

ANEJO 2. PLAXIS.

Soluciones de cimentación en parcela del Puerto de Valencia

Índice

Índice de tablas

Índice de imágenes

1. Introducción	3
2. Metodología	3
3. Modelos	8
3.1 Dimensión B=1 m.	8
3.2 Dimensión B=2 m.	9
3.3 Dimensión B=3 m.	11
3.4 Dimensión B=4 m.	13
3.5 Dimension B=5 m.	14
4. Resumen	16

Índice de tablas

TABLA 1. Parámetros geomecánicos del Nivel 0.....	4
TABLA 2. Resumen carga transmitida por condición de hundimiento ($Q_{u\text{ hund.}}$), cálculo BRINCH-HANSEN vs. PLAXIS, y coeficiente de seguridad.....	17

Índice de imágenes

IMAGEN 1. Ubicación de la parcela objeto de estudio.....	3
IMAGEN 2. Introducción de dimensiones del clúster.....	4
IMAGEN 3. Introducción de parámetros geomecánicos del Nivel 0 en el software.	5
IMAGEN 4. Malla de nodos.....	6
IMAGEN 5. Presiones intersticiales.	6
IMAGEN 6. Tensiones efectivas.	7
IMAGEN 7. Fases de cálculo.....	7
IMAGEN 8. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión $B=1$ m.....	8
IMAGEN 9. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión $B=1$ m.....	9
IMAGEN 10. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=1$ m.	9
IMAGEN 11. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión $B=2$ m.....	10
IMAGEN 12. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión $B=2$ m.....	10
IMAGEN 13. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=2$ m.	11
IMAGEN 14. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión $B=3$ m.....	12
IMAGEN 15. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión $B=3$ m.....	12
IMAGEN 16. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=3$ m.	12
IMAGEN 17. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión $B=4$ m.....	13
IMAGEN 18. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión $B=4$ m.....	14
IMAGEN 19. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=4$ m.	14
IMAGEN 20. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión $B=5$ m.....	15
IMAGEN 21. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión $B=5$ m.....	15
IMAGEN 22. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=5$ m.	16

1. Introducción

En este anejo se realiza la comparativa, de algunos supuestos, entre los cálculos por métodos manuales y mediante software de elementos finitos (PLAXIS), para las cimentaciones directas a una profundidad $D=1\text{m}$, en la parcela ubicada en la ampliación norte del puerto de Valencia.



IMAGEN 1. Ubicación de la parcela objeto de estudio.

La modelización por elementos finitos, discretiza el problema continuo en una serie de elementos, sobre los que se aplican las condiciones cinemáticas y mecánicas del problema, siguiendo los modelos de comportamiento o constitutivos de los materiales que intervienen.

El empleo de modelos de elementos finitos proporciona una solución no exacta (formulación débil) comparada con un método físico-matemático, pero sí suficientemente aproximada, lo que los hace ideales para abordar problemas complejos.

El software comercial PLAXIS es uno de las aplicaciones informáticas de elementos finitos más empleadas en la Ingeniería Geotécnica. Desarrollado en la Universidad Técnica de Delft, este software permite trabajar con distintos modelos constitutivos, entre ellos el Modelo de Mohr-Coulomb y el Modelo de Estado Crítico Cam-Clay Modificado.

2. Metodología

Para realizar la comparativa entre los cálculos manuales y los cálculos mediante software de elementos finitos, se ha seguido la metodología que se explica a continuación.

Soluciones de cimentación en parcela del Puerto de Valencia

En primer lugar, se ha modelado el clúster con las propiedades propias de cada material, en este caso el NIVEL 0 y el hormigón de la zapata, a continuación, se le ha aplicado una carga centrada y vertical de 1 kN/m, dado que el programa realiza los cálculos por cada metro lineal de cimiento. Se ha ido incrementando esta carga hasta llegar a la situación de rotura del terreno, obteniendo un índice multiplicador de la carga inicial el cual provoca la rotura del terreno y la deformación máxima del terreno, además se ha extraído el coeficiente multiplicador que produce el asiento máximo admisible.

El clúster se ha modelado de acuerdo a las siguientes dimensiones: 25 m de ancho y 12,5 m de espesor, introduciéndose estos datos en el siguiente cuadro de dialogo:

IMAGEN 2. Introducción de dimensiones del clúster.

Una vez modelado el clúster se han modelado los materiales que componen el entorno de la cimentación con los parámetros geomecánicos siguientes:

		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	Coeficiente de poisson	0,3	
k_v	Permeabilidad vertical	-	m/s
k_h	Permeabilidad horizontal	-	m/s

TABLA 1. Parámetros geomecánicos del Nivel 0.

Además se ha considerado un modelo de cálculo para el terreno basado en el de Mohr-Culomb, drenado (a largo plazo), todos estos parámetros se han introducido en un cuadro de diálogo como el siguiente:

The image shows two overlapping windows from the PLAXIS software, both titled "Mohr-Coulomb - NIVEL 0". The top window is partially obscured by the bottom one. Both windows have tabs for "General", "Parameters", and "Interfaces".

Top Window (Parameters tab):

- Material Set:**
 - Identification: NIVEL 0
 - Material model: Mohr-Coulomb
- General properties:**
 - γ_{unsat} : 13,000 kN/m³
 - γ_{sat} : 17,000 kN/m³
- Permeability:**
 - k_x : 0,000 m/day
 - k_y : 0,000 m/day

Bottom Window (Parameters tab):

- Stiffness:**
 - E_{ref} : 7000,000 kN/m²
 - ν (nu): 0,300
- Strength:**
 - c_{ref} : 0,000 kN/m²
 - ϕ (phi): 30,000 °
 - ψ (psi): 0,000 °
- Alternatives:**
 - G_{ref} : 2692,308 kN/m²
 - E_{oed} : 9423,000 kN/m²
- Velocities:**
 - V_s : 45,050 m/s
 - V_p : 84,280 m/s

Both windows have an "Advanced..." button at the bottom right. The bottom window also has "Next", "Ok", "Cancel", and "Help" buttons at the very bottom.

IMAGEN 3. Introducción de parámetros geomecánicos del Nivel 0 en el software.

