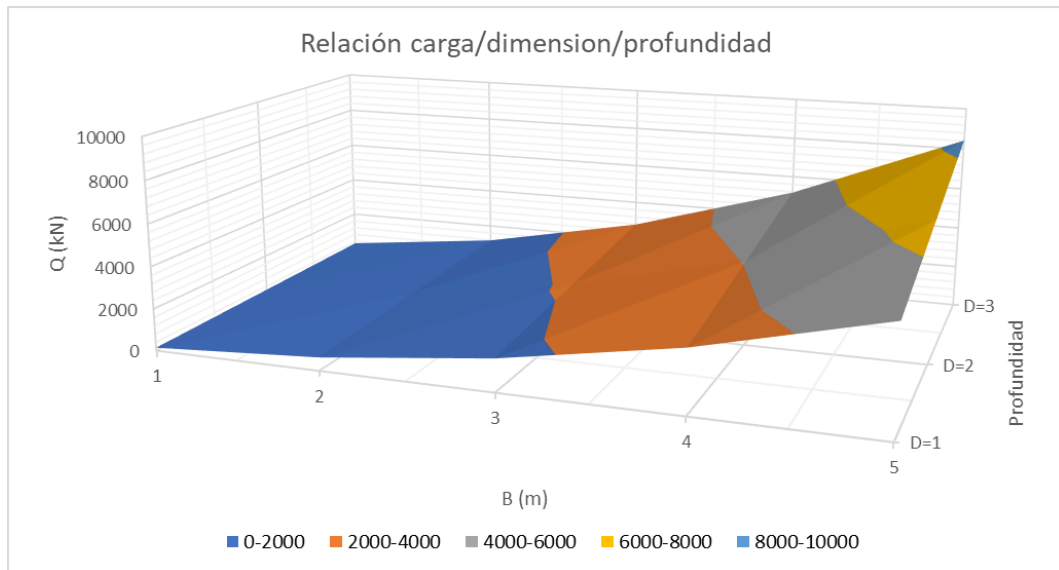
Los coeficientes de inclinación, efecto de la resistencia del terreno sobre el plano de cimentación, efecto de la inclinación del plano de cimentación y el coeficiente referente a las cimentaciones situadas en zonas de pendiente, se tomarán con valor igual a la unidad, como ya se ha descrito en el apartado anterior.

▪ Cálculo de la carga de hundimiento.

D (m)	B (m)	q _{vh} (kPa)	q _{Adm} (kPa)	Q (kN)
1	1	427,46	142,49	142,49
	2	469,65	156,55	626,20
	3	511,85	170,62	1535,55
	4	554,04	184,68	2954,90
	5	596,24	198,75	4968,66
2	1	634,91	211,64	211,64
	2	677,10	225,70	902,80
	3	719,30	239,77	2157,89
	4	761,49	253,83	4061,29
	5	803,69	267,90	6697,40
3	1	842,36	280,79	280,79
	2	884,55	294,85	1179,40
	3	926,75	308,92	2780,24
	4	968,94	322,98	5167,69
	5	1011,14	337,05	8426,14

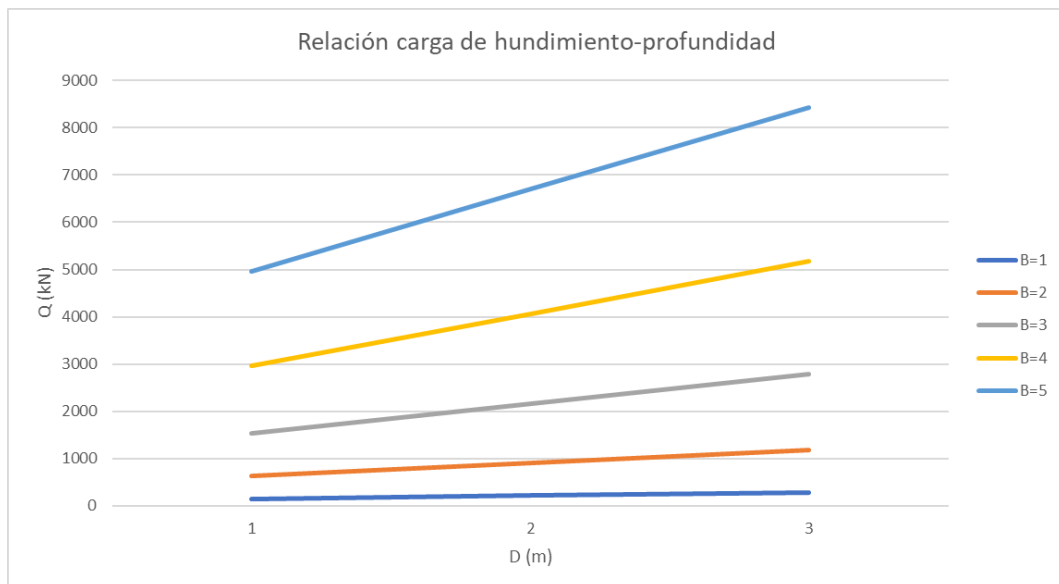
TABLA 6. Carga de hundimiento mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, zapatas aisladas

En la tabla se muestran los resultados obtenidos para cada una de las combinaciones de ancho de cimentación y profundidad del plano de apoyo que se han explicado anteriormente.



GRÁFICA 1. Relación entre la carga de hundimiento, dimensiones de la zapata y profundidad del plano de cimentación, zapatas aisladas.

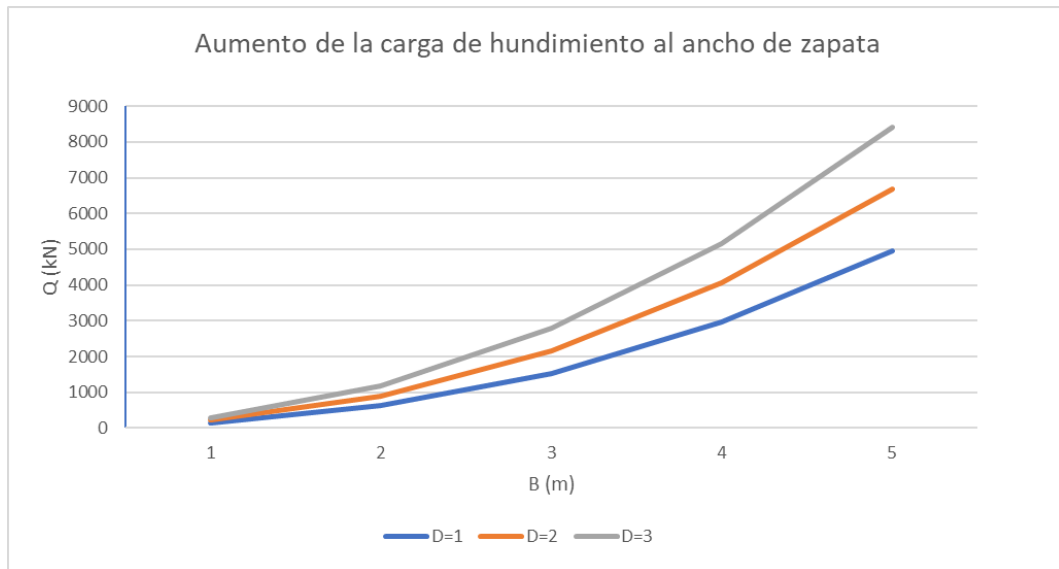
Dada la gráfica 1, si se establecen planos de corte en cada una de las dimensiones de zapata (valores B) paralelos al plano Q/Profundidad, se obtiene la relación de la carga de hundimiento respecto a la profundidad para cada ancho de zapata ofreciendo como resultado la siguiente gráfica:



GRÁFICA 2. Relación entre la carga de hundimiento y la profundidad del plano de cimentación, zapatas aisladas.

A la vista de los resultados obtenidos podemos concluir que a mayor profundidad del plano de cimentación las cargas admisibles aumentan de una forma más o menos lineal para cada dimensión de zapata, como era de esperar.

Si se realiza el mismo proceso pero estableciendo planos de corte paralelos al plano Q/B, sobre cada una de las profundidades del plano de cimentación, se obtiene lo siguiente:



GRÁFICA 3. Relación entre la carga de hundimiento y las dimensiones de la zapata, zapatas aisladas.

Se observa un crecimiento con una tendencia exponencial de la carga de hundimiento conforme aumentan las dimensiones de la zapata para cada profundidad del plano de cimentación, además de un aumento de la pendiente de la recta de tendencia conforme aumenta la profundidad del plano de cimentación.

3.2.2.2 Zapata corrida

A continuación, se detalla el cálculo de los coeficientes de la expresión de BRIECH-HANSEN, así como el cálculo de la carga de hundimiento empleando la citada expresión de cálculo, estableciendo los siguientes criterios:

- Zapatas corridas, de dimensión $B= (1, 2, 3, 4, 5)$ m y $L=1$ m.
- Cargas centradas.
- El terreno de apoyo lo constituye un relleno granular de procedencia diversa.
- Profundidades de cimentación consideradas $D= (1, 2 \text{ y } 3)$ m

Los coeficientes dados estos criterios son los siguientes:

▪ Coeficientes de capacidad de carga:

Dado que los coeficientes de capacidad de carga son relación directa del ángulo de rozamiento interno y este es el mismo para todos los casos, los coeficientes son: $N_q=18,40$, $N_c=30,14$ Y $N_\gamma=20,09$.

▪ Factores de corrección.

