

Cálculo de asientos a partir del ensayo de penetración dinámica, o estática

En este texto presento la metodología y formulación que yo utilizo para el cálculo de asientos a partir de los golpes del ensayo DPSH. Obviamente, este no es el único sistema para realizarlo. Por otro lado también se puede utilizar la misma metodología con distinta formulación.

Esta metodología y formulación es aplicable a cualquier otro ensayo de penetración dinámica pues la fórmula de los Holandeses es válida para cualquier ensayo de penetración dinámica.

Así mismo, esta metodología es aplicable a los ensayos de penetración estática; simplemente no es necesario realizar los dos primeros pasos pues ya se tiene la resistencia estática, que es lo que se intenta averiguar con los dos primeros pasos.

Paso 1: Cálculo de la resistencia dinámica.

A partir de los golpes del ensayo DPSH se obtiene mediante la fórmula de los Holandeses la resistencia dinámica:

$$R_d = \frac{M^2 \cdot H}{A \cdot e(M + n \cdot P)} \quad \text{Fórmula de los Holandeses}$$

Siendo:

R_d : resistencia dinámica (kg/cm²)
M: masa de la maza (kg)
H: altura de caída de la maza (cm)
A: sección de la punta (cm²)
e: penetración del golpeo (cm)
n: número de barras puestas
P: masa de una barra (kg)

Esta fórmula se puede encontrar, por ejemplo, en:

- El penetrómetro y el reconocimiento de los suelos. G. SANGLERAT. Servicio de publicaciones ministerio de obras públicas. Madrid 1967. (Pág. 16 y 137)
- Cimentaciones superficiales. FRUCTUOSO MAÑÁ. Editorial Blume. (Pág. 72)

Paso 2: Correlación entre la resistencia dinámica y la resistencia estática.

A partir de la resistencia dinámica se obtiene la resistencia estática del cono, resistencia en punta del ensayo de penetración estática (CPT), mediante la correlación propuesta por Buisson (1952), ratificada en trabajos posteriores por L'Herminier y Tcheng y más tarde por Sanglerat (1965):

S/D	Tipo de terreno
0.3	Suelos de compacidad muy floja o consistencia blanda
0.5	Arcillas
0.75	Arenas
1.0	Gravas con fuerte rozamiento

Siendo:

- S: resistencia estática. Carga estática (esfuerzo en la punta + rozamiento lateral).
- D: resistencia dinámica. Carga dinámica calculada por la fórmula de los holandeses sin coeficiente de seguridad.

El intervalo de valores habitual es el comprendido entre 0.5 y 0.75, siendo excepcionales los valores 0.3 y 1.

Esta correlación se puede encontrar en:

- El penetrómetro y el reconocimiento de los suelos. G. SANGLERAT. Servicio de publicaciones ministerio de obras publicas. Madrid 1967. (Pág. 138)

Paso 3: Determinación del módulo de deformación.

Existen multitud de correlaciones entre la resistencia en punta del ensayo de penetración estática (CPT) y el módulo de deformación del terreno: Buisman (1935), Skempton (1951), Meyerhof (1953, 1957), Bachelier y Parez (1965), Sanglerat (1965, 1972, 1978), Thomas (1968), Schmertmann (1970), Trofinenkov (1974), Schmertmann y Hartman (1978),...

Algunas de estas correlaciones se pueden encontrar, por ejemplo, en:

- El penetrómetro y el reconocimiento de los suelos. G. SANGLERAT. Servicio de publicaciones ministerio de obras publicas. Madrid 1967. (Pág. 267)
- Cimentaciones superficiales. FRUCTUOSO MAÑÁ. Editorial Blume. (Pág. 129)
- Settlement analysis. EM 1110-1-1904. U.S. Army Corps of Engineers. (Pág. D-8 y D-9)
- Ingeniería de cimentaciones. DELGADO VARGAS, M. Editorial Alfaomega. (Pág. 375 y 411 y 412)
- Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM. MEYERHOF y FELLENIUS (1985).
- Principios de ingeniería de cimentaciones. BRAJA M. DAS. International Thomson Editores S.A. (Pág. 251)
- Fundamentos de mecánica de suelos. WHITLOW, ROY. Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA). (Pág. 516 y 517)
- Geotecnia y cimientos II. JIMÉNEZ SALAS, J.A. & DE JUSTO ALPAÑES, J.L. Editorial Rueda. (Pág. 446 a 448)
- Norma NSR-98. Título H. Estudios geotécnicos. (Pág. H-21)