Por otro lado, las zapatas se han modelado de acuerdo a los anchos $B = 1, 2, 3, 4$ y 5 m con el plano de cimentación situado a 1 m de la superficie, con un modelo de cálculo lineal elástico, con un peso específico de hormigón de 25 kN/m^3 , un módulo de elasticidad $E = 30000 \text{ MPa}$, y un coeficiente de Poisson de $\nu = 0.3$.

Una vez introducidos los parámetros se definen las condiciones de contorno y se genera la malla de nodos,

Soluciones de cimentación en parcela del Puerto de Valencia

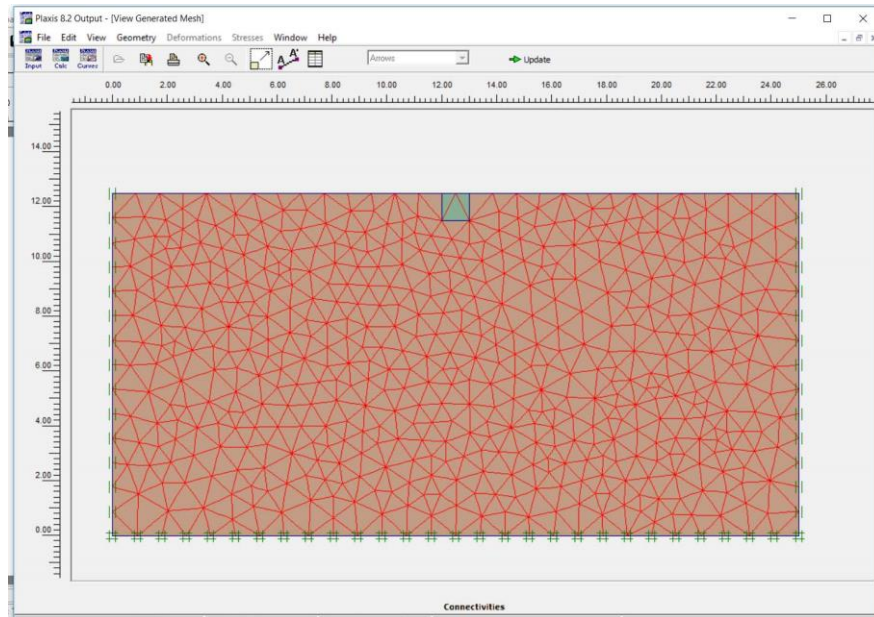


IMAGEN 4. Malla de nodos.

A continuación se calculan las condiciones iniciales de presiones intersticiales y tensiones efectivas considerándose el terreno en su estado original, es decir, sin la excavación de la zapata, dando como resultado el siguiente output:

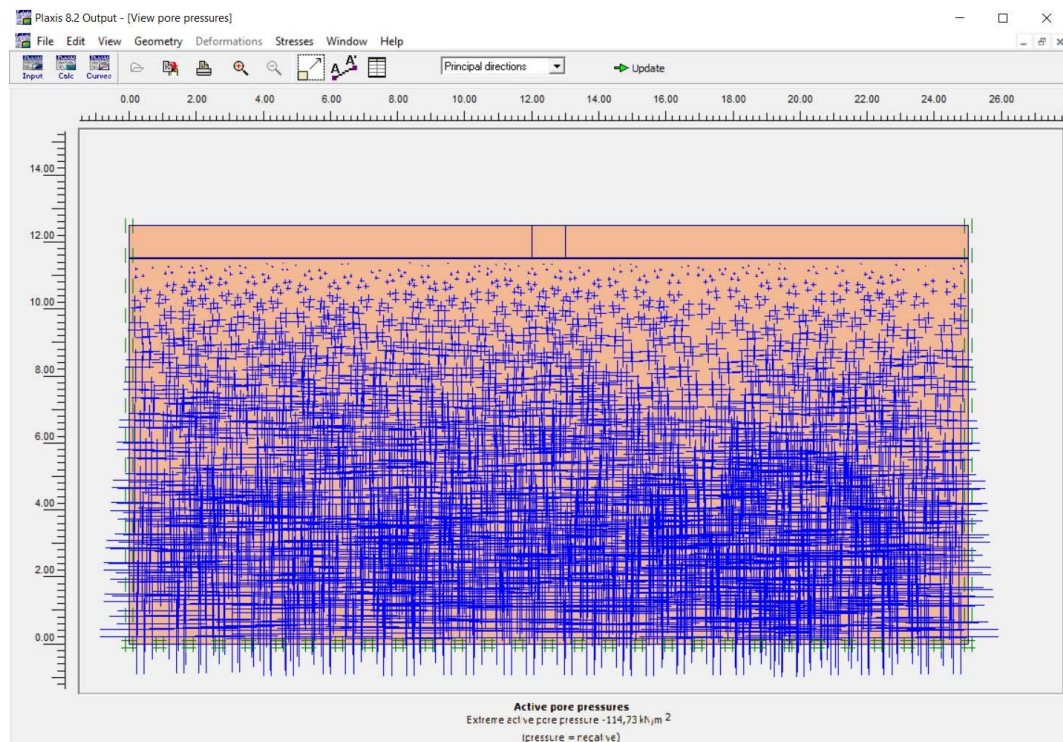


IMAGEN 5. Presiones intersticiales.