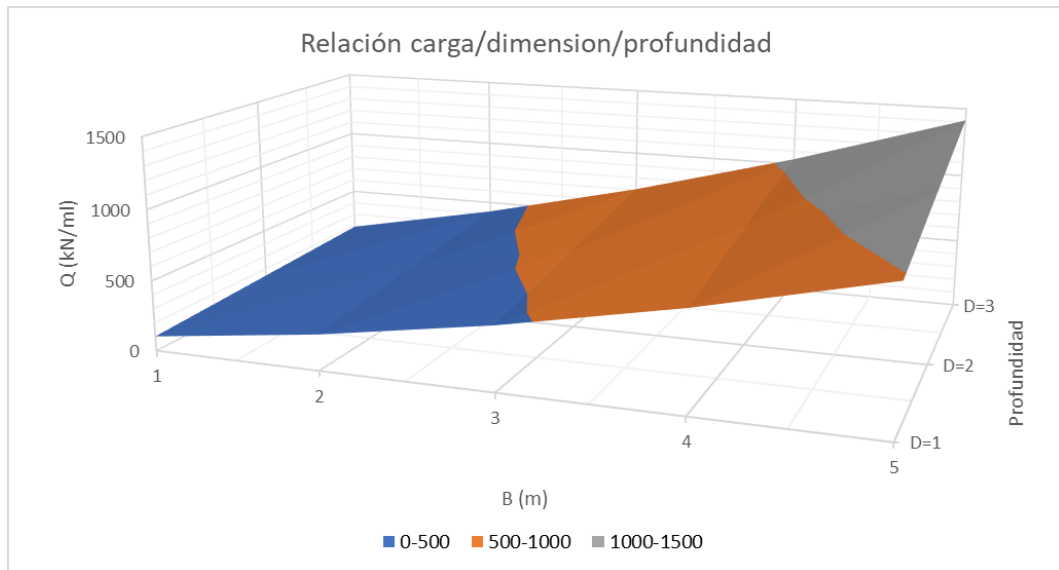
Los coeficientes de forma para las zapatas corridas serán igual a la unidad. Los coeficientes de inclinación, efecto de la resistencia del terreno sobre el plano de cimentación, efecto de la inclinación del plano de cimentación y el coeficiente referente a las cimentaciones situadas en zonas de pendiente, se tomarán con valor igual a la unidad, como ya se ha descrito en el apartado anterior.

▪ Cálculo de la carga de hundimiento.

D (m)	B (m)	q _{vh} (kPa/ml)	q _{Adm} (Kpa/ml)	Q (kN/ml)
1	1	309,54	103,18	103,18
	2	379,87	126,62	253,24
	3	450,19	150,06	450,19
	4	520,52	173,51	694,02
	5	590,84	196,95	984,74
2	1	438,35	146,12	146,12
	2	508,67	169,56	339,12
	3	579,00	193,00	579,00
	4	649,33	216,44	865,77
	5	719,65	239,88	1199,42
3	1	567,16	189,05	189,05
	2	637,48	212,49	424,99
	3	707,81	235,94	707,81
	4	778,13	259,38	1037,51
	5	848,46	282,82	1414,10

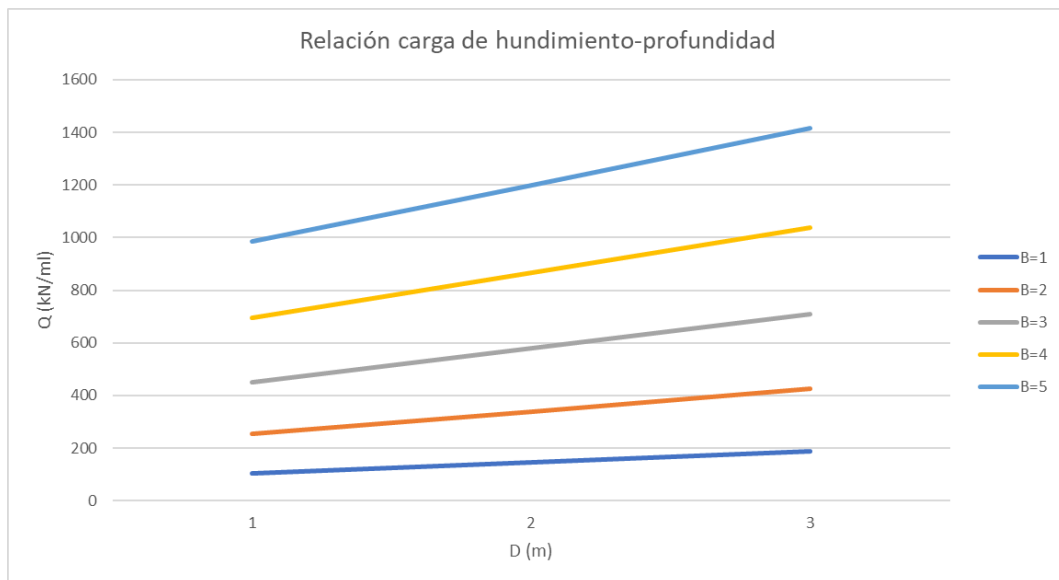
TABLA 7. Carga de hundimiento mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, zapatas corridas.

En la tabla se muestran los resultados obtenidos para cada una de las combinaciones de ancho de cimentación y profundidad del plano de apoyo que ha explicado anteriormente.



GRÁFICA 4. Relación entre la carga de hundimiento, dimensión de zapata y profundidad del plano de cimentación, zapatas corridas.

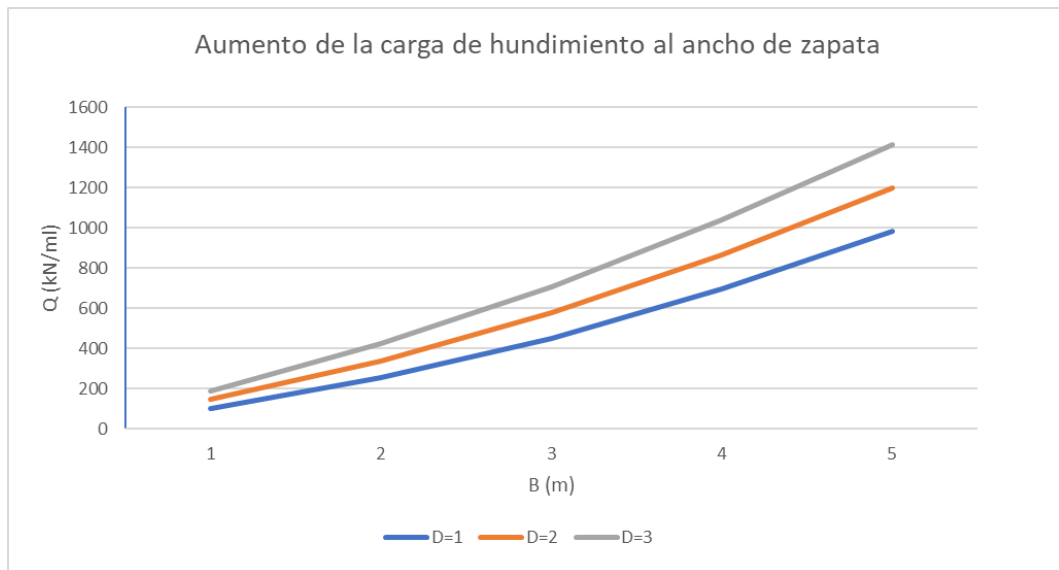
Dada la gráfica 4, si se establecen planos de corte en cada una de las dimensiones de zapata (valores B) paralelos al plano Q/Profundidad, se obtiene la relación de la carga de hundimiento respecto a la profundidad para cada ancho de zapata ofreciendo como resultado la siguiente gráfica:



GRÁFICA 5. Relación entre la carga de hundimiento y la profundidad del plano de cimentación, zapatas corridas.

A la vista de los resultados obtenidos podemos concluir que, del mismo modo que se comportan las zapatas aisladas, a mayor profundidad del plano de cimentación las cargas admisibles aumentan de una forma más o menos lineal para cada dimensión de zapata, como era de esperar.

Si se realiza el mismo proceso pero estableciendo planos de corte paralelos al plano Q/B, sobre cada una de las profundidades del plano de cimentación, se obtiene lo siguiente:



GRÁFICA 6. Relación entre la carga de hundimiento y la dimensión de la zapata, zapatas corridas.

Se observa un crecimiento con una tendencia exponencial de la carga de hundimiento conforme aumentan las dimensiones de la zapata para cada profundidad del plano de cimentación, no obstante esta es menos acusada que para zapatas aisladas.

Dado lo reflejado en la gráfica 4 podemos concluir, que esta tipología de cimentación directa se comporta de modo similar a las zapatas cuadradas, a excepción de que la diferencia entre las pendientes de las distintas rectas de dimensiones de zapata, es decir, las rectas $B=1$, $B=2$...etc., es menor que en el caso de zapatas aisladas, observándose líneas casi paralelas.

3.3 Comprobación asiento

3.3.1 Método de cálculo

La metodología de cálculo empleada frente a la comprobación de asientos es la descrita en la ROM 0.5-05 en su apartado 3.5.7 “Asientos y otros movimientos de las cimentaciones” concretamente el método referido en el subapartado 3.5.4.8 “Zapatas aisladas”, esta dice: “En cimentaciones sobre terrenos granulares, cuya compacidad se haya determinado mediante ensayos SPT, puede seguirse el procedimiento de cálculo de asientos indicado por J.B. Burland y M.C. Burbidge (1985)”, siguiendo esta recomendación se ha seguido este método para la determinación de asientos y esta tiene la siguiente expresión:

$$s_c = 100 \cdot z \cdot \left(\frac{1,25 \cdot \frac{L'}{B}}{\frac{L'}{B} + 0,25^1} \right)^2 \cdot \frac{1,71}{N^{1,4}} \cdot q \cdot f_1$$

donde:

N = Valor medio del SPT en la profundidad de referencia z, determinado sin corrección de profundidad y si hay información, con transformación de energía estándar del 60%.

q = Presión de cálculo en MPa.

z = Profundidad de referencia.

f₁ = Factor de minoración por el espesor de la capa de arena

La presión de cálculo se obtiene a partir de la presión transmitida q_t, y la presión de preconsolidación a cota de la cimentación q_c, y se obtiene mediante las siguientes expresiones:

$$q = q_t - \frac{2}{3} \cdot q_c \quad \text{cuando } q_t \geq q_c$$
$$q = \frac{1}{3} \cdot q_t \quad \text{cuando } q_t \leq q_c$$

Dado que se trata de arenas normalmente consolidadas q_c, será la tensión efectiva en el plano de cimentación.

Por otro lado, la profundidad de referencia se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$z = L_0 \cdot \left(\frac{B^*}{L_0} \right)^{0,75} \quad \text{donde} \quad L_0 = 1m$$

Por último, en cuanto a los factores que intervienen en la expresión de BURLAND-BURBIDGE, se encuentra el factor de minoración f_1 , que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Si } z \leq H_s & \quad f_1 = 1 \\ \text{Si } z > H_s & \quad f_1 = \frac{H_s}{z} \cdot \left(2 - \frac{H_s}{z} \right) \end{aligned}$$

donde H_s es la distancia entre el plano de apoyo de cimentación y el nivel incompresible.