Estas correlaciones dicen que el módulo de deformación es igual a la resistencia en punta del ensayo CPT por una variable dependiente del tipo de terreno ($E = \alpha \cdot R_p$ ó $E = \alpha \cdot q_c$). En esta relación el valor de α depende de la historia de esfuerzos del depósito. Valores comúnmente utilizados de α son:

Tipo de Terreno	Clasificación SUCS	q_c (kg/cm ²)	Humedad (%)	α
Arcilla de baja plasticidad	CL	< 7		3 - 8
		7 - 20		2 - 5
		> 20		1 - 2.5
Limo de baja plasticidad	ML	< 20		3 - 6
		> 20		1 - 3
Arcillas y limos plásticos	CH, MH	< 20		2 - 6
		> 20		1 - 2
Limo orgánico	OL	< 12		2 - 8
Turba y arcilla muy orgánica	PT, OH	< 7	50 - 100	1.5 - 4
			100 - 200	1 - 1.5
			> 200	0.4 - 1
Arena	SW, SP,	< 50		2 - 4
		> 50		1.5
Arena arcillosa	SC,			3 - 6
Arena limosa	SM			1 - 2
Creta		20 - 30		2 - 4
		> 30		1.5 - 3

Kg/cm² \approx bares

Paso 4: Elección del módulo de Poisson.

Posible valor del coeficiente de Poisson según el material:

- Arcilla húmeda: 0.10 - 0.30
- Arcilla arenosa: 0.20 - 0.35
- Arcilla saturada: 0.45 - 0.50
- Limo: 0.30 - 0.35
- Limo saturado: 0.45 - 0.50
- Arena suelta: 0.20 - 0.35
- Arena densa: 0.30 - 0.40
- Arena fina: 0.25
- Arena gruesa: 0.15
- Rocas: 0.15 - 0.25
- Loess: 0.10 - 0.30

Paso 5: Determinación de los asientos.

Una vez obtenidos los datos necesarios se realiza una estimación de los asientos mediante la fórmula de Schleicher (1926), ofrecida por Terzaghi (1943), sobre un semiespacio de Boussinesq (método elástico):

Asientos			
Carga flexible		Carga rígida	
• Esquina :	• Centro :	• Valor medio :	• Carga rígida :
$s = q \cdot b \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot I_p$	$s = 2 \cdot q \cdot b \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot I_p$	$s = s_{(centro)} \cdot 0.848$	$s = 93\% \cdot s_{(valor\ medio)}$

Siendo:

$$I_p = \frac{1}{\pi} \cdot \left[m \cdot \ln \left(\frac{(m^2 + 1)^{1/2} + 1}{m} \right) + \ln \left[(m^2 + 1)^{1/2} + m \right] \right]$$

$$m = L / B$$

L : largo de la cimentación

B : ancho de la cimentación

Esta formulación y sus variantes (como la de Steinbrenner) se pueden encontrar, por ejemplo, en:

- Geotecnia y cimientos II. JIMÉNEZ SALAS, J.A. & DE JUSTO ALPAÑES, J.L. Editorial Rueda. (Pág. 223 – 225, 257 - 263)
- Mecánica de suelos. T. WILLIAM LAMBE, ROBERT V. WHITMAN. Editorial Limusa-Wiley, S.A. (Pág. 231)
- Settlement analysis. EM 1110-1-1904. U.S. Army Corps of Engineers. (Pág. 3-17 a 3-23)
- Eurocódigo 7. Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales. AENOR. UNE-ENV 1997-1. (Pág. 105)
- Norma NSR-98. Título H. Estudios geotécnicos. (Pág. H-20)
- Curso aplicado de cimentaciones. RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M. et al. (punto A.4.3.b del apéndice del capítulo 2)
- Mecánica de suelos y cimentaciones. CRESPO VILLALAZ, C. Editorial Limusa, S.A. (Pág. 312)
- Ingeniería de cimentaciones. DELGADO VARGAS, M. Editorial Alfaomega. (Pág. 267)
- Principios de ingeniería de cimentaciones. BRAJA M. DAS. International Thomson Editores S.A. (Pág. 241)
- Fundamentos de mecánica de suelos. WHITLOW, ROY. Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA). (Pág. 219 y 424)