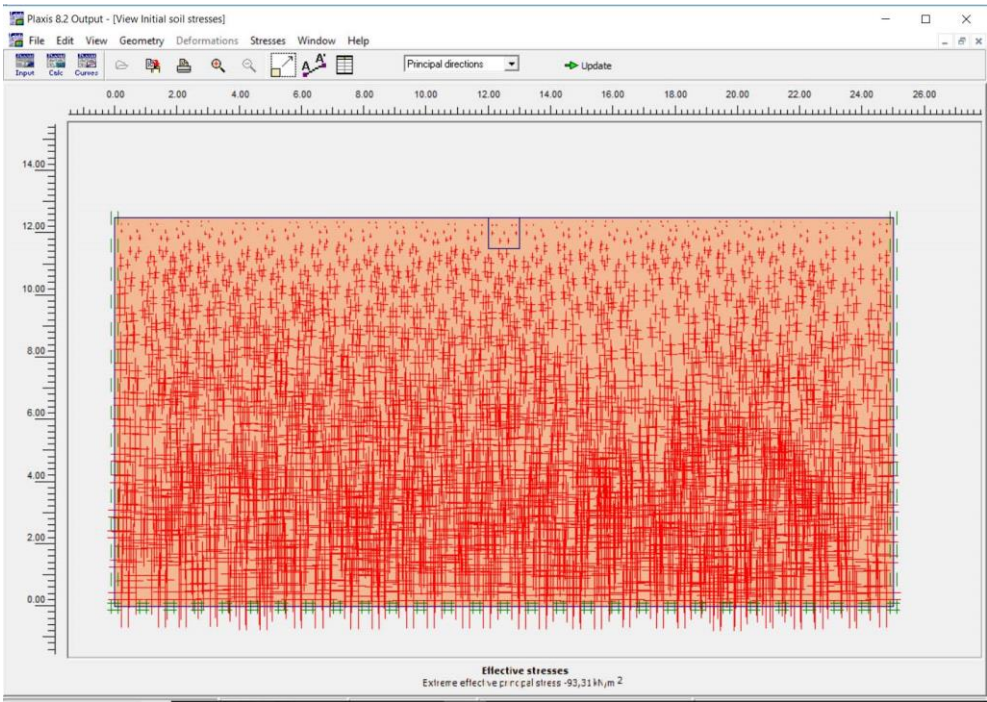


IMAGEN 6. Tensiones efectivas.

Por último se introduce la carga de 1 kN/m y se realiza el cálculo en tres fases: la primera comprueba que el terreno resiste a la carga ejercida producida por el peso propio de la zapata, en una segunda fase se aplica la carga de valor 1 kN/m y por último, en una tercera fase, la carga será incrementada por un multiplicador hasta el colapso del terreno.

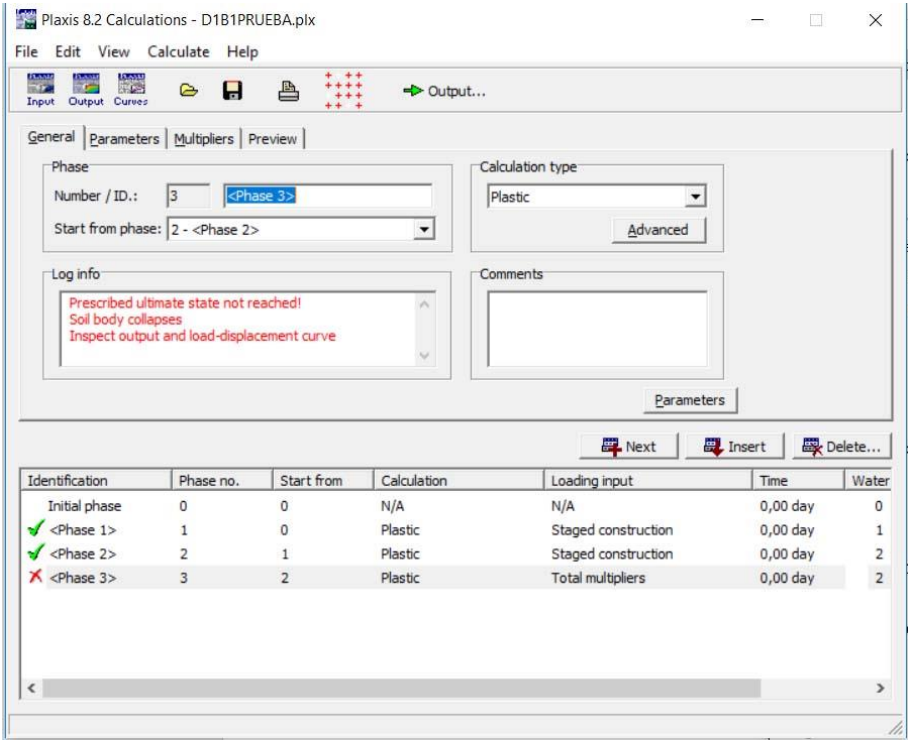


IMAGEN 7. Fases de cálculo.

3. Modelos

3.1 Dimensión B=1 m.

En esta imagen se observa como aumenta el multiplicador hasta la rotura del terreno dando un valor de 333,32, donde la carga inicial es 1 kN/m, dando como resultado una carga transmitida de rotura del terreno de 333,62 kN. La carga de rotura obtenida mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, una vez aplicado el coeficiente de seguridad de 3 y reducida por el peso específico de la zapata es 111,49 kN, es decir, carga transmitida máxima. Dada la carga obtenida por condición de hundimiento mediante el cálculo manual y la carga obtenida del modelo informático, se observa que la obtenida mediante BRINCH-HANSEN es 2,84 veces mayor, muy cercana al coeficiente de seguridad empleado en el cálculo manual.

También se observa en la imagen que el multiplicador de la carga inicial de 1 kN/m para que se cumpla la condición de asiento de 2,5 cm es 57,21, dando como resultado una carga transmitida máxima por condición de asiento de 57,21 kN, como es transmitida habrá que sumarle el peso específico de la zapata y así obtenerse la carga admisible.

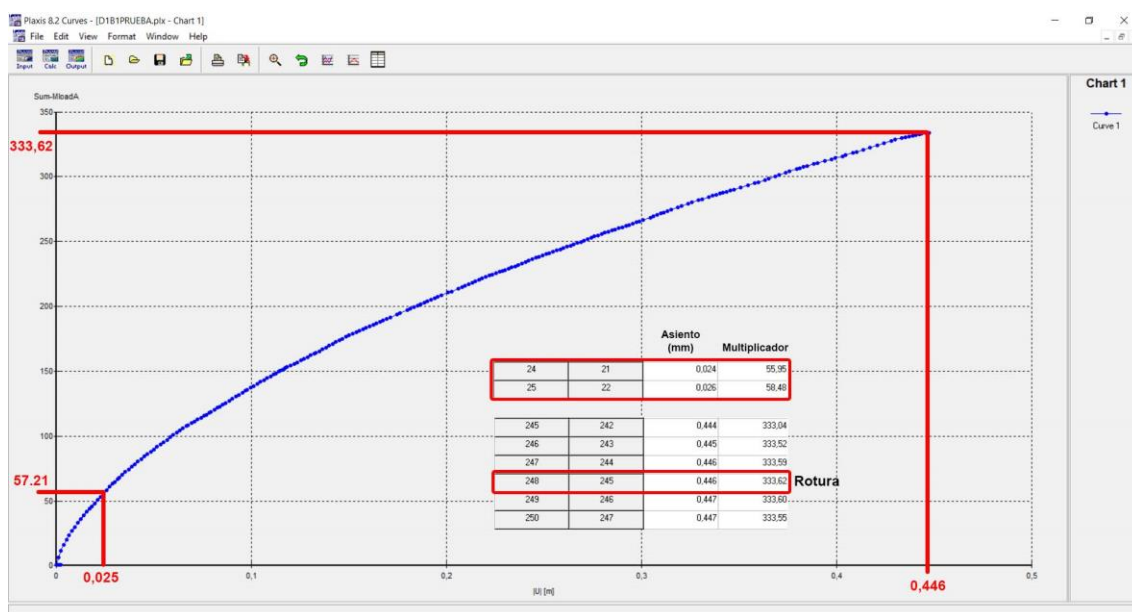


IMAGEN 8. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión B=1 m.