3.3.2 Resultados obtenidos

3.3.2.1 Zapata aislada

A continuación, se detalla el cálculo de asientos mediante la expresión de BURLAND-BURBRIDGE, estableciendo los siguientes criterios:

- Zapatas cuadradas, de dimensión $B = (1, 2, 3, 4, 5)$ m.
- Cargas centradas.
- El terreno de apoyo lo constituye un relleno granular de procedencia diversa.
- Profundidades de cimentación consideradas $D = (1, 2 \text{ y } 3)$ m
- Se emplearán valores del SPT comprendidos entre 3 y 10, ambos inclusive, debido a que los resultados de este son muy dispersos según la campaña geotécnica de la que se parte.
- Asiento máximo admisible: 2,5 cm, según la ROM.

La siguiente tabla muestra los datos empleados para el cálculo de los asientos, dado que el único resultado que varía es el número de golpes del ensayo SPT el resto de parámetros serán los mismos par todos los casos.

Potencia (m)	16,00	L0 (m)	1,00	f1	1,00		
D (m)	Hs (m)	z (m)	B (m)	L (m)	qc (Mpa)	qt (Mpa)	q (Mpa)
1	15,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,14	0,13
	15,00	1,68	2,00	2,00	0,01	0,16	0,15
	15,00	2,28	3,00	3,00	0,01	0,17	0,16
	15,00	2,83	4,00	4,00	0,01	0,18	0,18
	15,00	3,34	5,00	5,00	0,01	0,20	0,19
2	14,00	1,00	1,00	1,00	0,02	0,21	0,20
	14,00	1,68	2,00	2,00	0,02	0,23	0,21
	14,00	2,28	3,00	3,00	0,02	0,24	0,23
	14,00	2,83	4,00	4,00	0,02	0,25	0,24
	14,00	3,34	5,00	5,00	0,02	0,27	0,25
3	13,00	1,00	1,00	1,00	0,03	0,28	0,26
	13,00	1,68	2,00	2,00	0,03	0,29	0,28
	13,00	2,28	3,00	3,00	0,03	0,31	0,29
	13,00	2,83	4,00	4,00	0,03	0,32	0,30
	13,00	3,34	5,00	5,00	0,03	0,34	0,32

TABLA 8. Parámetros empleados para la determinación de los asientos mediante la expresión de BURLAND-BURBIDGE, zapatas aisladas.

Los valores obtenidos de los asientos, para los distintos SPT, resultado de la aplicación de la expresión de BURLAND-BURBIDGE son los siguientes:

▪ SPT =3.

Para valores del ensayo del SPT igual a 3, si se aplica la carga máxima obtenida por condición de hundimiento para cada uno de los casos, se observa que en ninguno de ellos el asiento producido es menor que el asiento máximo admisible establecido por la ROM, siendo este de 2,5 cm. Por lo tanto si definitivamente el terreno tuviese este valor del SPT el factor limitante no sería la carga de hundimiento, sino el asiento.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
3	1	1,00	4,92
		2,00	9,14
		3,00	13,56
		4,00	18,29
		5,00	23,34
	2	1,00	7,28
		2,00	13,12
		3,00	18,96
		4,00	24,99
		5,00	31,26
	3	1,00	9,65
		2,00	17,10
		3,00	24,36
		4,00	31,68
		5,00	39,18

TABLA 9. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =3, zapatas aisladas.

▪ SPT =4.

Para valores del ensayo del SPT igual a 4, aplicando la carga máxima obtenida por condición de hundimiento para cada uno de los casos, del mismo modo que en el caso anterior, se obtiene de nuevo que en ninguno de los casos el asiento producido quedaría por debajo del asiento máximo establecido por la ROM. Por lo tanto nuevamente el factor limitante no sería la carga de hundimiento, sino el asiento producido.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
4	1	1,00	3,29
		2,00	6,11
		3,00	9,06
		4,00	12,22
		5,00	15,61
	2	1,00	4,87
		2,00	8,77
		3,00	12,67
		4,00	16,70
		5,00	20,90
	3	1,00	6,45
		2,00	11,43
		3,00	16,28
		4,00	21,18
		5,00	26,19

TABLA 10. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =4, zapatas aisladas.

▪ SPT =5.

Para valores del ensayo del SPT igual a 5, procediendo del mismo modo que en los casos anteriores, se observa que en el caso de zapatas cuadradas de lado 1 y situado el plano de cimentación a 1 metro de profundidad, con una carga transmitida de 142,49 kN, el asiento producido por esta sería de 2,4 cm, valor admisible inferior al máximo de 2,5 cm.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
5	1	1,00	2,40
		2,00	4,47
		3,00	6,63
		4,00	8,94
		5,00	11,42
	2	1,00	3,56
		2,00	6,42
		3,00	9,27
		4,00	12,22
		5,00	15,29
	3	1,00	4,72
		2,00	8,36
		3,00	11,91
		4,00	15,50
		5,00	19,17

TABLA 11. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =5, zapatas aisladas.

▪ SPT =6.

Para valores del ensayo del SPT igual a 6, procediendo del mismo modo que en los casos anteriores, se observa nuevamente que sólo en el caso de zapatas cuadradas de lado 1 y situado el plano de cimentación a 1 metro de profundidad, con una carga transmitida de 142,49 kN, el asiento producido por esta sería de 1,86 cm, valor admisible inferior al máximo de 2,5 cm.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
6	1	1,00	1,86
		2,00	3,46
		3,00	5,14
		4,00	6,93
		5,00	8,85
	2	1,00	2,76
		2,00	4,97
		3,00	7,18
		4,00	9,47
		5,00	11,85
	3	1,00	3,66
		2,00	6,48
		3,00	9,23
		4,00	12,01
		5,00	14,85

TABLA 12. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =6, zapatas aisladas.

▪ SPT =7.

Para valores del ensayo del SPT igual a 7, en el caso de zapatas cuadradas de lado 1 y situado el plano de cimentación a 1 metro de profundidad, con una carga transmitida de 142,49 kN, el asiento producido por esta sería de 1,5 cm, por lo tanto sigue cumpliendo, además en terrenos con este valor del ensayo SPT las zapatas cuadradas de 1 metro de lado y situado el plano de cimentación a 2 metros de profundidad, transmitiendo una carga de 211,64 kN, se genera un asiento de 2,22 cm, asiento dentro de los rangos permitidos por la ROM. En todos los casos la carga aplicada es la carga máxima obtenida por condición de hundimiento.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
7	1	1,00	1,50
		2,00	2,79
		3,00	4,14
		4,00	5,58
		5,00	7,13
	2	1,00	2,22
		2,00	4,01
		3,00	5,79
		4,00	7,63
		5,00	9,55
	3	1,00	2,95
		2,00	5,22
		3,00	7,44
		4,00	9,68
		5,00	11,97

TABLA 13. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =7, zapatas aisladas.

▪ SPT =8.

Para valores del ensayo del SPT igual a 8, en el caso de zapatas cuadradas de 1 metro de lado a 1,2 y 3 metros de profundidad, transmitiendo una carga de 142,49, 211,64 y 280,79 kN respectivamente, se observa que el asiento producido estaría por debajo de los 2,5 cm establecidos por la ROM, también las zapatas de 2 metros de lado a 1 metro de profundidad transmitiendo esta una carga de 626,2 kN producirá un asiento de 2,31 cm, este último también dentro del rango permitido por la ROM. En todos los casos la carga aplicada es la carga máxima obtenida por condición de hundimiento.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
8	1	1,00	1,25
		2,00	2,31
		3,00	3,43
		4,00	4,63
		5,00	5,91
	2	1,00	1,85
		2,00	3,32
		3,00	4,80
		4,00	6,33
		5,00	7,92
	3	1,00	2,44
		2,00	4,33
		3,00	6,17
		4,00	8,03
		5,00	9,93

TABLA 14. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =8, zapatas aisladas.

▪ SPT =9.

Para valores del ensayo del SPT igual a 9, del mismo modo que para el valor del ensayo del SPT anterior, en el caso de zapatas cuadradas de 1 metro de lado a 1,2 y 3 metros de profundidad, transmitiendo una carga máxima por condición de hundimiento de 142,49, 211,64 y 280,79 kN respectivamente, se observa que el asiento producido estaría por debajo de los 2,5 cm establecidos por la ROM, también las zapatas de 2 metros de lado a 1 metro de profundidad transmitiendo esta una carga máxima por

condición de hundimiento de 626,2 kN producirá un asiento de 2,31 cm, este último también dentro del rango permitido por la ROM.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
9	1	1,00	1,06
		2,00	1,96
		3,00	2,91
		4,00	3,93
		5,00	5,01
	2	1,00	1,56
		2,00	2,82
		3,00	4,07
		4,00	5,37
		5,00	6,72
	3	1,00	2,07
		2,00	3,67
		3,00	5,23
		4,00	6,81
		5,00	8,42

TABLA 15. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =9, zapatas aisladas.

▪ SPT =10.

Para valores del ensayo del SPT igual a 10, cumplirían los mismos casos que para el valor del SPT anterior, reduciendo como cabe esperar el asiento producido, además también las zapatas de 2 metros de lado a 2 metro de profundidad transmitiendo esta una carga de 902,8 kN producirá un asiento de 2,43 cm, este último también dentro del rango permitido por la ROM. En todos los casos la carga aplicada es la carga máxima obtenida por condición de hundimiento.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
10	1	1,00	0,91
		2,00	1,69
		3,00	2,51
		4,00	3,39
		5,00	4,33
	2	1,00	1,35
		2,00	2,43
		3,00	3,51
		4,00	4,63
		5,00	5,79
	3	1,00	1,79
		2,00	3,17
		3,00	4,51
		4,00	5,87
		5,00	7,26

TABLA 16. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =9, zapatas aisladas.

Dado que en la mayoría de los casos, considerando aplicada la carga máxima admisible por condición de hundimiento calculada anteriormente, los asientos producidos son mayores al asiento máximo admisible establecido por la ROM, se ha

realizado también el cálculo inverso, es decir, imponiendo como asiento máximo posible el admisible según estas recomendaciones, se ha determinado la máxima carga que podría transmitir la zapata aislada en cada uno de los casos estudiados puesto que se ha comprobado que esta condición es más limitante que la de hundimiento.

En la siguiente tabla las casillas sombreadas en azul, corresponden a situaciones en las que la carga limitante no es la obtenida por condición de asiento sino por condición de hundimiento. Los valores de las cargas que se muestran en las casillas sombreada son las obtenidas limitando el asiento a 2,5 cm y, en todos estos casos, son más elevadas que el valor de la carga máxima transmitida obtenida por condición de hundimiento.