Asientos multicapa. Dado que con la metodología y formulación utilizada para la obtención del módulo de deformación se tiene el módulo de deformación para capas de 20 centímetros, hasta el final del ensayo DPSH, se calcula el asiento parcial correspondiente a cada una de estas capas de 20 centímetros, y con el último módulo de deformación obtenido se calculan los asientos hasta una profundidad en la que se considera que se encuentra una capa rígida, puesto que si no se hace esto, la fórmula de Schleicher supone una capa de potencia infinita. La profundidad de esta capa se puede suponer, siguiendo las recomendaciones de Settlement análisis EM 1110-1-1904 U.S. Army Corps of Engineers, situada a la profundidad en la que la tensión transmitida es un 10% de la tensión inicial. El sumatorio de los asientos parciales da como resultado el asiento total.

Para el cálculo de asientos de cada una de las capas utilizo la siguiente metodología:

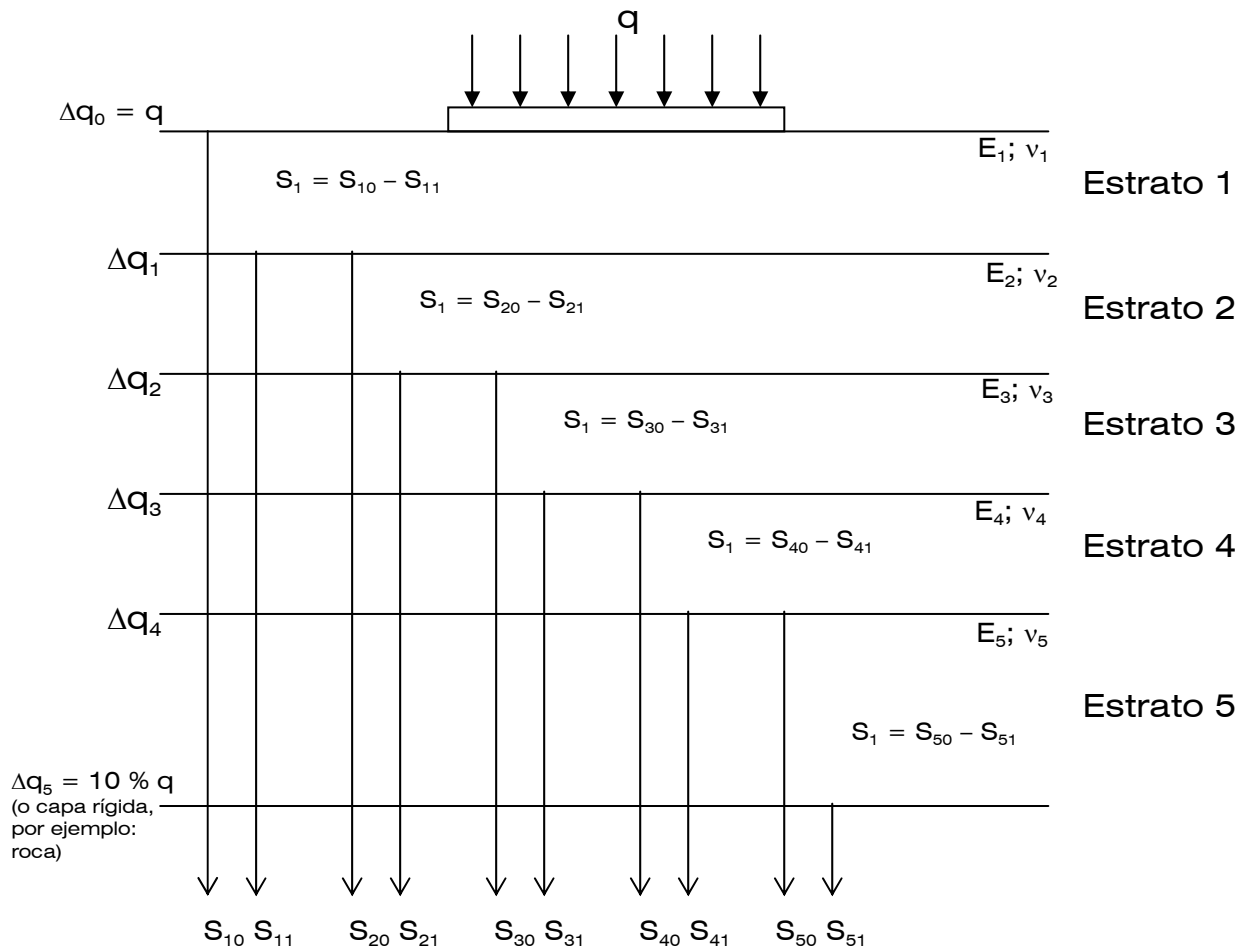
Para una capa dada se calcula la carga que se transmite a techo y muro de la misma: se calculan los asientos con los parámetros de esa capa con la carga transmitida a techo y a muro. A los asientos que se producen con la carga transmitida a techo se le restan los asientos que se producen con la carga transmitida a muro, obteniéndose así los asientos de esa capa. Esto se realiza para cada una de las capas en las que se halla dividido el subsuelo. El sumatorio de los asientos de todas las capas da el asiento total del terreno.