		Asiento (mm)	Multiplicador
24	21	0,024	55,95
25	22	0,026	58,48
245	242	0,444	333,04
246	243	0,445	333,52
247	244	0,446	333,59
248	245	0,446	333,62
249	246	0,447	333,60
250	247	0,447	333,55

Rotura

IMAGEN 9. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión B=1 m.

En la imagen siguiente se observa el desplazamiento máximo del terreno que se produce en el momento de la rotura, para la carga 333,62 kN.

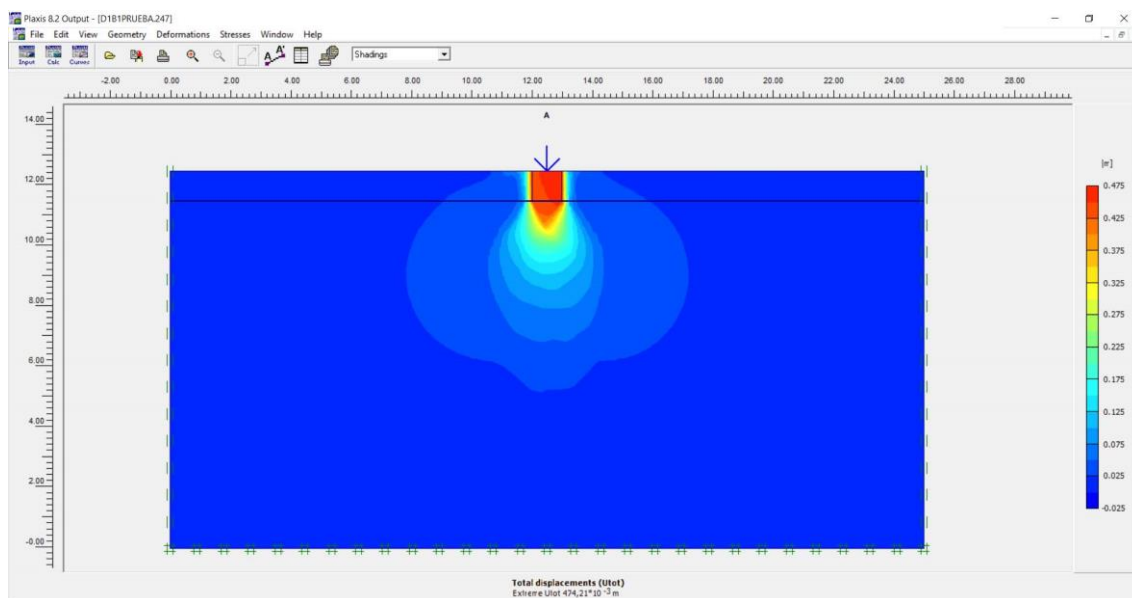


IMAGEN 10. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata B=1 m.

3.2 Dimensión B=2 m.

En esta imagen se observa como aumenta el multiplicador hasta la rotura del terreno dando un valor de 769,61, donde la carga inicial es 1 kN/m, dando como resultado una carga transmitida de rotura del terreno de 1539,22 kN. La carga de rotura obtenida mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, una vez aplicado el coeficiente de seguridad de 3 y reducida por el peso específico de la zapata es 526,20 kN, es decir, carga. Dada la carga obtenida por condición de hundimiento mediante el cálculo manual y la carga obtenida del modelo informático, se observa que la obtenida mediante BRINCH-HANSEN es 2,93 veces mayor, muy cercana al coeficiente de seguridad empleado en el cálculo manual.

Soluciones de cimentación en parcela del Puerto de Valencia

También se observa en la imagen que el multiplicador de la carga inicial de 1 kN/m para que se cumpla la condición de asiento de 2,5 cm es 79,41, dando como resultado una carga transmitida máxima por condición de asiento de 158,82 kN, como es carga transmitida habrá que sumarle el peso específico de la zapata y así obtenerse la carga admisible.

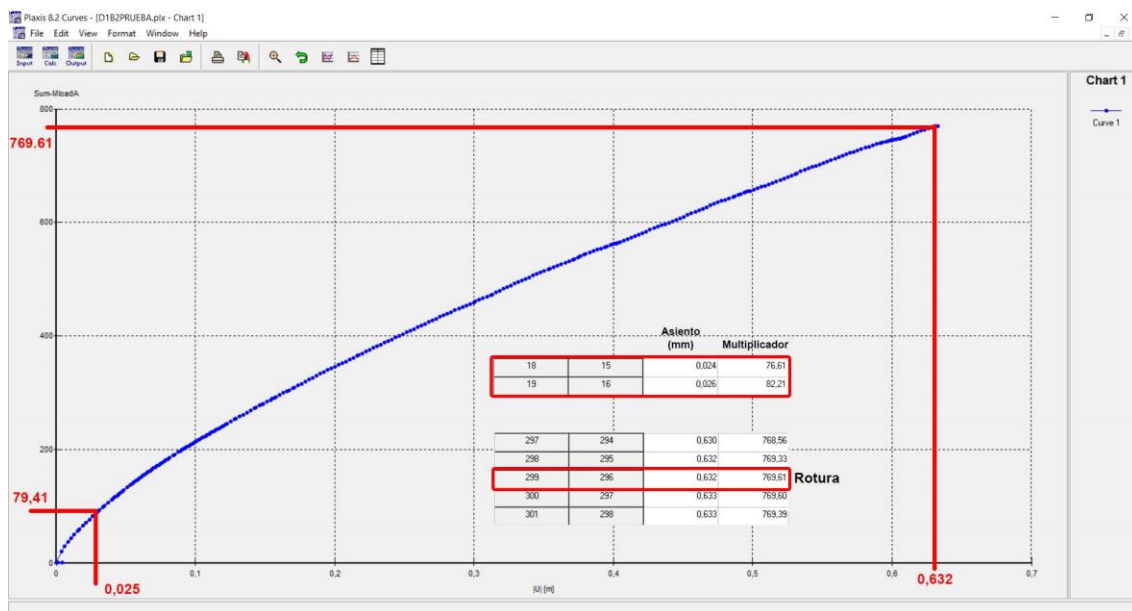


IMAGEN 11. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión B=2 m.

