

CONSIDERACIONES SOBRE LA ELECCIÓN DE COEFICIENTES DE BALASTO

CONSIDERATIONS REGARDING THE SELECTION OF COEFFICIENTS OF SUBGRADE REACTION

Fernando MUZÁS LABAD. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Profesor de Mecánica del Suelo ETSAM

fmuzasl@ciccp.es

RESUMEN: En la actualidad para el estudio de estructuras de manera conjunta con el terreno, es frecuente utilizar diversos programas de cálculo en ordenador que utilizan el modelo matemático de Winkler para definir el comportamiento del terreno. Los manuales que acompañan a estos programas se limitan a dar algunas recomendaciones para la elección del coeficiente de balasto, pero en general ignoran que este parámetro no es una constante que caracteriza al terreno y que su valor debe hacerse variar con la geometría y el tipo de problema objeto de estudio. En el presente artículo se hace una revisión de los conceptos y de las propuestas existentes en la bibliografía, dando recomendaciones y fórmulas de aplicación al respecto.

PALABRAS CLAVE: BALASTO, WINKLER, CIMENTACIONES, INTERACCIÓN ESTRUCTURA-TERRENO

SUMMARY: Actually for studying structures embedded in the ground, it is rather frequent to use calculation programs in computer, based in the mathematical model of Winkler, to simulate de soil comportment. The manuals illustrating the programs give some recommendations about the values of the subgrade reaction to be adopted, but generally it is ignored that this parameter is not a constant characteristic of the soil and that the value must be changed according to the geometry and the type of the problem studied. This paper revises de concept of subgrade reaction and the diverse proposals existing in the bibliography, to end with several recommendations and formulations about its use in particular problems.

KEYWORDS: SUBGRADE REACTION, WINKLER, FOUNDATIONS, SOIL-STRUCTURE INTERACTION

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Cuando se aborda el estudio de cimentaciones, o de estructuras embebidas en el terreno, es cada vez más frecuente utilizar programas de cálculo en ordenador, que utilizan el modelo matemático de Winkler (o del coeficiente de balasto), para definir el comportamiento del terreno. Los manuales que ilustran la utilización de estos programas suelen dar algunas recomendaciones para la elección del coeficiente de balasto, pero en general ignoran que este parámetro no es una constante característica del terreno y que su valor debe hacerse variar con la geometría y el tipo de problema objeto de estudio.

Recordaremos que, en el modelo de Winkler, el coeficiente de balasto k_s es un parámetro que se define como la relación entre la presión que actúa en un punto, p , y el asiento que se produce, y , es decir $k_s = p / y$. Este parámetro tiene la dimensión de un peso específico y, aunque depende de las propiedades del terreno, no es una constante del mismo ya que el asiento de una cimentación apoyada sobre un medio pseudo elástico, depende de las dimensiones del área cargada y existen grandes diferencias si se estudian estructuras verticales, según se verá más adelante.

La elección del coeficiente de balasto ha sido objeto de varias propuestas, sugeridas por diversos autores, los cuales, en general, parten del trabajo inicial de Karl Terzaghi que, bajo el título “**Evaluation of coefficients of subgrade reaction**”, fue publicado en la revista Geotechnique, en 1955. En este artículo, utilizando unidades anglosajonas, Terzaghi dio no sólo los coeficientes de reacción vertical, a utilizar en el estudio de vigas horizontales, sino también los coeficientes de reacción horizontal para el análisis de estructuras verticales, como pilotes, pantallas o tablestacas.

En 1964, el profesor J. Verdeyen, de la Universidad de Bruselas, dio una conferencia en Friburgo (Suiza) bajo el título “**L’application à la pratique des coefficients de raideur du sol**”, que luego se publicó en el Bulletin Technique de la Suisse Romande

(Lausana 9 de enero de 1965), en el que se expone la teoría de la viga flotante y se recogen las propuestas de Terzaghi sobre coeficientes de balasto, traducidas a unidades métricas.

Posteriormente, en 1972, en el V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, celebrado en Madrid, el Prof. B. B. Broms hizo una nueva recapitulación del tema en su Informe General de la Sesión III b, “**Stability of flexible Structures (Piles and Piles Groups)**”.