D (m)	B (m)	Por condición de asiento (SPT)							
		3	4	5	6	7	8	9	10
		Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)
1	1,00	76,73	110,49	147,82	188,29	231,55	277,37	325,54	375,90
	2,00	196,55	276,83	365,64	461,88	564,78	673,75	788,32	908,10
	3,00	346,73	480,00	627,42	787,18	958,00	1138,89	1329,08	1527,92
	4,00	523,69	714,64	925,85	1154,75	1399,50	1658,67	1931,16	2216,06
	5,00	725,56	977,94	1257,10	1559,64	1883,12	2225,68	2585,83	2962,39
2	1,00	81,40	115,15	152,49	192,95	236,22	282,03	330,21	380,57
	2,00	215,22	295,50	384,30	480,55	583,45	692,42	806,99	926,77
	3,00	388,73	522,00	669,42	829,18	1000,00	1180,89	1371,08	1569,92
	4,00	598,36	789,31	1000,52	1229,42	1474,16	1733,34	2005,83	2290,73
	5,00	842,23	1094,61	1373,77	1676,31	1999,79	2342,34	2702,50	3079,05
3	1,00	86,06	119,82	157,16	197,62	240,89	286,70	334,87	385,23
	2,00	233,88	314,17	402,97	499,21	602,11	711,08	825,65	945,44
	3,00	430,73	564,00	711,42	871,18	1042,00	1222,89	1413,08	1611,92
	4,00	673,02	863,97	1075,19	1304,09	1548,83	1808,00	2080,50	2365,39
	5,00	958,89	1211,27	1490,43	1792,98	2116,46	2459,01	2819,17	3195,72

TABLA 17. Cuadro resumen de cargas máximas por condición de asiento, asiento impuesto 2,5 cm, zapatas aisladas.

3.3.2.2 Zapata corrida

A continuación, se detalla el cálculo de asientos mediante la expresión de BURLAND-BURBRIDGE, estableciendo los siguientes criterios:

- Zapatas corridas, de dimensión B= (1, 2, 3, 4, 5) m y L=1m.
- Cargas centradas.
- El terreno de apoyo lo constituye un relleno granular de procedencia diversa.
- Profundidades de cimentación consideradas serán D= (1, 2 y 3) m

- Se emplearán valores del SPT comprendidos entre 3 y 10, ambos inclusive, debido a que los resultados de este son muy dispersos.
- Asiento máximo admisible: 2,5 cm, según la ROM.

La siguiente tabla muestra los datos empleados para el cálculo de los asientos, dado que el único resultado que varía es el número de golpes del ensayo SPT el resto de parámetros serán los mismos par todos los casos.

Potencia (m)		16,00	L0 (m)		1,00	f1		1,00
D (m)	Hs (m)	z (m)	B (m)	L (m)	qc (Mpa)	qt (Mpa)	q (Mpa)	
1	15,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,10	0,09	
	15,00	1,68	2,00	1,00	0,01	0,13	0,12	
	15,00	2,28	3,00	1,00	0,01	0,15	0,14	
	15,00	2,83	4,00	1,00	0,01	0,17	0,16	
	15,00	3,34	5,00	1,00	0,01	0,20	0,19	
2	14,00	1,00	1,00	1,00	0,02	0,15	0,13	
	14,00	1,68	2,00	1,00	0,02	0,17	0,16	
	14,00	2,28	3,00	1,00	0,02	0,19	0,18	
	14,00	2,83	4,00	1,00	0,02	0,22	0,20	
	14,00	3,34	5,00	1,00	0,02	0,24	0,23	
3	13,00	1,00	1,00	1,00	0,03	0,19	0,17	
	13,00	1,68	2,00	1,00	0,03	0,21	0,19	
	13,00	2,28	3,00	1,00	0,03	0,24	0,22	
	13,00	2,83	4,00	1,00	0,03	0,26	0,24	
	13,00	3,34	5,00	1,00	0,03	0,28	0,26	

TABLA 18. Parámetros empleados para la determinación de los asientos mediante la expresión de BURLAND-BURBIDGE, zapatas corridas.

Los valores obtenidos de los asientos, para los distintos SPT, resultado de la aplicación de la expresión de BURLAND-BURBIDGE son los siguientes:

- SPT=3.

Para valores del ensayo del SPT igual a 3, si se aplica la carga máxima obtenida por condición de hundimiento para cada uno de los casos se observa que, en casi todos, el asiento producido quedaría por encima del asiento máximo establecido por la ROM, excepto en las de menos dimensión, esto es las de B=1m, que no cumplirían este precepto, siendo mayor el asiento cuanto más profundo se encuentra el plano de cimentación. Por lo tanto si definitivamente el terreno tuviese este valor del SPT el factor limitante para la mayoría de casos sería la carga de hundimiento.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
3	1	1,00	3,47
		2,00	0,56
		3,00	0,19
		4,00	0,09
		5,00	0,05
	2	1,00	4,88
		2,00	0,74
		3,00	0,25
		4,00	0,11
		5,00	0,06
	3	1,00	6,28
		2,00	0,93
		3,00	0,30
		4,00	0,14
		5,00	0,07

TABLA 19. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =3, zapatas corridas.

▪ SPT =4.

Para valores del ensayo del SPT igual a 4, si se aplica la carga máxima obtenida por condición de hundimiento para cada uno de los casos se observa prácticamente el mismo comportamiento que para el caso anterior, a excepción de la zapata de un metro de ancho y profundidad de plano de cimentación de un metro, esta quedaría dentro del margen estipulado por la ROM.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
4	1	1,00	2,32
		2,00	0,38
		3,00	0,13
		4,00	0,06
		5,00	0,04
	2	1,00	3,26
		2,00	0,50
		3,00	0,17
		4,00	0,08
		5,00	0,04
	3	1,00	4,20
		2,00	0,62
		3,00	0,20
		4,00	0,09
		5,00	0,05

TABLA 20. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =4, zapatas corridas.

▪ SPT=5.

Para valores del ensayo del SPT igual a 5, se ha procedido de igual manera que en los casos anteriores en cuanto a la carga aplicada, cumpliendo el asiento máximo en todos los casos, excepto para la zapata de un metro de ancho y con el plano de

cimentación a 3 metros de profundidad que, aun da como resultado 3,07 cm de asiento, valor mayor a los 2,5 cm que establece como limite la ROM.

N	D (m)	B (m)	Sc (cm)
5	1	1,00	1,70
		2,00	0,27
		3,00	0,10
		4,00	0,05
		5,00	0,03
	2	1,00	2,39
		2,00	0,36
		3,00	0,12
		4,00	0,06
		5,00	0,03
	3	1,00	3,07
		2,00	0,45
		3,00	0,15
		4,00	0,07
		5,00	0,04

TABLA 21. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =5, zapatas corridas.

- SPT=6, 7, 8, 9 y 10.

Para valores del ensayo del SPT igual o superior a 6, en todos los casos se cumple un asiento menor a 2,5 cm. En todos los casos la carga aplicada es la carga máxima obtenida por condición de hundimiento.

D (m)	B (m)	SPT				
		6	7	8	9	10
		sc (cm)	sc (cm)	sc (cm)	sc (cm)	sc (cm)
1	1,00	1,32	1,06	0,88	0,75	0,64
	2,00	0,21	0,17	0,14	0,12	0,10
	3,00	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
	4,00	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
	5,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
2	1,00	1,85	1,49	1,24	1,05	0,90
	2,00	0,28	0,23	0,19	0,16	0,14
	3,00	0,09	0,08	0,06	0,05	0,05
	4,00	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
	5,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
3	1,00	2,38	1,92	1,59	1,35	1,16
	2,00	0,35	0,28	0,23	0,20	0,17
	3,00	0,11	0,09	0,08	0,06	0,06
	4,00	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
	5,00	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01

TABLA 22. Asientos producidos por la carga máxima admisible por condición de hundimiento en el terreno con valor del ensayo del SPT =6, 7, 8, 9 y 10, zapatas corridas.

Dado que en la mayoría de los casos en zapatas corridas, la comprobación de los asientos producidos por la aplicación de la carga de hundimiento, calculada anteriormente, da como resultado menor al asiento máximo admisible establecido por la ROM, se ha realizado también el cálculo inverso en los casos en que el asiento ha salido mayor que el máximo admisible por la ROM, es decir, imponiendo como asiento máximo admisible el establecido por estas recomendaciones, se ha determinado la máxima carga que podría transmitir la zapata corrida en cada uno de los casos estudiados .

En la siguiente tabla la zona sombreada en azul muestra las situaciones en las que las cargas máximas obtenidas limitando el asiento a 2.5 cm son más elevadas que las obtenidas por condición de hundimiento lo que significa que en zapatas corridas la condición de hundimiento es, en la mayoría de los casos, más limitante que la condición de asiento.

D (m)	B (m)	Por condición de asiento (SPT)							
		3	4	5	6	7	8	9	10
		Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)	Q (kN)
1	1,00	76,73	110,49	147,82	188,29	231,55	277,37	325,54	375,90
	2,00	533,17	793,29	1081,01	1392,83	1726,23	2079,30	2450,50	2838,60
	3,00	1825,28	2726,21	3722,74	4802,73	5957,47	7180,30	8465,97	9810,16
	4,00	4459,55	6666,93	9108,53	11754,63	14583,85	17579,92	20729,93	24023,34
	5,00	8985,53	13437,52	18361,92	23698,76	29404,94	35447,63	41800,80	48443,18
2	1,00	81,40	115,15	152,49	192,95	236,22	282,03	330,21	380,57
	2,00	537,83	797,96	1085,68	1397,50	1730,90	2083,96	2455,17	2843,27
	3,00	1829,94	2730,87	3727,40	4807,40	5962,13	7184,97	8470,63	9814,82
	4,00	4464,22	6671,59	9113,19	11759,29	14588,52	17584,59	20734,60	24028,01
	5,00	8990,20	13442,19	18366,58	23703,42	29409,60	35452,29	41805,46	48447,85
3	1,00	86,06	119,82	157,16	197,62	240,89	286,70	334,87	385,23
	2,00	542,50	802,62	1090,34	1402,17	1735,57	2088,63	2459,83	2847,93
	3,00	1834,61	2735,54	3732,07	4812,06	5966,80	7189,63	8475,30	9819,49
	4,00	4468,89	6676,26	9117,86	11763,96	14593,18	17589,25	20739,26	24032,68
	5,00	8994,87	13446,85	18371,25	23708,09	29414,27	35456,96	41810,13	48452,52

TABLA 23. Cuadro resumen de cargas máximas por condición de asiento, asiento impuesto 2,5 cm, zapatas corridas.