Asiento (mm)		Multiplicador	
18	15	0,024	76,61
19	16	0,026	82,21
297	294	0,630	768,56
298	295	0,632	769,33
299	296	0,632	769,61
300	297	0,633	769,60
301	298	0,633	769,39

Rotura

IMAGEN 12. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión B=2 m.

En la imagen siguiente se observa el desplazamiento máximo del terreno que se produce en el momento de la rotura, para la carga 1539,22 kN.

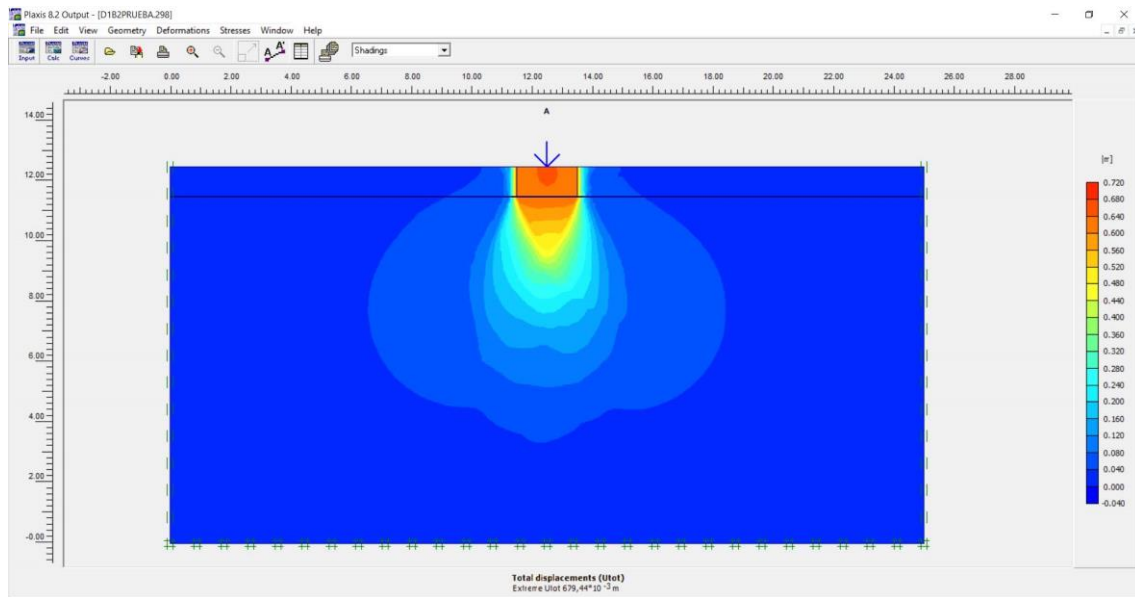


IMAGEN 13. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=2$ m.

3.3 Dimensión $B=3$ m.

En esta imagen se observa como aumenta el multiplicador hasta la rotura del terreno dando un valor de 1217, donde la carga inicial es 1 kN/m, dando como resultado una carga transmitida de rotura del terreno de 3741 kN. La carga de rotura obtenida mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, una vez aplicado el coeficiente de seguridad de 3 y reducida por el peso específico de la zapata es 1310,55 kN, es decir, carga útil. Dada la carga obtenida por condición de hundimiento mediante el cálculo manual y la carga obtenida del modelo informático, se observa que la obtenida mediante BRINCH-HANSEN es 2,85 veces mayor, muy cercana al coeficiente de seguridad empleado en el cálculo manual.

También se observa en la imagen que el multiplicador de la carga inicial de 1 kN/m para que se cumpla la condición de asiento de 2,5 cm es 94,69, dando como resultado una carga transmitida máxima por condición de asiento de 284,1 kN, como es carga transmitida habrá que sumarle el peso específico de la zapata y así obtenerse la carga admisible.

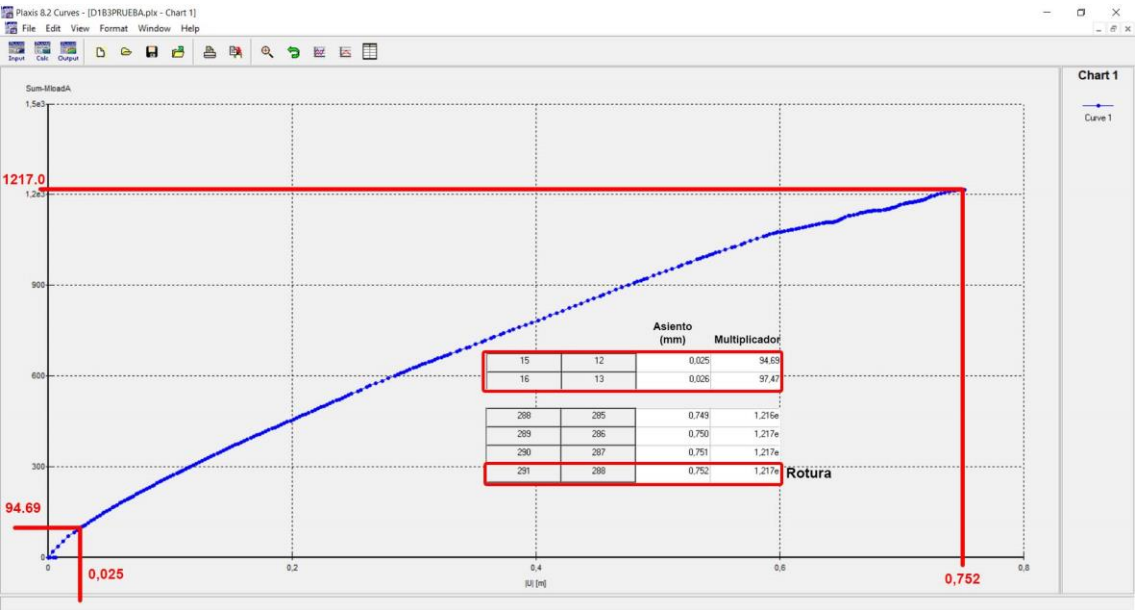


IMAGEN 14. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión B=3 m.