Terzaghi, para el estudio de cimentaciones, hizo dos propuestas, una para suelos arcillosos y otra para suelos arenosos, indicando, en cada caso, el valor $k_{s(1)}$ a utilizar con una placa cuadrada de lado igual a **(1 pie)**, para pasar luego a placas cuadradas de lado **(b)** y a cimentaciones rectangulares de dimensiones **(b x l)**. En los apartados siguientes, se resumen los puntos fundamentales de las propuestas originales, sustituyendo en la notación $k_{s(1)}$ por k_{30} en unidades métricas. Para placa cuadrada de lado **(b)** se adopta la notación k_b y para una cimentación rectangular de dimensiones **(b x l)** la notación $k_{b,l}$.

Para el estudio de elementos verticales, Terzaghi dio las oportunas recomendaciones considerando coeficientes de balasto en sentido horizontal, pero diferenciando dos casos: **i)** el estudio de pilotes o placas sometidos a cargas horizontales, definiendo el parámetro k_h , **ii)** el estudio de pantallas o tablestacas construidas para contener el terreno contiguo a una excavación, en cuyo caso definió el parámetro I_h .

Por la misma época, (1951, 1955), el profesor Rowe abordó el estudio de pantallas en suelos arenosos, suponiendo que la acción del terreno sobre la pantalla, en la zona de empuje pasivo, obedecía a una ley lineal caracterizada por un parámetro m similar a un coeficiente de balasto análogo al I_h de Terzaghi.

2. SUELOS ARCILLOSOS

2.1. Estructuras horizontales

Para el estudio de estructuras horizontales apoyadas sobre un suelo arcilloso, Terzaghi propuso un coeficiente de balasto $k_{s(1)}$, válido para la placa cuadrada de un pie de lado, en función de la consistencia de la arcilla, definida por la resistencia a compresión simple q_u , dando los siguientes valores medios:

	Tipo de arcilla	q_u (kg/cm²)	$k_{s(1)}$ kg/cm³
1	Arcillas consistentes	1 a 2	1,6 a 3,2
2	Arcillas muy consistentes	2 a 4	3,2 a 6,4
3	Arcillas duras	> 4	> 6,4

La propuesta original, expresada en unidades anglosajonas, establecía unos valores relacionados por la siguiente expresión.

$$k_{s(1)} \text{ (ton/pie}^3\text{)} = 50 q_u \text{ (ton/pie}^2\text{)}$$

Esta relación traducida a unidades métricas queda de la forma:

$$k_{30} \text{ (kg/cm}^3\text{)} = 1,645 q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

En arcillas, teniendo en cuenta que los asentamientos que experimenta una placa, son proporcionales al tamaño de la misma, Terzaghi indicó que el coeficiente de balasto a considerar debía ser inversamente proporcional al ancho de la placa, es decir:

$$\frac{k_b}{k_{30}} = \frac{1(\text{pie})}{b(\text{pies})} \approx \frac{0,30(\text{m})}{b(\text{m})}$$

Esta relación indica que el producto del coeficiente de balasto k_b por el ancho b resulta constante, con independencia del tamaño de la placa.

Este producto $k_b \cdot b$ se utiliza, a veces, con la denominación de **módulo de reacción del terreno**, E_s , y es un parámetro que tiene la dimensión de un módulo de elasticidad, al igual que la resistencia a compresión simple, q_u .

Sustituyendo valores y expresando los parámetros en unidades métricas, se verifica:

$$E_s \text{ (kg/cm}^2\text{)} = k_{30} \text{ (kg/cm}^3\text{)} \cdot 30,5 \text{ (cm)} = k_b \text{ (kg/cm}^3\text{)} \cdot b \text{ (cm)} \cong 50 \cdot q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Cambiando de unidades y pasando las fuerzas a toneladas (**t**) y la longitudes a metros (**m**), en el caso de una **placa cuadrada de lado b**, se puede escribir:

$$E_s \text{ (t/m}^2\text{)} = k_b \text{ (t/m}^3\text{)} \cdot b \text{ (m)} = 50 \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} \quad \text{o bien}$$

$$k_b \text{ (t/m}^3\text{)} = 50 \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} / b \text{ (m)}$$