4. Cimentaciones indirectas

4.1 Introducción

Para el análisis del comportamiento de las cimentaciones indirectas se establecen los siguientes criterios: pilotes circulares, individuales, de hormigón prefabricado y puestos en obra mediante hincado.

En cuanto a las dimensiones de los pilotes, se van a modelizar en este trabajo las siguientes combinaciones: 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1 m de diámetro.

Para definir la longitud de pilote se hace necesario revisar el perfil litoestratigráfico del terreno, la información que ofrece permite considerar tres situaciones distintas en cuanto a las condiciones geomecánicas del suelo de modo que en cada una de ellas sus condiciones de contorno son distintas.

De esta manera se han definido las siguientes tipologías de diseño:

- Tipo 1: En este caso el pilote atravesaría el nivel 0 hasta la cota -13 m; a continuación, hasta -15,5 m, el nivel A1; desde ahí hasta -21 m el nivel A2 bajo este se encuentra el nivel A3 hasta -24 m de profundidad donde aparece el nivel B que es el de mayor compacidad de todos. El Nivel A1, dado que son fangos de escasa capacidad portante se tendrá en cuenta en el cálculo con las mismas consideraciones que el nivel 0.
- Tipo 2: En esta zona central de la parcela se tiene desde la cota 0 hasta la -15 m, al nivel 0 y desde ahí hasta -20 m al nivel A3. A partir de esta cota aparece el nivel B con una potencia de casi 10 m pero que presenta una inclusión del nivel C correspondiente a arcillas limosas de menor resistencia por lo que habrá que calcular muy rigurosamente la zona de influencia activa de los pilotes para no afectar a este material.
- Tipo 3: Desde la superficie de la parcela hasta -17,5 m, se detectan los rellenos del nivel 0, a continuación hasta la cota -24 m al nivel A2 e inmediatamente debajo de este aparece nuevamente el nivel B con una potencia de algo más de 5 m. Como en el caso anterior habrá que prestar atención a la longitud de la zona activa inferior para tratar de no afectar al nivel C de menor compacidad que el anterior.

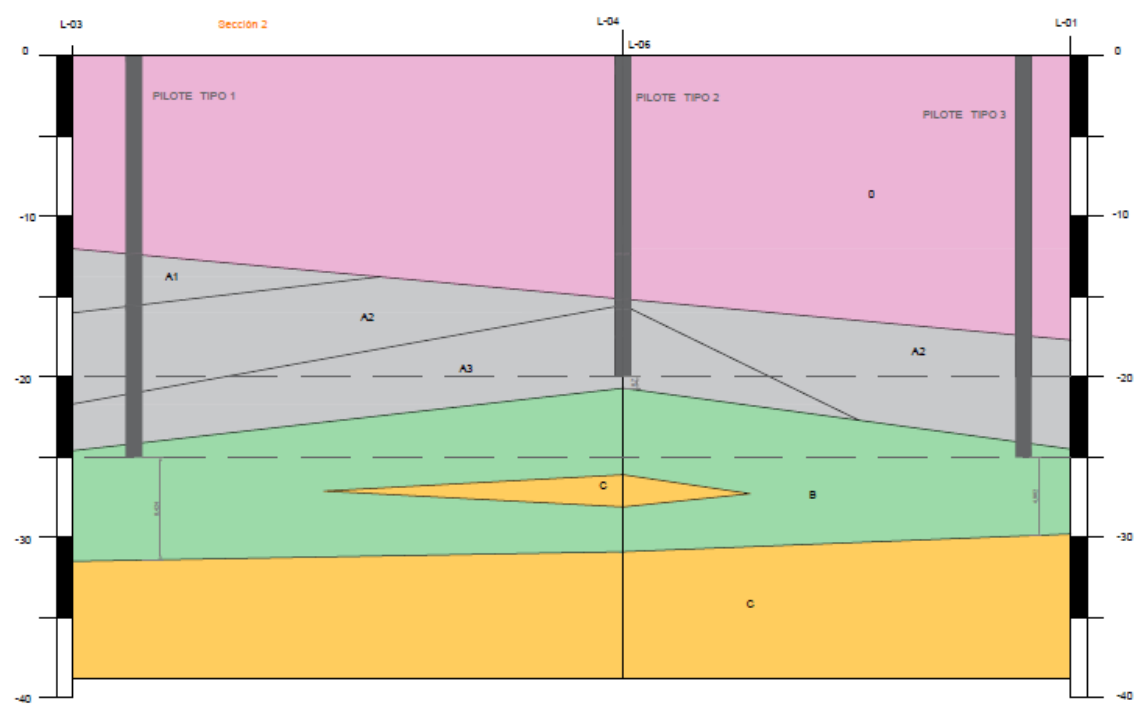


ILUSTRACIÓN 2. Ubicación de los tipos de pilotes y su estratigrafía colindante.

COLUMNA	NIVEL	DESCRIPCIÓN
	NIVEL 0	RELLENOS
	NIVEL A1	FANGOS
	NIVEL A2	ARCILLAS LIMOSAS
	NIVEL A3	ARENAS LIMOSAS
	NIVEL B	GRAVAS ARENOSAS
	NIVEL C	ARCILLAS LIMOSAS

TABLA 24. Unidades litoestratigráficas.

El primer criterio en el pre-diseño en lo que a longitud se refiere fue buscar la menor longitud posible de pilote que mejoraran las cargas a transmitir al terreno suficientemente. El primer valor de longitud barajado fue de 20 m, valor mínimo posible para salvar el estrato de rellenos. Los cálculos realizados con esta longitud de pilote no mejoran ostensiblemente la carga máxima a transmitir y sí que supone un gasto de materiales muy importante. Para asegurar un aumento significativo de la carga máxima a transmitir el segundo valor de longitud estimado en los cálculos ha sido de 25 m.

En el caso del tipo 1 y 3 se consigue un aumento significativo de las cargas útiles sobre los pilotes, como más adelante se mostrará, mientras que para los pilotes de tipo 2 el valor de longitud empleado en el prediseño ha sido finalmente de 20 m, porque aun incrementando la longitud hasta los 25 m la mejora de carga la carga útil no es significativamente alto como para asumir el coste que ello conlleva.

Las comprobaciones geotécnicas que se van a realizar serán las de hundimiento (=Estado Límite Último) y deformaciones excesivas comúnmente denominadas asentos (=Estado límite de Servicio).

Puesto que, como en el caso de cimentaciones directas, no se conocen las cargas que se van a transmitir, para la combinación de modelo que se va a calcular se va a suponer que las cargas son verticales y centradas de modo que no serán necesarias las comprobaciones de rotura por arranque y rotura del terreno por cargas transversales.

En el caso de que se construya definitivamente una estructura completa habrá que completar este trabajo con esos cálculos siempre que los esfuerzos horizontales transmitidos a la cimentación superen el 15 % de los esfuerzos verticales.

4.2 Comprobación hundimiento

4.2.1 Método de cálculo

4.2.1.1 Formulación básica

La resistencia al hundimiento de un pilote aislado se considerará, por simplificar el tratamiento, dividida en dos partes: la contribución de la punta y la contribución del fuste. De esa manera se podrá escribir:

$$Q_h + W' = Q_p + Q_f$$

Q_h = Carga vertical que aplicada en la cabeza del pilote produce su hundimiento.

W' = peso efectivo del pilote. Bajo nivel freático se considerará peso sumergido

Q_p = Parte de carga que se supone soportada por la punta

Q_f = Parte de carga que se supone soportada por el fuste

La resistencia por punta y por fuste pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$Q_f = \sum \tau_f \cdot A_f$$

q_p = Resistencia unitaria por la punta

A_p = Área de la punta

τ_f = Resistencia unitaria por el fuste

A_f = Área del contacto entre el fuste del pilote y el terreno en cada tramo

La verificación de seguridad frente a hundimiento en pilotes individuales se realiza de acuerdo a lo establecido en el artículo 3.6.6.1 de la ROM 0.5-05 y dicha verificación queda concluida cuando se cumple:

$$F = \frac{Q_{hi}}{N_i + W'_i} \geq F_{min}$$

Donde:

F = Coeficiente de seguridad frente al hundimiento.

N_i = Carga vertical que actúa sobre el pilote

W'_i = Peso efectivo de la parte exenta del pilote (fuera del terreno).

Q_{hi} = Carga de hundimiento del pilote aislado.

F_{min} = Coeficientes de seguridad que se indican en la tabla 3.6.1. En el caso que nos ocupa se tomara 2,5 para combinaciones cuasi-permanentes.

Por último el tope estructural será el obtenido de la expresión reflejada en la tabla 3.6.5 de la ROM 0.5-05, para pilotes de hormigón armado hincados, que es $T_e = 0,3 \cdot f_{ck}$, donde f_{ck} sera la resistencia característica del hormigón a compresión.

4.2.1.2 Suelos granulares

La resistencia unitaria por el fuste en suelos granulares se calculará de la siguiente manera:

$$\tau_f = \sigma'_v \cdot K \cdot f \cdot \operatorname{tg} \phi$$

Donde:

- σ'_v = tensión efectiva en el punto medio
- K = coeficiente de empuje empírico
- f = factor de reducción del rozamiento del fuste
- ϕ = ángulo de rozamiento interno del suelo granular

El coeficiente de empuje empírico se tomará K= 0.75 para pilotes hincados, por otro lado, el factor de reducción del rozamiento del fuste se tomará f= 1 para pilotes de hormigón prefabricado.

El valor de la resistencia unitaria por el fuste, además, no sobrepasará los límites siguientes:

$$\text{Pilotes hincados} \quad \tau_f < 125 \text{ kPa}$$

$$\text{Pilotes excavados} \quad \tau_f < 90 \text{ kPa}$$

Una vez obtenida la resistencia unitaria por el fuste, esta se multiplicará por el área del fuste del pilote, obteniéndose así la carga admisible por el fuste para ese estrato.

La resistencia unitaria por la punta en suelos granulares se calculará de la siguiente manera:

$$q_p = 3 \cdot \sigma'_{vp} \cdot N_q \cdot f_D < 20 \text{ MPa}$$

- σ'_{vp} = Tensión efectiva en la punta antes de instalar el pilote
- N_q = Factor de capacidad de carga definido por la expresión

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} \cdot e^{\pi \cdot \operatorname{tg} \phi}$$

- f_D = Factor adimensional, donde $D_0 = 3 \text{ m}$.

$$f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0.7$$

Una vez obtenida la resistencia unitaria por la punta esta se multiplicará por el área de la punta obteniéndose así la carga resistida por la punta.