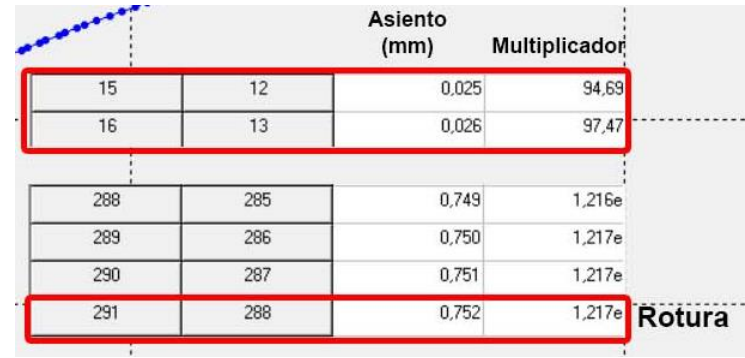


IMAGEN 15. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión B=3 m.

En la imagen siguiente se observa el desplazamiento máximo del terreno que se produce en el momento de la rotura, para la carga 3741 kN.

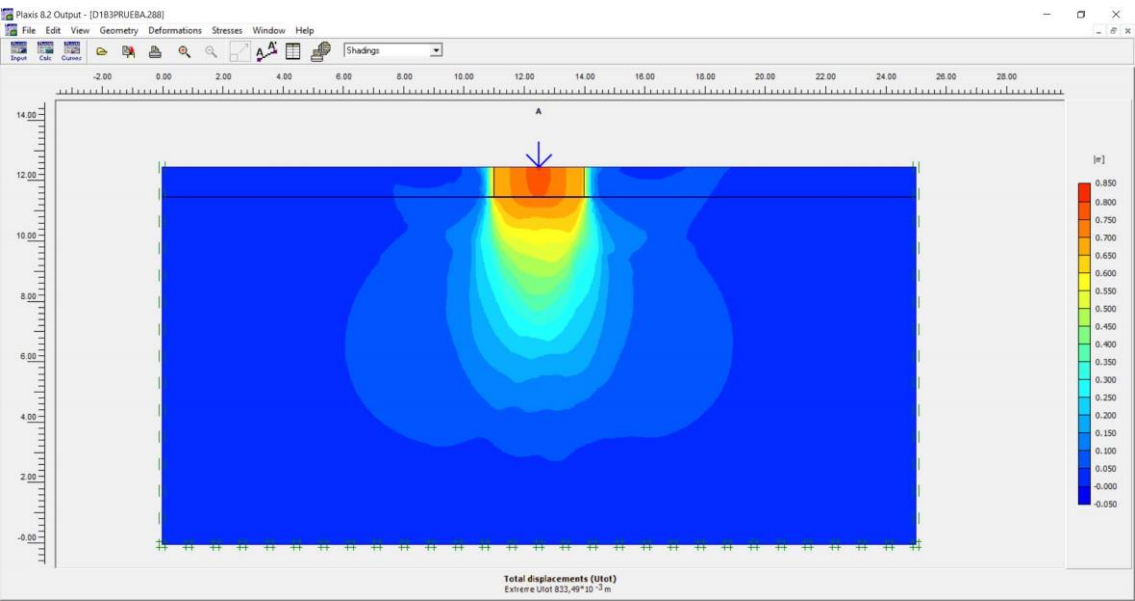


IMAGEN 16. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata B=3 m.

3.4 Dimensión B=4 m.

En esta imagen se observa como aumenta el multiplicador hasta la rotura del terreno dando un valor de 1791, donde la carga inicial es 1 kN/m, dando como resultado una carga transmitida de rotura del terreno de 7164 kN. La carga de rotura obtenida mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, una vez aplicado el coeficiente de seguridad de 3 y reducida por el peso específico de la zapata es 2554,9 kN, es decir, carga útil. Dada la carga obtenida por condición de hundimiento mediante el cálculo manual y la carga obtenida del modelo informático, se observa que la obtenida mediante BRINCH-HANSEN es 2,80 veces mayor, muy cercana al coeficiente de seguridad empleado en el cálculo manual.

También se observa en la imagen que el multiplicador de la carga inicial de 1 kN/m para que se cumpla la condición de asiento de 2,5 cm es 124,36, dando como resultado una carga transmitida máxima por condición de asiento de 497,44 kN, como es carga transmitida habrá que sumarle el peso específico de la zapata y así obtenerse la carga admisible.

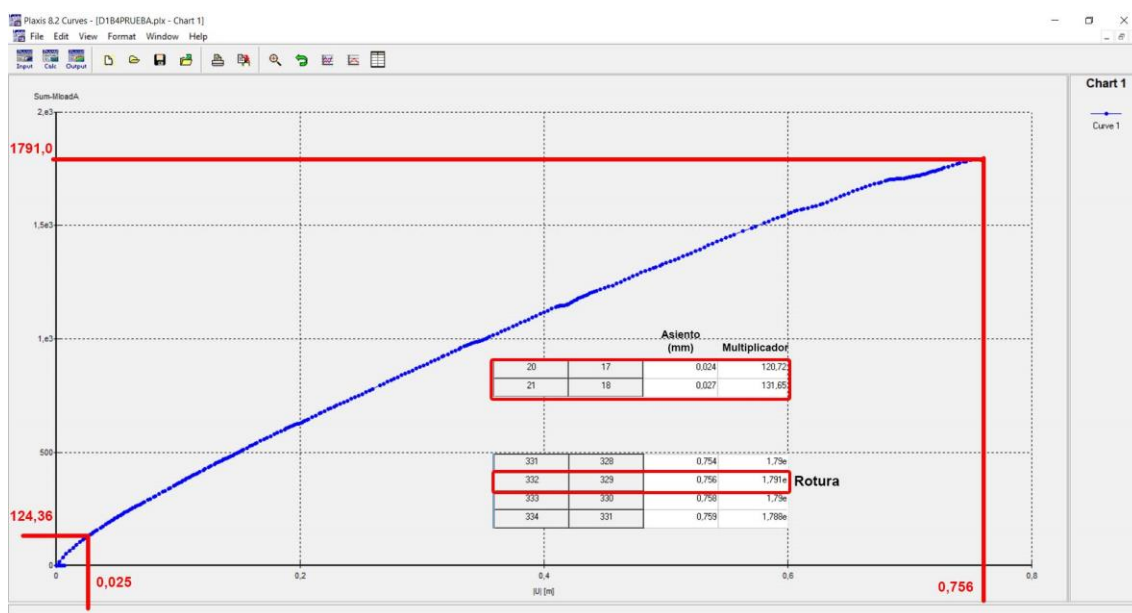


IMAGEN 17. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión B=4 m.