Metodologías similares, aunque con distinta formulación, para el cálculo de asientos multicapa se pueden encontrar en:

- Guía geotécnica para cimentaciones de edificios en la comunidad de Madrid. Memoria General (Pág. 54 posterior)
- Ingeniería Geológica. González de Vallejo, L. I. et al. Editorial Prentice may. (Pág. 408)
- Ingeniería de cimentaciones. DELGADO VARGAS, M. Editorial Alfaomega. (Pág. 270 método de Steinbrenner, Pág. 273 ecuación de Janbu)

La metodología general se puede encontrar en:

- Ingeniería de cimentaciones. DELGADO VARGAS, M. Editorial Alfaomega. (Pág. 268)



Cálculos:

- S_{10} con: $E_1 \nu_1 \Delta q_0$
- S_{11} con: $E_1 \nu_1 \Delta q_1$

- S_{20} con: $E_2 \nu_2 \Delta q_1$
- S_{21} con: $E_2 \nu_2 \Delta q_2$

- S_{30} con: $E_3 \nu_3 \Delta q_2$
- S_{31} con: $E_3 \nu_3 \Delta q_3$

- S_{40} con: $E_4 \nu_4 \Delta q_3$
- S_{41} con: $E_4 \nu_4 \Delta q_4$

- S_{50} con: $E_5 \nu_5 \Delta q_4$
- S_{51} con: $E_5 \nu_5 \Delta q_5$

Carga transmitida. Para el cálculo de la carga transmitida se puede utilizar una variante del método de cálculo de carga transmitida en profundidad denominado “método 2 en 1”. En esta variante se especifica el ángulo de transmisión de esfuerzos respecto a la vertical (utilizo un ángulo de transmisión de 30°, el utilizado en la “Guía geotécnica para cimentaciones de edificios en la comunidad de Madrid. Memoria General”).

El método de cálculo de la carga transmitida denominado “método 2 en 1” se puede encontrar, por ejemplo, en:

- Principios de ingeniería de cimentaciones. BRAJA M. DAS. International Thomson Editores S.A. (Pág. 228)
- Mecánica de suelos y cimentaciones. CRESPO VILLALAZ, C. Editorial Limusa, S.A. (Pág. 287)
- Settlement analysis. EM 1110-1-1904. U.S. Army Corps of Engineers. (Pág. C-1 y C-2)
- Guía geotécnica para cimentaciones de edificios en la comunidad de Madrid. Memoria General. (Pág. 53 posterior y 55 posterior)

La variante del método 2 en 1 utilizada se puede encontrar en la “Guía geotécnica para cimentaciones de edificios en la comunidad de Madrid. Memoria General” (Pág. 53 posterior).

Esfuerzo vertical σ_z a profundidad z
(método 2 en 1) :

$$\sigma_{z\text{media}} = \frac{q_0 \cdot B \cdot L}{(B + z) \cdot (L + z)}$$

En función del ángulo :

$$\sigma_{z\text{media}} = \frac{q_0 \cdot B \cdot L}{(B + z \cdot \tan \alpha) \cdot (L + z \cdot \tan \alpha)}$$

q_0 : carga bajo la cimentación

B : ancho de la cimentación

L : largo de la cimentación

z : profundidad a la que se calcula la carga transmitida

α : ángulo de transmisión de la carga respecto a la vertical

Obviamente el cálculo de la carga transmitida se puede realizar mediante otra formulación.