La aplicación práctica de esta expresión permite calcular el asiento que experimenta una cimentación cuadrada de lado **b**, obteniendo como resultado:

$$s = \frac{p}{k_b} = \frac{p \cdot b}{50 \cdot q_u}$$

El asiento que una placa rígida de igual dimensión experimenta en un medio elástico, de características **E** y ν , viene dado por:

$$s = \frac{p \cdot b}{E} (1 - \nu^2) \cdot 0,88$$

Comparando estos dos últimos resultados de **s**, se observa que el coeficiente de balasto y la resistencia a compresión simple pueden relacionarse con el módulo de deformación del terreno. Suponiendo que la propuesta de Terzaghi corresponde a un comportamiento de la arcilla a largo plazo cabe admitir $\nu=0,3$ y deducir las relaciones:

$$k_b = 1,25 \cdot E$$

$$E = 40 \cdot q_u$$

En la bibliografía pueden encontrarse relaciones análogas entre el módulo de deformación y la compresión simple, pudiendo citar la del módulo de deformación a corto plazo $E_u = 250 \cdot q_u$, con $\nu=0,5$. Si se cumplen ambas relaciones, el asiento instantáneo equivaldría a 13% del asiento final.

Para el coeficiente de balasto $k_{b,l}$ a utilizar en **cimentaciones rectangulares de ancho b y de longitud l** , Terzaghi propuso la relación:

$$k_{b,l} = \frac{2}{3} k_b \cdot \left(1 + \frac{b}{2l} \right)$$

En esta ecuación $k_{b,l}$ y k_b se expresan en las mismas unidades, debiendo venir las longitudes b y l en la misma dimensión. Puede verse que cuando la longitud l es muy grande, el cociente $b/2.l$ tiende a cero y por tanto el coeficiente de balasto es igual al de la placa cuadrada de lado b dividido por 1,5.

Refundiendo todas las expresiones se obtiene:

$$E_s = k_{b,l} \cdot b = \frac{100}{3} \cdot q_u \cdot \left(1 + \frac{b}{2.l} \right)$$

En esta expresión pueden utilizarse cualquier tipo de unidades siempre que sean concordantes.

En cimentaciones rectangulares de ancho b y longitud l , el valor del coeficiente de balasto resulta:

$$k_{b,l} \text{ (t/m}^3\text{)} = \frac{100}{3} \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} \cdot \frac{1}{b\text{(m)}} \left(1 + \frac{b}{2.l} \right)$$

Si no se conoce el valor de q_u y en cambio se dispone del valor N obtenido en el ensayo de penetración estándar SPT, puede utilizarse, en primera aproximación, la relación dada por Terzaghi entre este parámetro y el valor de la resistencia a compresión simple:

$$q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)} = N / 8 \quad \text{o bien} \quad q_u \text{ (t/m}^2\text{)} = 1,25 N$$

Sustituyendo esta relación en las expresiones anteriores, se obtiene de manera aproximada:

En cimentaciones rectangulares de ancho b y longitud l

$$E_s \text{ (t/m}^2\text{)} = k_{b,l} \cdot b \cong 40 \cdot N \cdot \left(1 + \frac{b}{2 \cdot l}\right)$$

$$k_{b,l} \text{ (t/m}^3\text{)} = 40 \cdot N \cdot \frac{1}{b \text{ (m)}} \left(1 + \frac{b}{2 \cdot l}\right)$$

2.2. Estructuras verticales

Terzaghi propuso análogamente un coeficiente de balasto horizontal k_h , dando expresiones similares a las anteriores para el coeficiente de balasto en sentido vertical. En este caso hizo un análisis distinto según se tratara de placas o pilotes verticales o de pantallas y tablestacas, que en esencia consiste en la distinta manera de medir las dimensiones de la pieza que se esté estudiando.

Pilotes sometidos a cargas transversales

En este caso el ancho b se mide en sentido horizontal y la longitud l en sentido vertical. Dado que, en general, $l \gg b$ resulta que el cociente $b/l \approx 0$ y en consecuencia se obtienen las relaciones siguientes:

$$E_s \text{ (t/m}^2\text{)} = k_h \cdot b = \frac{100}{3} \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} \cong 40 \cdot N$$

El coeficiente de balasto resulta:

$$k_n \text{ (t/m}^3\text{)} = \frac{100}{3} \cdot \frac{1}{b\text{(m)}} \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} = \frac{40 \cdot N}{b\text{(m)}}$$

Pantallas o tablestacas

En este caso Terzaghi analizó pantallas estudiadas por el método que se conoce como de “base libre”, proponiendo para el coeficiente de balasto de la zona que queda empotrada en el terreno, los valores anteriores, pero indicando, mediante razonamientos sobre la geometría del fenómeno, que los valores debían ser inversamente proporcionales a **2D**, siendo **D** la profundidad de empotramiento, si bien finalmente, debido a la falta de terreno por encima del fondo de la excavación, propuso el valor **3D**.

