

Los suelos bajo cargas dinámicas*

Soils under dynamic loads

Javier Jenaro Mac-Lennan. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Obra. jjenaro@hotmail.com

Resumen: Se trata de la penetración dinámica de suelos mediante golpeo de una cuchara, para lo cual se considera que el suelo se comporta como un fluido durante el golpeo y que la resistencia por el fuste y la punta se ven afectados de unos coeficientes que dependen de la energía aplicada. (N).

Palabras Clave: Suelos, Mecánica, Penetración, Dinámica

Abstract: This paper deals with dynamical penetration of soil during the striking. It has been considered that a soil's behaviour is similar to the one of fluids, and that both the penetrating drag and the friction force are affected by energy (N) dependant coefficients.

Keywords: Soil, Mechanics, Penetration, Dynamics

1. Descripción Teórica

Si sometemos a un suelo a una carga dinámica causada por la penetración de una cuchara de acero de sección perimetral s y longitud L , a un golpeo de una maza de peso P que cae desde una altura h , la energía que comunica dicha maza a la cuchara es absorbida por la resistencia a la penetración que ofrece el suelo y por la deformación elástica de la misma ya que cuando la resistencia se hace infinita o muy grande toda la energía absorbida es la debida a la deformación elástica de la cuchara. Por lo tanto la ecuación de conservación se expresa estableciendo que la energía proporcionada por la maza es absorbida por la energía de la resistencia por el fuste más la debida a la resistencia por la punta más la debida a la reacción elástica de la cuchara.

2. Cálculo de la energía

Energía de reacción del suelo debida a la penetración de la cuchara

Para calcular esta energía es preciso definir un módulo de reacción del suelo, que se comporta plásticamente, y que depende de la energía aplicada de forma análoga a lo que lo ocurre a los fluidos pero haciendo las correcciones precisas para adaptarlo a nuestro caso de suelos granulares y cohesivos. De esta forma definimos la resistencia del terreno por la punta como:

$$R_p = C_a K(N)x$$

Siendo x la profundidad recorrida en el golpeo. Así destacamos la naturaleza lineal de la respuesta creciente con la profundidad (x) y que hace que al final la cuchara defina el avance una vez absorbida toda la energía por el trabajo realizado por las reacciones del suelo. Pero también el módulo de reacción, al igual que ocurre en los fluidos, depende de la energía desarrollada, por lo que K será función de N , número de golpes para penetrar x a través del suelo, así $K=K(N)$. También al igual que ocurre en mecánica de fluidos introducimos un coeficiente de arrastre debidamente adaptado a la naturaleza de un suelo que se deforma plásticamente. Definimos el coeficiente de arrastre como:

$$C_a = \frac{\gamma_a}{\gamma_s} \frac{\pi}{4} \frac{F_{0,08}}{a^2 F_s}$$

En donde:

γ_a = Peso específico del agua

γ_s = Peso específico del suelo

$$S = \text{Área de contacto suelo-cuchara} = \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \pi$$

D_1 es el diámetro exterior de la cuchara y D_2 el diámetro exterior

a = profundidad de bisel de la cuchara.

$F_{0,08}$ = Porcentaje del cernido del suelo por el tamiz ASTM 0,08

* El derecho de Propiedad de este artículo está amparado bajo el n.º 12/RTPI-001354/2005 del Registro territorial de la Propiedad Intelectual de la Comunidad de Madrid

F_5 = Porcentaje del cernido por el tamiz 5 ASTM

Por esta consideración se hace una proporcionalidad entre el valor dado en mecánica de fluidos y el que tiene en cuenta la naturaleza granular del suelo.

Por lo tanto la energía es:

$$E_p = \int R_p S dx = \int C_a K(N) x dx = C_a K(N) x^2 S \frac{1}{2}$$

Se pone también $x = \frac{1}{N}$

entonces se puede escribir:

$$E_p = C_a K(N) \frac{1^2}{N^2} S \frac{1}{2}$$

1 es la profundidad total de la penetración para un número de golpes N

Energía elástica de la cuchara

$$E_c = \int \frac{R_p L d R_p S}{ES} = \frac{K(N)^2 x^2 L}{2E} = \frac{K(N)^2 l^2 L}{2eN^2}$$

En donde:

K= módulo de reacción por la punta

x= profundidad de la penetración

L= longitud de la cuchara penetrante.