4.2.1.3 Suelos cohesivos

La carga de hundimiento en pilotes verticales en suelos cohesivos, evaluada mediante fórmulas estáticas, ha de calcularse a corto plazo y a largo plazo y se hará de la siguiente forma:

- Carga de hundimiento a corto plazo

La resistencia unitaria por la punta se calcula del siguiente modo:

$$q_p = (9 - 3 \cdot D) \cdot s_u > 6 \cdot s_u \quad (D \text{ en metros})$$

Donde D será el diámetro real o virtual del pilote y s_u la resistencia a corte sin drenaje del suelo cohesivo al nivel de la punta.

La resistencia unitaria por el fuste a corto plazo se obtendrá de la siguiente forma:

$$\tau_f = \frac{100 \cdot s_u}{100 + s_u} \quad (\tau_f \text{ y } s_u \text{ en kPa})$$

donde s_u será la resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo

- Carga de hundimiento a largo plazo

La resistencia unitaria por la punta se calcula del siguiente modo:

$$q_p = (3 \cdot \sigma'_{vp} \cdot N_q + 3 \cdot c' \cdot N_c) \cdot f_D$$

donde:

σ'_{vp} = tensión efectiva en la punta antes de instalar el pilote.

N_q = factor de capacidad de carga definido por la expresión:

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot e^{\pi \cdot \tan \phi}$$
$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan \phi}$$

c' = cohesión efectiva.

f_D = factor de corrección por tamaño de pilote:

D = diámetro del pilote.

$$f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0.7$$

D_0 = diámetro de referencia = 3.

La resistencia unitaria por el fuste a largo plazo se obtendrá de la siguiente forma:

$$\tau_f = (\sigma'_v \cdot K \cdot f \cdot tg\phi) + c'$$

Donde:

σ'_v = tensión efectiva en el punto medio

K = coeficiente de empuje empírico

f = factor de reducción del rozamiento del fuste

ϕ = ángulo de rozamiento interno del suelo granular

c' = cohesión efectiva del terreno

4.2.2 Resultados obtenidos

A continuación, se detalla el cálculo de la carga de hundimiento estableciendo la resistencia unitaria por el fuste, así como la resistencia por punta de un pilote aislado, mediante los métodos basados en soluciones analíticas descritos anteriormente, estableciendo los siguientes criterios:

- Pilotes cilíndricos, de diámetros 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1 m y longitud 25 m para los pilotes tipo 1 y 2 y 20 m para el pilote tipo 3.
- Pilotes de hormigón prefabricado y colocación mediante hinca.
- Cargas centradas.

Los toques estructurales de los pilotes, estableciendo un hormigón con una resistencia característica a compresión de 30 MPa, serán para los de diámetro 0,6 m $T_e = 2544,69$ kN, para los de diámetro 0,7 m $T_e = 3463,61$ kN, para los de diámetro 0,8 m $T_e = 4523,89$ kN, para los de diámetro 0,9 m $T_e = 5725,55$ kN y para los de diámetro 1 m $T_e = 7068,58$ kN.

4.2.2.1 Tipo 1

▪ Resistencia unitaria por el fuste

- Hasta 15,5 m de profundidad: Terreno granular

Los valores comunes son: coeficiente de empuje empírico (k) 0,75, por ser pilotes hincados; factor de reducción del rozamiento del fuste (f) 1, por ser de hormigón prefabricado; y ángulo de rozamiento interno (ϕ) 30°.

Resistencia unitaria por el fuste			
z_i (m)	z_f (m)	σ'	τ_f (kPa)
0	1	6,5	2,81
1	15,5	63,75	27,60

TABLA 25. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel 0, pilote tipo 1.

- De 15,5 m hasta 21 m de profundidad: Terreno cohesivo

La resistencia unitaria por el fuste para corto plazo es la siguiente:

Resistencia unitaria por el fuste	
S_u (kPa)	τ_f (kPa)
65	39,39

TABLA 26. Resistencia unitaria por el fuste a corto plazo, terreno cohesivo Nivel A2, pilote tipo 1.

La resistencia unitaria por el fuste para largo plazo es la siguiente:

Resistencia unitaria por el fuste							
zi (m)	zf (m)	σ'	k	f	ϕ (°)	c' (kPa)	τ_f (kPa)
15,5	21	143,375	0,75	1	31	20	84,61

TABLA 27. Resistencia unitaria por el fuste a largo plazo, terreno cohesivo nivel A2, pilote tipo 1.

- De 21 m hasta 24 m de profundidad: Terreno granular

Resistencia unitaria por el fuste							
zi (m)	zf (m)	σ'	k	f	ϕ (°)	c' (kPa)	τ_f (kPa)
21	24	185	0,75	1	31		83,37

TABLA 28. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular A3, pilote tipo 1.

- De 24 m hasta 25 m de profundidad: Terreno granular

Resistencia unitaria por el fuste							
zi (m)	zf (m)	σ'	k	f	ϕ (°)	c' (kPa)	τ_f (kPa)
24	25	201,75	0,75	1	37		114,02

TABLA 29. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular nivel B, pilote tipo 1.

▪ **Resistencia unitaria por la punta**

La resistencia unitaria por la punta con los siguientes parámetros comunes: tensión efectiva en la punta del pilote antes de instalarlo (σ') 205,75 kPa; factor de capacidad de carga (N_q) 42,94

Resistencia por punta		
D (m)	fD	qp (kPa)
0,6	0,80	20000,00
0,7	0,77	20000,00
0,8	0,73	19427,70
0,9	0,70	18544,62
1	0,67	18544,62

TABLA 30. Resistencia unitaria por la punta, terreno granular Nivel B, pilote tipo 1.

▪ **Resumen**

Dado que el nivel 0 son rellenos artificiales no consolidados, se despreciará la resistencia por el fuste en este estrato ante la posibilidad de que pueda generarse rozamiento negativo. Se emplean las resistencias unitarias menores quedando del lado de la seguridad.

Para obtener la resistencia por el fuste (Q_f) y la resistencia por la punta (Q_p) se han multiplicado las resistencias unitarias (obtenidas anteriormente) por la superficie lateral y la sección transversal, respectivamente.

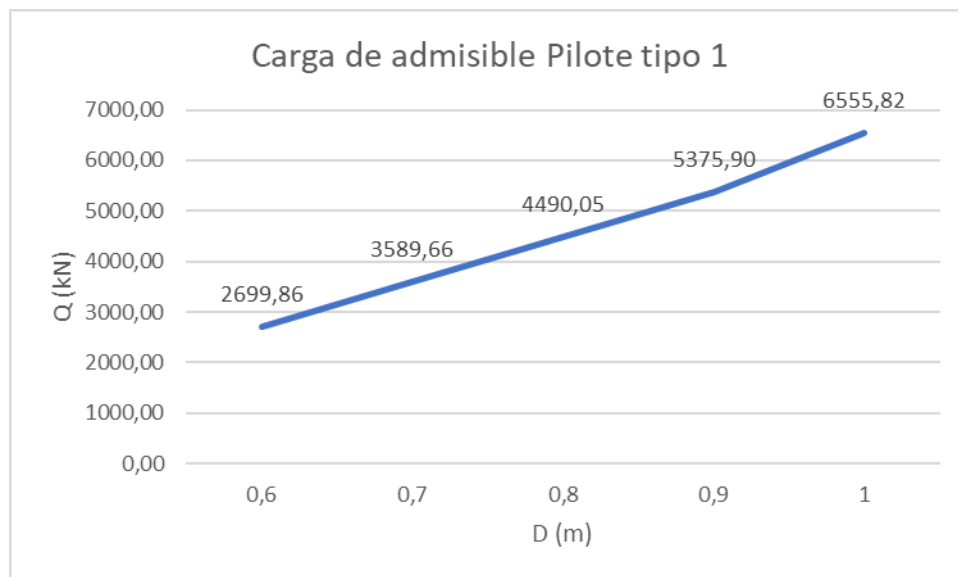
En todos los casos la resistencia por la punta es mucho mayor que la obtenida por el fuste y, por tanto, se trata de pilotes columna. En este caso y puesto que el terreno puramente cohesivo atravesado no presenta una gran potencia no es de aplicación la comprobación de pandeo según el artículo 3.6.10.2 de la ROM 05-05.

La tabla resumen de resistencia es la siguiente:

TOTAL				
D (m)	Qp+Qf (kN)	W(kN)	Qadm (kN)	Qu(kN)
0,6	6749,64	176,71	2699,86	2523,14
0,7	8974,14	240,53	3589,66	3349,13
0,8	11225,13	314,16	4490,05	4175,89
0,9	13439,74	397,61	5375,90	4978,29
1	16389,54	490,87	6555,82	6064,94

TABLA 31. Cuadro resumen de la carga de admisible (Qadm) de los pilotes tipo 1 y la carga útil (Qu) una vez reducida esta por el peso efectivo del propio pilote.

Se observa que las resistencias dan valores elevados, dado que el pilote trabaja principalmente por punta y este se apoya sobre un terreno competente se obtienen valores de carga admisible, una vez aplicada la verificación de seguridad frente a hundimiento, de entre 2699 y 6560 kN.



GRÁFICA 7. Tendencia de la carga de admisible de los pilotes tipo 1.

En la gráfica se observa un crecimiento de la carga de admisible total (=sin tener en cuenta el peso efectivo del pilote) con una tendencia constante en forma lineal, como era de esperar. El valor mínimo que podría transmitir un pilote aislado de 0,60 m de diámetro sería algo menos de 2699 kN mientras que, para un diámetro de 1,0 m podría alcanzarse los 6555 kN de carga.

4.2.2.2 Tipo 2

- **Resistencia unitaria por el fuste**

- Hasta 15 m de profundidad. Terreno granular.

Los valores comunes son: coeficiente de empuje empírico (k) 0,75, por ser pilotes hincados; factor de reducción del rozamiento del fuste (f) 1, por ser de hormigón prefabricado; y ángulo de rozamiento interno (ϕ) 30° .

Resistencia unitaria por el fuste			
zi (m)	zf (m)	σ'	τ_f (kPa)
0	1	6,5	2,81
1	15	62	26,85

TABLA 32. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel 0, pilote tipo 2.

- De 15 a 20 m de profundidad. Terreno granular.