La otra dimensión de la placa se mide en sentido horizontal, de manera que como generalmente $I \gg 2.D$, el coeficiente de balasto debe dividirse por 1,5, al igual que en el caso de los pilotes.

En consecuencia, pueden deducirse las expresiones siguientes en función de la profundidad **D**, que corresponde al empotramiento de la pantalla en el terreno:

$$k_n \text{ (t/m}^3\text{)} = \frac{100}{9 \cdot D\text{(m)}} \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} \cong \frac{40}{3 \cdot D\text{(m)}} \cdot N$$

En el caso de que la pantalla se estudie por el método que se conoce como de “base empotrada”, el valor de **D** puede ser menor que el real de empotramiento en el terreno, ya que la parte inferior de la pantalla se mueve en sentido contrario y sólo habría que considerar la zona real en la que actúa el empuje pasivo.

La aplicación de esta propuesta a un caso concreto, permite evaluar el desplazamiento horizontal necesario de una pantalla de profundidad **D**, para que se desarrolle el empuje pasivo de Rankine.

Suponiendo que el empuje debido al peso del terreno se encuentra equilibrado a ambos lados de la pantalla (ya que los coeficientes de empuje $K_a = K_p = 1$, cuando $\varphi_u = 0$), el desplazamiento horizontal δ hará aparecer en un lado nuevos empujes pasivos iguales a q_u , mientras que en el lado opuesto disminuirán en la misma cantidad. Según esto puede establecerse la siguiente relación:

$$\delta = \frac{p}{k_h} = \frac{2 \cdot q_u \cdot 9 \cdot D}{100 \cdot q_u} = 0,18 \cdot D$$

Este resultado puede considerarse excesivo, de acuerdo con los datos recogidos en la bibliografía, por lo que cabe considerar, al igual que hacen otros autores, que la propuesta de Terzaghi resulta excesivamente conservadora.

En consecuencia parece que podrían adoptarse los valores propuestos para el estudio de los pilotes, cambiando la anchura **d** por la profundidad **D**, resultando los valores dados por la expresión:

$$k_h \text{ (t/m}^3\text{)} = \frac{100}{3 \cdot D\text{(m)}} \cdot q_u \text{ (t/m}^2\text{)} \cong \frac{40}{D\text{(m)}} \cdot N$$

Con esta modificación el desplazamiento necesario sería $\delta = 0,06 D$, valor que parece más razonable y concordante con los valores del desplazamiento recogidos en la bibliografía.

3. SUELOS ARENOSOS

3.1. Estructuras horizontales

En el caso de las arenas Terzaghi propuso, para la placa de **(1 pie x 1 pie)**, unos valores de $k_{s(1)}$ en función de la compacidad del material, dando los siguientes valores medios para arena seca o húmeda:

	Tipo de arena	$k_{s(1)}$ kg/cm³
1	Arena floja	1,28
2	Arena media	4,15
3	Arena densa	15,97

Para arena sumergida los valores debían reducirse al 60%.

En realidad la propuesta era más amplia ya que se indicaba un rango de valores para cada tipo de arena. Teniendo en cuenta, además, la definición de la compacidad de la arena, la propuesta puede resumirse según se recoge en el cuadro siguiente:

	Tipo de arena	N golpes/30 cm	$k_{s(1)}$ kg/cm³
1	Arena floja	< 10	0,64 a 1,92
2	Arena media	10 a 30	1,92 a 9,58
3	Arena densa	30 a 50	9,58 a 31,95
4	Arena muy densa	> 50	> 31,95

Partiendo de estos valores se ha podido observar que el logaritmo del coeficiente de balasto sigue una ley sensiblemente lineal con el valor de N, y que de manera aproximada se verifican las relaciones siguientes:

Arena seca o húmeda

$$k_{30} \text{ (kg / cm}^3\text{)} = 10^{\frac{N+2}{34}}$$

Arena sumergida

$$k_{30} \text{ (kg / cm}^3\text{)} = 0,6 \cdot 10^{\frac{N+2}{34}}$$

Puede comprobarse que esta variación, según potencias de 10, coincide en líneas generales con la propuesta de Rowe para el estudio de pantallas, cuyo exponente puede ser $m = (N-13)/32$, para el coeficiente de balasto expresado en kg/cm^3 .