Asiento (mm)		Multiplicador	
20	17	0,024	120,72
21	18	0,027	131,65
331	328	0,754	1,79e
332	329	0,756	1,791e
333	330	0,758	1,79e
334	331	0,759	1,788e

Rotura

IMAGEN 18. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión B=4 m.

En la imagen siguiente se observa el desplazamiento máximo del terreno que se produce en el momento de la rotura, para la carga 7164 kN.

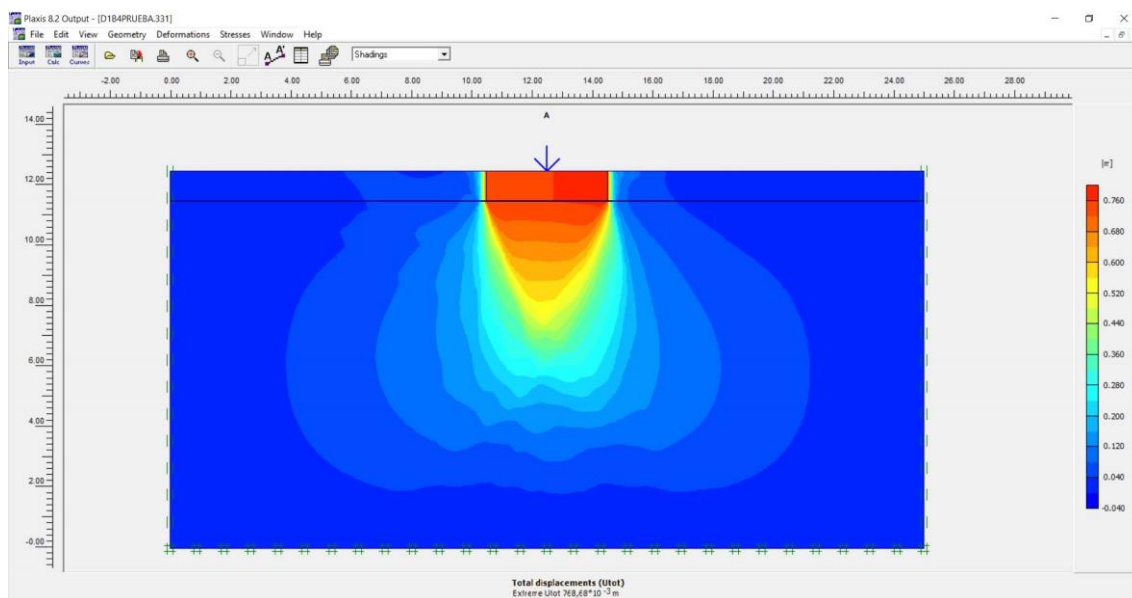


IMAGEN 19. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata B=4 m.

3.5 Dimension B=5 m.

En esta imagen se observa como aumenta el multiplicador hasta la rotura del terreno dando un valor de 2328, donde la carga inicial es 1 kN/m, dando como resultado una carga transmitida de rotura del terreno de 11640 kN. La carga de rotura obtenida mediante la expresión de BRINCH-HANSEN, una vez aplicado el coeficiente de seguridad de 3 y reducida por el peso específico de la zapata es 4343,66 kN, es decir, carga útil. Dada la carga obtenida por condición de hundimiento mediante el cálculo manual y la carga obtenida del modelo informático, se observa que la obtenida mediante BRINCH-HANSEN es 2,68 veces mayor, muy cercana al coeficiente de seguridad empleado en el cálculo manual aunque más alejado de este que el resto de los casos.

Soluciones de cimentación en parcela del Puerto de Valencia

También se observa en la imagen que el multiplicador de la carga inicial de 1 kN/m para que se cumpla la condición de asiento de 2,5 cm es 146,64, dando como resultado una carga transmitida máxima por condición de asiento de 733,2 kN, como es carga transmitida habrá que sumarle el peso específico de la zapata y así obtenerse la carga admisible.

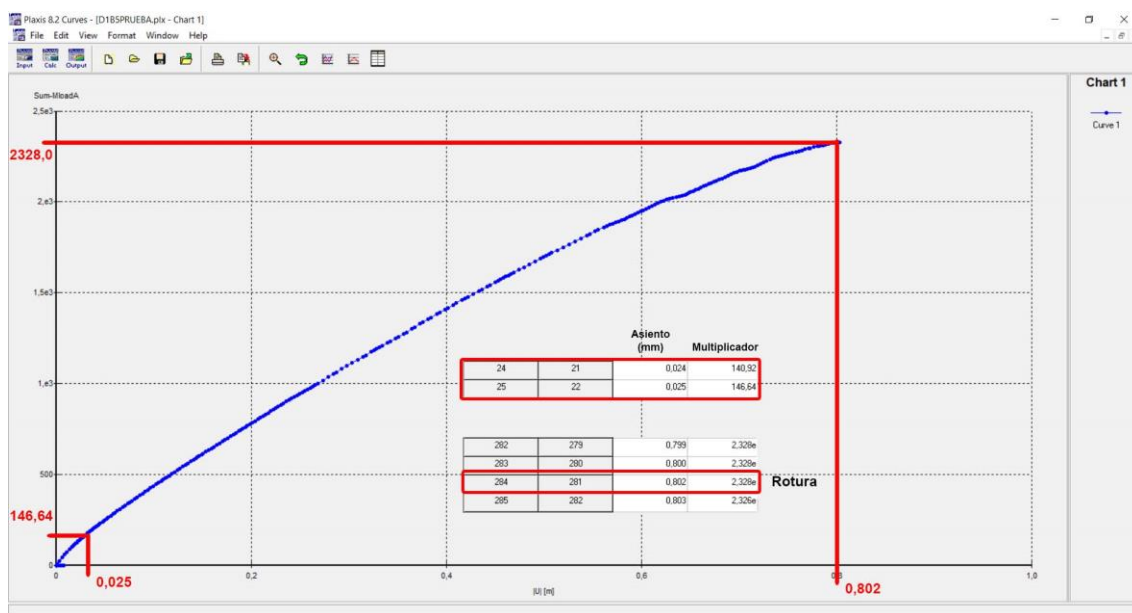


IMAGEN 20. Aumento del multiplicador hasta la rotura del terreno en zapatas de dimensión $B=5$ m.