Terreno granular Nivel A3						
zi (m)	zf (m)	σ'	ϕ ($^\circ$)	k	f	τ_f (kPa)
15	20	132,25	31	0,75	1,00	59,60

TABLA 33. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel A3, pilote tipo 2.

- **Resistencia unitaria por la punta**

- Terreno granular Nivel A3 con afección al Nivel B.

Dado que la distancia de la punta con el siguiente estrato es menor a 3 diámetros, en todos los casos, y dado que el siguiente nivel se trata también de un material granular, para el cálculo de la resistencia unitaria por la punta se calculará la media ponderada de sus ángulos de rozamiento interno, en función del grado de afección a los distintos niveles.

Sera de la siguiente forma:

AFECCION AL NIVEL B					
Distancia de la punta al nivel B (m)				0,76	
Maxima afeccion de la punta superiro (diametros)				6	
Maxima afeccion de la punta inferior (diametros)				3	

D (m)	Diametros en A3	Diametros en B	ϕ ($^\circ$) en A3	ϕ ($^\circ$) en B	ϕ ($^\circ$) Media
0,6	1,27	1,73	31,00	37,00	34,47
0,7	1,09	1,91	31,00	37,00	34,83
0,8	0,95	2,05	31,00	37,00	35,10
0,9	0,84	2,16	31,00	37,00	35,31
1	0,76	2,24	31,00	37,00	35,48

TABLA 34. Calculo del ángulo de rozamiento interno ponderado dada la afección de la punta al Nivel B, pilotes tipo 2.

Una vez obtenidos estos se procede a calcular las resistencias unitarias de las puntas para cada diámetro de pilote.

Resistencia por punta						
D (m)	σ'	ϕ (°)	Nq	Nc	fD	qp (kPa)
0,6	153,5	34,47	31,17	32,67	0,80	11483,38
0,7	153,5	34,83	32,60	32,67	0,77	11507,72
0,8	153,5	35,10	33,71	32,67	0,73	11384,90
0,9	153,5	35,31	34,61	32,67	0,70	11157,64
1	153,5	35,48	35,35	32,67	0,67	11396,34

TABLA 35. Resistencia unitaria por la punta, terreno granular Nivel A3 con afección al Nivel B, pilotes tipo 2.

En todos los casos la resistencia por la punta es mucho mayor que la obtenida por el fuste y, por tanto, se trata de pilotes columna. En este caso y puesto que el terreno puramente cohesivo atravesado no presenta una gran potencia no es de aplicación la comprobación de pandeo según el artículo 3.6.10.2 de la ROM 05-05.

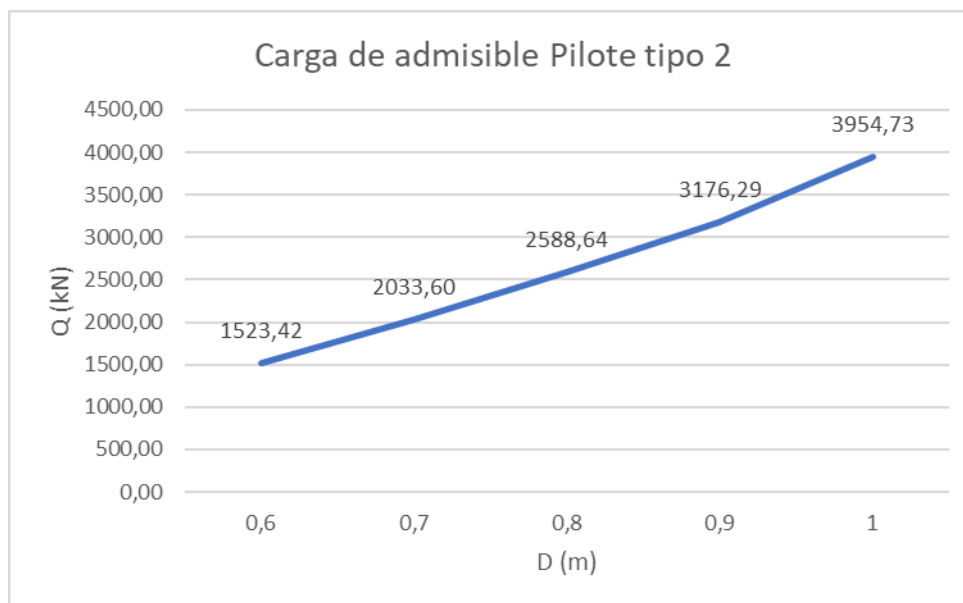
▪ Resumen

Dado que el nivel 0 son rellenos artificiales no consolidados, se despreciará la resistencia por el fuste en este estrato ante la posibilidad de que pueda generarse rozamiento negativo. Se emplean las resistencias unitarias menores quedando del lado de la seguridad, la tabla resumen de resistencia es la siguiente:

TOTAL				
D (m)	Qp+Qf (kN)	W(kN)	Qadm (kN)	Qu(kN)
0,6	3808,54	141,37	1523,42	1382,05
0,7	5084,00	192,42	2033,60	1841,18
0,8	6471,60	251,33	2588,64	2337,31
0,9	7940,73	318,09	3176,29	2858,21
1	9886,83	392,70	3954,73	3562,03

TABLA 36. Cuadro resumen de la carga de admisible (Qadm) de los pilotes tipo 2 y la carga útil (Qu) una vez reducida esta por el peso efectivo del propio pilote.

Se observa que las resistencias son elevadas, aun despreciando la resistencia por el fuste en el nivel 0, dado que el terreno contiguo a este es un suelo granular competente y su cálculo se realiza exclusivamente a largo plazo, los valores obtenidos de carga máxima admisible son menores que para el caso anterior, aun llegando prácticamente hasta los 4.000 kN para el pilote de mayor diámetro.



GRÁFICA 8. Tendencia de la carga de admisible de los pilotes tipo 2.

Como se puede observar en la gráfica, la carga de hundimiento crece de una forma más o menos lineal, aunque con un pequeño cambio de pendiente a partir de los 0,9 m de diámetro.

4.2.2.3 Tipo 3

▪ Resistencia unitaria por el fuste

- Hasta 17,5 m de profundidad. Terreno granular.

Los valores comunes son: coeficiente de empuje empírico (k) 0,75, por ser pilotes hincados; factor de reducción del rozamiento del fuste (f) 1, por ser de hormigón prefabricado; y ángulo de rozamiento interno (ϕ) 30° .

Resistencia unitaria por el fuste			
zi (m)	zf (m)	σ'	τ_f (kPa)
0	1	6,5	2,81
1	17,5	70,75	30,64

TABLA 37. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel 0, pilote tipo 3.

- Desde 17,5 hasta 24 m de profundidad. Terreno cohesivo.

La resistencia unitaria por el fuste para corto plazo es la siguiente:

Resistencia unitaria por el fuste	
Su (kPa)	τ_f (kPa)
65	39,39

TABLA 38. Resistencia unitaria por el fuste a corto plazo, terreno cohesivo Nivel A2, pilote tipo 3.

La resistencia unitaria por el fuste para largo plazo es la siguiente:

Resistencia unitaria por el fuste							
zi (m)	zf (m)	σ'	k	f	ϕ (°)	c' (kPa)	τ_f (kPa)
17,5	24	162,625	0,75	1	31	20	93,29

TABLA 39. Resistencia unitaria por el fuste a largo plazo, terreno cohesivo Nivel A2, pilote tipo 3.

- Desde 24 hasta 25 m de profundidad. Terreno granular.

Resistencia unitaria por el fuste							
zi (m)	zf (m)	σ'	k	f	ϕ (°)	c' (kPa)	τ_f (kPa)
24	25	200,75	0,75	1	37		113,46

TABLA 40. Resistencia unitaria por el fuste, terreno granular Nivel B, pilote tipo 3.

▪ Resistencia unitaria por la punta

La resistencia unitaria por la punta con los siguientes parámetros comunes: tensión efectiva en la punta del pilote antes de instalarlo (σ') 204,75 kPa; factor de capacidad de carga (N_q) 42,94

Resistencia por punta		
D (m)	fD	qp (kPa)
0,6	0,80	20000,00
0,7	0,77	20000,00
0,8	0,73	19333,27
0,9	0,70	18454,49
1	0,67	18454,49

TABLA 41. Resistencia unitaria por la punta, terreno granular Nivel B, pilote tipo 3.

En todos los casos la resistencia por la punta es mucho mayor que la obtenida por el fuste y, por tanto, se trata de pilotes columna. En este caso y puesto que el terreno puramente cohesivo atravesado no presenta una gran potencia no es de aplicación la comprobación de pandeo según el artículo 3.6.10.2 de la ROM 05-05.

▪ Resumen

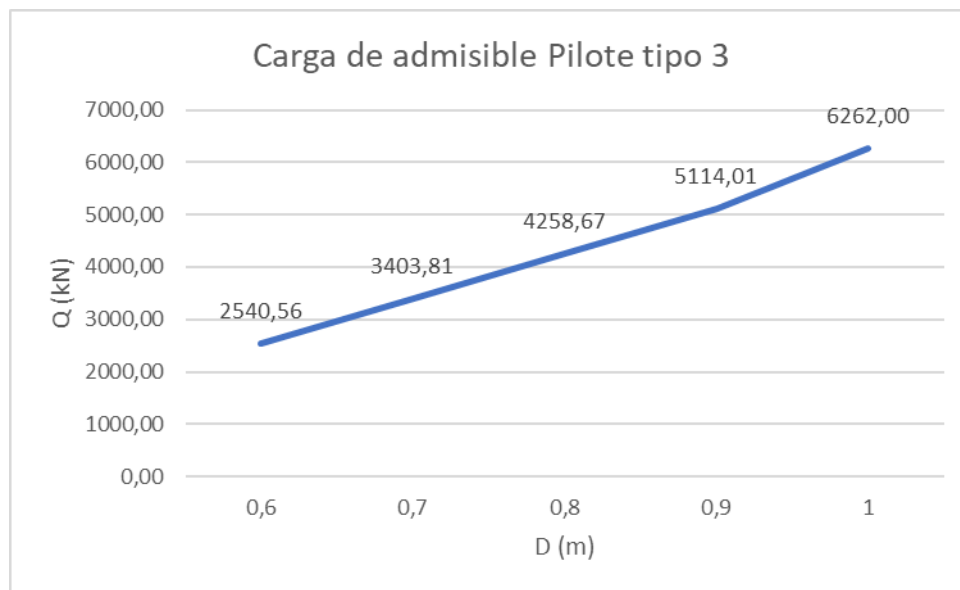
Dado que el nivel 0 son rellenos artificiales no consolidados, se despreciará la resistencia por el fuste en este estrato ante la posibilidad de que pueda generarse

rozamiento negativo. Se emplean las resistencias unitarias menores quedando del lado de la seguridad, la tabla resumen de resistencia es la siguiente:

TOTAL				
D (m)	Qp+Qf (kN)	W(kN)	Qadm (kN)	Qu(kN)
0,6	6351,39	176,71	2540,56	2363,84
0,7	8509,51	240,53	3403,81	3163,28
0,8	10646,66	314,16	4258,67	3944,51
0,9	12785,03	397,61	5114,01	4716,40
1	15655,00	490,87	6262,00	5771,12

TABLA 42. Cuadro resumen de la carga de admisible (Qadm) de los pilotes tipo 3 y la carga útil (Qu) una vez reducida esta por el peso efectivo del propio pilote.