Según Terzaghi la experiencia había constatado que el coeficiente de balasto de una **viga de 1 pie de ancho** era aproximadamente igual al de una **placa cuadrada de 1 pie de lado** ya que la carga aplicada a lo largo de la longitud de la pieza tiene una influencia despreciable de unos puntos a otros. En todo caso si se utilizara la misma expresión que la dada en arcillas para cimentaciones rectangulares, el coeficiente de balasto en el caso extremo de viga muy larga se dividiría por 1,5.

En **cimentaciones cuadradas de lado b, o vigas de lado b**, el coeficiente de balasto a utilizar se determina, según la propuesta de Terzaghi, por la expresión:

$$k_b = k_{30} \left(\frac{b(m) + 0,3(m)}{2 \cdot b(m)} \right)^2$$

Sustituyendo esta relación en las expresiones anteriores y cambiando las unidades de los parámetros se obtienen, en cada caso, las expresiones que se indican a continuación.

Placa cuadrada o viga apoyada en arena seca o húmeda:

$$k_{b,l} \text{ (t/m}^2\text{)} = 1000 \cdot 10^{\left(\frac{N+2}{34}\right)} \cdot \left(\frac{b(m)+0,3}{2 \cdot b(m)}\right)^2$$

Placa cuadrada o viga apoyada en arena sumergida:

$$k_{b,l} \text{ (t/m}^2\text{)} = 600 \cdot 10^{\left(\frac{N+2}{34}\right)} \cdot \left(\frac{b(m)+0,3}{2 \cdot b(m)}\right)^2$$

3.2. Estructuras verticales

Para las arenas todos los autores admiten que el coeficiente de reacción horizontal aumenta con la profundidad, según una relación parabólica, exponencial o lineal. Terzaghi, al igual que en el caso de las arcillas diferenció el estudio de pilotes o placas sometidos a cargas transversales del correspondiente a pantallas y tablestacas.

Pilotes sometidos a cargas transversales

En este caso, Terzaghi admitió una variación lineal del coeficiente de balasto, de

$$k_h = n_h \cdot \frac{z}{b}$$

acuerdo con la siguiente expresión:

En esta fórmula, la notación es la siguiente:

- z** es la profundidad del punto donde se evalúa k_h
- b** es la anchura de la placa vertical considerada
- n_h es un coeficiente de reacción horizontal, igual al coeficiente de balasto a la profundidad $z=b$

Los valores propuestos por Terzaghi para el parámetro n_h , en el caso de arena seca o húmeda, fueron los siguientes:

	Tipo de arena	n_h kg/cm ³
1	Arena floja	0,22
2	Arena media	0,67
3	Arena densa	1,79

Al igual que en el caso anterior, para **arena sumergida** Terzaghi recomendaba valores iguales al 60%.

Terzaghi estableció esos valores en función del peso específico de la arena multiplicada por una constante variable según su compacidad. Puede comprobarse que los valores anteriores del coeficiente de balasto horizontal k_h , a la profundidad $z=b$, oscilan entre el 17% y el 11% de los valores propuestos como coeficiente de balasto vertical, $k_{s(1)}$, para la placa cuadrada horizontal de 1 pie de lado.

En consecuencia, relacionando el valor de n_h con la resistencia a la penetración estándar N , obtenida en el SPT, y pasando todo a unidades métricas, se pueden establecer las relaciones siguientes, similares a las anteriores:

Pilotes o placas verticales en arena seca o húmeda

$$k_h (t/m^3) = n_h \cdot \frac{z}{b} = 1000 \cdot 10^{\frac{N-28}{40}} \cdot \frac{z}{b}$$

Para pilotes o placas verticales en arena sumergida

$$k_h(t/m^3) = n_h \cdot \frac{z}{b} = 600 \cdot 10^{\frac{N-28}{40}} \cdot \frac{z}{b}$$

Pantallas o tablestacas

En el caso de pantallas instaladas en arena y estudiadas por el método de “base libre”, Terzaghi admitió una variación lineal del coeficiente de balasto, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$k_h = I_h \cdot \frac{z}{D}$$

En esta fórmula:

- z** es la profundidad del punto donde se evalúa k_h
- D** la altura de empotramiento de la pantalla bajo la excavación
- I_h** un coeficiente de reacción horizontal, igual al coeficiente de balasto a la profundidad $z=D$

Los valores propuestos por Terzaghi para el parámetro I_h , en el caso de arena seca o húmeda, fueron los siguientes:

	Tipo de arena	I_h kg/cm³
1	Arena floja	0,08
2	Arena media	0,26
3	Arena densa	0,64

Al igual que en otros casos, para arena sumergida Terzaghi recomendaba valores iguales al 60%.