S= Sección de contacto suelo-cuchara

E= módulo de elasticidad de la cuchara

N= número de golpes para penetrar l (en SPT 1=.30 m)

Energía elástica por la fricción sobre el fuste

Al igual que hicimos para el cálculo de la energía absorbida por la punta, consideraremos un módulo de reacción que también depende de la energía, es decir $K' = K'(N)$. A igualdad de energía (N) aplicada, $K'(N_1)$ debe estar relacionado con $K(N_1)$ por una relación lineal donde el término de linealidad debe ser dimensionalmente una longitud a la -1. Buscar esta magnitud que tenga naturaleza inversamente lineal en geotecnia es sencillo, adoptamos:

$$K(N_1) = b K'(N_1)$$

$$b = \left(\frac{\tan^2 \phi}{25 * D_p} + \frac{\gamma_s}{c} \right)$$

En donde:

D_p = Diámetro ponderado de las partículas, calculada según la fórmula:

$$D_p = \frac{F_{12.5} * 12.5 + F_{6.30} * 6.30 + F_{0.16} * 0.16 + F_{0.08} * 0.08}{F_{12.5} + F_{6.30} + F_{0.16} + F_{0.08}}$$

Siendo 12.5...0.08 los tamices ASTM y F_i la fracción cernida por el tamiz i

ϕ = ángulo de rozamiento interno de las partículas

c = cohesión de las partículas

γ_s = peso específico del suelo

La energía absorbida por el fuste la definiremos teniendo en cuenta razones de homogeneidad y el hecho de que se trata de una fuerza de fricción, por lo que adoptamos:

$$R_f = k(N) \frac{x^2}{1^2}$$

Resulta entonces la energía:

$$E_f = \iiint R_f dx dy dz = K'(N) \pi D L \frac{x^3}{3 1^2} = K'(N) \pi D L \frac{1}{3 N^2}$$

De acuerdo con los términos calculados la ecuación final que rige el fenómeno sería:

$$E_p = C_a K(N) x^2 S \frac{1}{2} + K'(N) \pi D L \frac{1}{3 N^2} + \frac{K(N)^2 l^2 L}{2 e N^2}$$

Ecuación que teniendo en cuenta la relación dada entre K y K' dada anteriormente, resuelve el problema pues es:

$$R_f = k'(N) \frac{1}{N^2}$$

$$R_p = K(N) \frac{1}{N}$$

3. Aplicación

Aplicamos los resultados teóricos al caso de un suelo con las siguientes características geotécnicas:

Granulométrico, cernido de cada diámetro: ASTM

Tamiz: 12.5 6.30 5 2 0.16 0.08

Cernidos: 2 10 38 20 5 25

Cohesión $c = 5.73$ tn/m²

Ángulo de rozamiento interno $\phi = 39^\circ$

Peso específico $\gamma_s = 1.8$ tn/m³

Características de la maza: (Ensayo SPT)

Peso P = 0.0065 tn

Altura de caída h = 0.75m

Características de la cuchara:

$D_1 = 0.052$ m

$D_2 = 0.032$ m

$l = 0.015$ m

$L = 0.80$ m

$E = 1.9 \cdot 10^7$ tn/m²

Calculamos las constantes y aplicamos la ecuación de equilibrio:

$$K = k' \left(\frac{.005}{0.61} + \frac{10}{1.8} \right) = 5.5634 k'$$

$$S = s = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) = \frac{3.1415}{4} (.052^2 - 0.032^2) = 1.3194 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$C_s = \frac{1}{1.8} \frac{0.0013}{0.015^2} 0.4 = 1.284$$

La ecuación de la energía queda:

$$0.01307 k' + 0.00004228 N k' + 0.0000006 N k'^2 - .004875 N^2 = 0$$

La raíz positiva es:

$$k' = \frac{1}{6N} \left(-653500 - 2114N + 2\sqrt{(106765562500 + 690749500N + 1117249N^2 + 731250N^3)} \right)$$

para $N = 50$, $k' = 11093 \text{ tn/m}^2$

Con lo que $k = 5.56 * 11093 = 61677. \text{ tn/m}^2$

$$R_z = 11093 \frac{1}{50^2} = \frac{11093}{2500} = 4.4372 \text{ t / m}^2$$

$$R_f = 61677 \frac{.3}{50} = 370.06 \text{ t / m}^2$$

Podemos comparar estos valores con los dados considerados frecuentemente:

Guía de Cimentaciones de Carreteras:

$$R_f = 0.2 N \text{ tn/m}^2 = .2 * 50 = 10.0 \text{ tn/m}^2$$

$R_p = 20Nf \text{ tn/m}^2$ f es un coeficiente que depende del diámetro del pilote hincado, tomando un valor medio de 1 m
 $f = 1 - 1/3 = .666$

$$\text{con lo que } R_f = .666 * 20 * 50 = 666.0 \text{ tn/m}^2$$

ROM:

$$R_p = 20N \text{ tn/m}^2 = 20 * 50 = 1000 \text{ tn/m}^2$$

Por lo tanto vemos que los valores obtenidos de nuestra propuesta son más conservadores. ♦

Referencias:

- ROM. Ministerio de Fomento. Método de ensayo de penetración: A.S.I.M, 1568-667.
- Guía de cimentaciones de carreteras. Ministerio de Fomento.