Se observa que las resistencias dan valores elevados, dado que el pilote trabaja principalmente por punta y este se apoya sobre un terreno competente se obtienen valores de carga admisible, una vez aplicada la verificación de seguridad frente a hundimiento, de entre 2500 y 6270 kN.



GRÁFICA 9. Tendencia de la carga de hundimiento de los pilotes tipo 3.

De nuevo en la gráfica se observa un crecimiento de la carga de hundimiento con una tendencia constante en forma lineal, como era de esperar.

4.3 Comprobación asiento

4.3.1 Método de cálculo

El método empleado para el cálculo del asiento de pilotes aislados es el descrito en el apartado “3.6.9.1.1 Asientos del pilote aislado” de la ROM 0.5-05 y se calcula de la siguiente forma:

Donde:

$$s_i = \left(\frac{D}{40 \cdot Q_h} + \frac{l_1 + l_2 \cdot \alpha}{A \cdot E} \right) \cdot P$$

s_i = Asiento del pilote individual aislado

D = Diámetro del pilote

P = Carga sobre la cabeza

Q_h = Carga de hundimiento

l_1 = Longitud del pilote fuera del terreno

l_2 = Longitud del pilote dentro del terreno

A = Área de la sección transversal del pilote

E = Modulo de elasticidad del pilote

α = Parámetro variable según el tipo de transmisión de cargas al terreno, 1 para pilotes que trabajan principalmente por punta y 0,5 para pilotes flotantes.

4.3.2 Resultados

Para el cálculo de asientos se ha impuesto un desplazamiento máximo de 2,5 cm, obteniendo de este modo la carga máxima aplicable en la cabeza del pilote para que se produzca dicho asiento.

La carga de hundimiento empleada para el cálculo de los asientos, es la resultante de los cálculos anteriores para cada uno de los casos.

Dado que algunos parámetros son los mismos para los diferentes tipos y diámetros de pilotes, se expondrán una vez y se aplicarán para todos los cálculos. Estos son: Asiento máximo (s_i) 0,025m, longitud del pilote fuera del terreno (L_1) 0 m, longitud del pilote dentro del terreno (L_2) 25 m para pilotes tipo 1 y 3 y 20 m para pilotes tipo 2, módulo de elasticidad del hormigón (E) 3×10^7 KPa y, por último, el parámetro según la transmisión de cargas al terreno (α) igual a 1, dado que el modo de principal de trabajo de los pilotes será por punta en todos los casos.

4.3.2.1 Tipo 1

D (m)	Qadm (kN)	A(m2)	P (kN)	Qu (kN)
0,60	2523,14	0,28	2940,08	2523,14
0,70	3349,13	0,38	3550,89	3349,13
0,80	4175,89	0,50	4090,21	4175,89
0,90	4978,29	0,64	4549,37	4978,29
1,00	6064,94	0,79	5128,79	6064,94

TABLA 43. Carga máxima en cabeza de pilote, asiento máximo impuesto 2,5 cm, pilote tipo 1.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que la carga útil más restrictiva para este tipo de pilote será la obtenida por condición de hundimiento para el caso de los pilotes de diámetro 0,6 y 0,7, pues la carga máxima aplicable en la cabeza del pilote por condición de asiento (P) es mayor que la carga admisible obtenida por condición de hundimiento.

En el resto de los diámetros comprobados la carga más restrictiva será la obtenida por condición de asiento. Por ejemplo, para un pilote de diámetro 0,8 m la carga útil por condición de hundimiento es 4175,89 kN mientras que para el mismo diámetro la carga útil por condición de asiento es 4090,21 kN, algo menos de 100 kN de diferencia, dicha diferencia va incrementando conforme aumenta el diámetro del pilote.

4.3.2.2 Tipo 2

D (m)	Qadm (kN)	A(m2)	P (kN)	Qu (kN)
0,60	1523,42	0,28	2048,49	1382,05
0,70	2033,60	0,38	2418,33	1841,18
0,80	2588,64	0,50	2761,71	2337,31
0,90	3176,29	0,64	3074,40	2858,21
1,00	3954,73	0,79	3486,57	3562,03

TABLA 44. Carga máxima en cabeza de pilote, asiento máximo impuesto 2,5 cm, pilote tipo 2.

Como se observa cuando los diámetros de pilote son 0,6, 0,7, 0,8 y 0,9 m la carga útil más restrictiva para estos tipos de pilote será la obtenida por condición de hundimiento, pues la carga máxima aplicable en la cabeza del pilote por condición de asiento (P) es mayor que esta.

Para el de diámetro de 1 m la carga útil admisible por condición de hundimiento es 3562,03 kN mientras que la carga útil por condición de asiento es 3486,57 kN, por tanto se tomará como limitante la segunda de ellas.

4.3.2.3 Tipo 3

D (m)	Qadm (kN)	A(m2)	P (kN)	Qu (kN)
0,60	2540,56	0,28	2824,37	2363,84
0,70	3403,81	0,38	3421,53	3163,28
0,80	4258,67	0,50	3934,42	3944,51
0,90	5114,01	0,64	4378,59	4716,40
1,00	6262,00	0,79	4947,19	5771,12

TABLA 45. Carga máxima en cabeza de pilote, asiento máximo impuesto 2,5 cm, pilote tipo 3.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que la carga útil más restrictiva para este tipo de pilote será la obtenida por condición de hundimiento para los casos de los pilotes de diámetro 0,6 y 0,7 m, pues la carga máxima aplicable en la cabeza del pilote por condición de asiento (P) es mayor que la carga útil obtenida por condición de hundimiento.

El resto de diámetros comprobados, la carga más restrictiva será la obtenida por condición de asiento. Por ejemplo para un pilote de diámetro 0,8 m la carga útil por condición de hundimiento es 3944,51 kN mientras que para el mismo diámetro la carga útil por condición de asiento es 3934,42 kN, algo más de 10 kN de diferencia, dicha diferencia va incrementando conforme aumenta el diámetro del pilote.

4.4 Carga útil en pilotes

Para la obtención de la carga útil (=más desfavorable) se ha comparado las cargas máximas admisibles según las condiciones de hundimiento, asiento y tope estructural.

En primer lugar, se ha tomado la carga máxima admisible por hundimiento y se le ha restado el peso del pilote, obteniéndose así la máxima carga aplicable en la cabeza del pilote y de este modo cumplir dicha condición.

Esta carga se ha comparado con la máxima carga admisible en la cabeza del pilote por condición de asiento calculada en el apartado anterior así como con el tope estructural.

De esta forma se establece que, la menor carga de las tres será la máxima carga útil que se puede transmitir a un pilote aislado.

4.4.1 Tipo 1

En los pilotes tipo 1 se observa que para la opción de diámetro más pequeño la carga más restrictiva es la obtenida por condición de hundimiento, para el pilote de siguiente dimensión, es decir, el de 0,7 m la carga útil más restrictiva, de nuevo, es la obtenida por condición de hundimiento, en el resto de los diámetros la carga útil máxima es la obtenida por condición de asiento.

Pilotes TIPO 1					
D (m)	Por hundimiento			Por asiento	Tope estructural
	Qadm (kN)	W(kN)	Ph(kN)	Pa (kN)	Te (kN)
0,6	2699,86	176,71	2523,14	2940,08	2544,69
0,7	3589,66	240,53	3349,13	3550,89	3463,61
0,8	4490,05	314,16	4175,89	4090,21	4523,89
0,9	5375,90	397,61	4978,29	4549,37	5725,55
1	6555,82	490,87	6064,94	5128,79	7068,58

TABLA 46. Cuadro resumen carga máxima admisible por condición de hundimiento vs. condición de asiento, pilote tipo 1.

4.4.2 Tipo 2

En los pilotes tipo 2 se observa que, para todos los casos la carga más restrictiva es la obtenida por condición de hundimiento, cumpliendo como es lógico también la condición de asiento, excepto el de diámetro 1 m, donde la mas restrictiva es la obtenida por condición de asiento.

Pilotes TIPO 2					
D (m)	Por hundimiento			Por asiento	Tope estructural
	Qadm (kN)	W(kN)	Ph(kN)	Pa (kN)	Te (kN)
0,6	1523,42	141,37	1382,05	2048,49	2544,69
0,7	2033,60	192,42	1841,18	2418,33	3463,61
0,8	2588,64	251,33	2337,31	2761,71	4523,89
0,9	3176,29	318,09	2858,21	3074,40	5725,55
1	3954,73	392,70	3562,03	3486,57	7068,58

TABLA 47. Cuadro resumen carga máxima admisible por condición de hundimiento vs. condición de asiento, pilote tipo 2.

4.4.3 Tipo 3

En los pilotes tipo 3 se observa que, para los pilotes de diámetro 0,6 y 0,7 la carga útil máxima más restrictiva es la obtenida por condición de hundimiento, en el resto de diámetros la carga útil máxima es la obtenida por condición de asiento.

Pilotes TIPO 3					
D (m)	Por hundimiento			Por asiento	Tope estructural
	Qadm (kN)	W(kN)	Ph(kN)	Pa (kN)	Te (kN)
0,6	2540,56	176,71	2363,84	2824,37	2544,69
0,7	3403,81	240,53	3163,28	3421,53	3463,61
0,8	4258,67	314,16	3944,51	3934,42	4523,89
0,9	5114,01	397,61	4716,40	4378,59	5725,55
1	6262,00	490,87	5771,12	4947,19	7068,58

TABLA 48. Cuadro resumen carga máxima admisible por condición de hundimiento vs. condición de asiento, pilote tipo 3.