Asiento (mm)		Multiplicador	
24	21	0.024	140.92
25	22	0.025	146.64
282	279	0.799	2.328e
283	280	0.800	2.328e
284	281	0.802	2.328e
285	282	0.803	2.326e

IMAGEN 21. Multiplicadores para la carga de hundimiento y de asiento en zapatas de dimensión $B=5$ m.

En la imagen siguiente se observa el desplazamiento máximo del terreno que se produce en el momento de la rotura, para la carga 11640 kN.

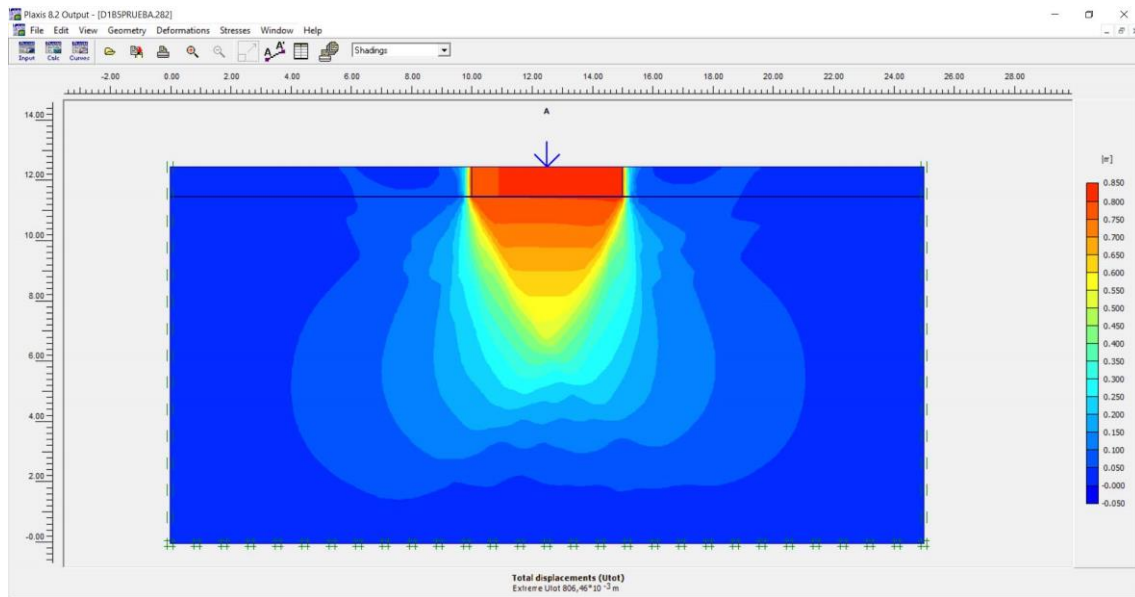


IMAGEN 22. Desplazamientos máximos en rotura para anchos de zapata $B=5\text{ m}$.

4. Resumen

En la siguiente tabla se observan las cargas útiles máximas calculadas por condición de hundimiento, tanto las obtenidas en el cálculo manual mediante la expresión de BRINCH-HANSEN como la obtenida mediante el software informático PLAXIS. La carga calculada mediante BRINCH-HANSEN que se ve en la tabla ya está minorada por el coeficiente de seguridad establecido por la ROM, que en este caso es 3, además se le ha descontado el peso específico de la zapata, con un canto de 1 m para todos los casos.

Del PLAXIS se obtienen: M_{rotura} , es el coeficiente multiplicador de la carga inicial de 1 kN/m que el software incrementa de manera automática hasta la rotura del terreno. Una vez obtenido este, se calcula la carga transmitida de hundimiento por unidad de longitud (P_{hund}) resultado de multiplicar el valor de M por la carga inicial establecida, por lo tanto, para obtener la carga transmitida por condición de asiento se multiplica la P_{hund} por la longitud de la zapata obteniéndose la $Q_{\text{adm,hund}}$.

Por último, se ha dividido la carga transmitida máxima por condición de asiento devuelta por el PLAXIS ($Q_{u, \text{hund}}$) entre la carga transmitida máxima por condición de hundimiento resultado de BRINCH-HANSEN (Q_u) y se ha obtenido la relación que existe entre ambos resultados que son: para zapatas de ancho $B=1$ el coeficiente es 2,84, $B=2$ es 2,93, $B=3$ es 2,85, $B=4$ es 2,80 y para $B=5$ es 2,68. En los cuatro primeros casos todos los resultados se encuentran en el mismo orden de magnitud y muy cercano al coeficiente de seguridad 3 empleado, no obstante el coeficiente multiplicador debería

ser igual al de seguridad y dado que el software arroja un valor un poco inferior, se puede llegar a la conclusión de que el software de cálculo sea ligeramente más conservador en la estimación de la carga de rotura.

Por otro lado, en la zapata de ancho $B=5$, el coeficiente de seguridad dista en mayor medida a 3 que el resto de los casos, llegando a la conclusión de que puede ser debido a que las grandes dimensiones de la zapata respecto a su canto, provocan que esta se comporte de manera elástica concentrando más carga en un punto del terreno en vez de distribuirlo de forma más uniforme causando así el colapso del terreno a una menor carga.

D (m)	B (m)	Brinch-Hansen	PLAXIS			Coeficiente seg.
		Qu (kN)	M rotura	P hund. (kN/m)	Qu hund (kN)	
1	1	117,49	333,62	333,62	333,62	2,84
	2	526,20	769,61	769,61	1539,22	2,93
	3	1310,55	1247,00	1247	3741	2,85
	4	2554,90	1791,00	1791	7164	2,80
	5	4343,66	2328	2328	11640	2,68

TABLA 2. Resumen carga transmitida por condición de hundimiento (Qu hund.), cálculo BRINCH-HANSEN vs. PLAXIS, y coeficiente de seguridad.