En consecuencia, relacionando el valor de I_h con la resistencia a la penetración estándar N , obtenida en el SPT, y pasando todo a unidades métricas, se pueden establecer las relaciones siguientes entre el coeficiente de balasto k_h y la resistencia a la penetración estándar N , obtenida en el SPT:

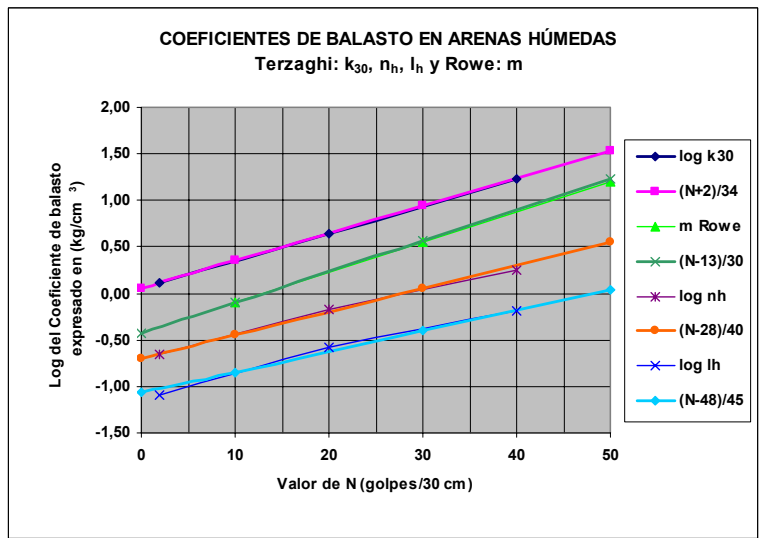
Pantallas en arena seca o húmeda

$$k_h (t/m^3) = I_h \cdot \frac{Z}{D} = 1000 \cdot 10^{\frac{N-48}{45}} \cdot \frac{Z}{D}$$

Para pantallas en arena sumergida

$$k_h (t/m^3) = I_h \cdot \frac{Z}{D} = 600 \cdot 10^{\frac{N-48}{45}} \cdot \frac{Z}{D}$$

En la figura adjunta pueden observarse las distintas correlaciones entre los coeficientes de balasto propuestos por Terzaghi con el valor de N y la aproximación de las fórmulas elaboradas y recogidas en la presente nota.



Al igual que se hizo anteriormente con las arcillas para las estructuras verticales, se ha realizado una estimación del movimiento horizontal δ que es preciso realizar para que se produzca una presión equivalente al empuje pasivo de Rankine en la pantalla de empotramiento **D**. Para ello ha sido necesario relacionar el ángulo de rozamiento interno con los valores de N para lo cual, después de consultar la bibliografía, se ha adoptado la relación siguiente: **$\text{tag}(\varphi) = 0,5 + N/150$** .

Igualmente se ha considerado necesario estimar el peso específico del material adoptando los valores siguientes:

N golpes/30 cm	Peso específico t/m³
10	1,3
20	1,5
30	1,7
40	1,9
50	2,1

Los resultados obtenidos al establecer la igualdad de presiones son los siguientes:

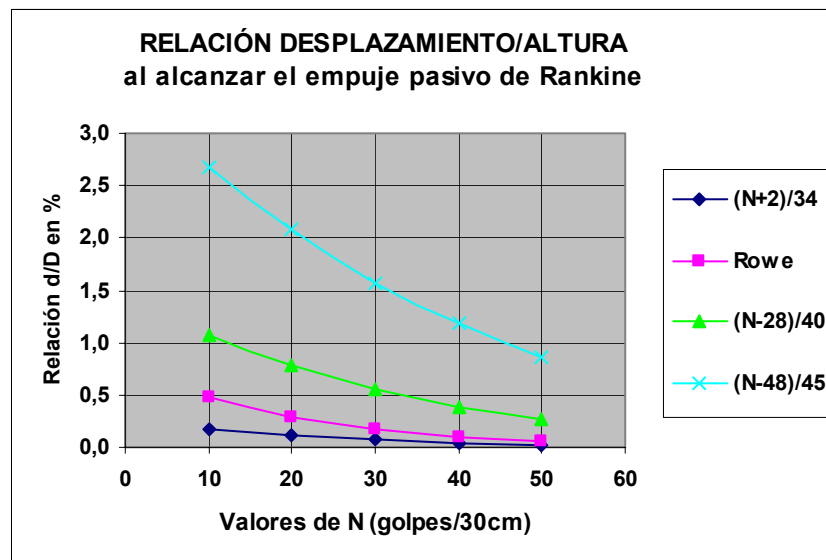
RELACIÓN δ/D ENTRE EL DESPLAZAMIENTO Y LA ALTURA EN %

N golpes/30 cm	Terzaghi $K_h = K_b$ (t/m3)	Rowe K_h (t/m3)	Terzaghi n_h (t/m3)	Terzaghi l_h (t/m3)
	$10^{(N+2)/34}$	$10^{(N-13)/32}$	$10^{(N-28)/40}$	$10^{(N-48)/45}$
10	0,170	0,482	1,079	2,676
20	0,112	0,289	0,785	2,075
30	0,072	0,170	0,559	1,575
40	0,045	0,098	0,391	1,175
50	0,028	0,056	0,270	0,864

Estos valores indican, tal como señalaron en su día algunos autores, que la propuesta de Terzaghi del parámetro I_h para el estudio de pantallas resulta excesivamente conservadora ya que los valores δ/D generalmente admitidos, para que se desarrolle el empuje pasivo, suelen oscilar, en arenas, entre el 2 y el 6 por mil de la altura, si bien en algún caso se ha llegado a alcanzar el 3%.

Igualmente al efectuar el cálculo se comprende la reducción propuesta por Terzaghi al 60% para arena sumergida, ya que disminuye el peso específico del material al tener que considerar pesos específicos sumergidos.

En la figura adjunta se representan los resultados anteriores:



Parece, en consecuencia, que son más adecuados los valores propuestos por Terzaghi para el estudio de pilotes, los cuales se encuentran más próximos de los de Rowe que, por el contrario, pueden considerarse algo elevados y próximos a los de Terzaghi para estructuras horizontales.

En el cuadro adjunto se recoge un resumen de los valores que se obtienen con las distintas propuestas de Terzaghi y de Rowe lo cual facilita la comparación.

VALORES DEL COEFICIENTE DE BALASTO EN t/m³

N	Rowe	Terzaghi		
		(N+2)/34	(N-28)/40	(N-48)/45
Golpes/30 cm	(N-13)/30			
10	794,3	2.253,9	354,8	143,1
20	1.711,3	4.436,7	631,0	238,7
30	3.686,9	8.733,3	1.122,0	398,1
40	7.943,3	17.190,7	1.995,3	664,1
50	17.113,3	33.838,6	3.548,1	1.107,8

4. SUELOS INTERMEDIOS Y TENDENCIAS ACTUALES

Para el estudio de pilotes y pantallas en suelos intermedios, caracterizados por un ángulo de rozamiento y una cohesión distintos de cero, el coeficiente de balasto a considerar parece que debe ser de tipo trapezoidal, como combinación de los criterios de arcilla y arena, siendo conveniente analizar en cada caso la deformación horizontal que se precisa para alcanzar el empuje pasivo. Debe señalarse que este empuje no tiene por qué ser el de Rankine ya que en el caso de una pantalla, debido al movimiento relativo del terreno respecto a la misma, el valor se aproxima al de Caquot con $\delta = 2/3 \varphi$.

Actualmente, para adoptar el coeficiente de balasto en un caso concreto, se tiende a establecer relaciones con el módulo de deformación del terreno, lo cual equivale a adoptar unos parámetros ficticios que relacionan la presión y la deformación que se produce en casos sencillos. El módulo de deformación, aun no correspondiendo exactamente al comportamiento del terreno, por no ser perfectamente elástico, sí constituye un parámetro más o menos constante, cuya estimación puede hacerse sin cometer grandes errores.

Hoy día, en que se dispone de diversos métodos de cálculo por elementos finitos para estudiar problemas de interacción de estructuras con el terreno, resulta relativamente

fácil estudiar problemas sencillos, similares a los que se deben estudiar (cimentación horizontal, pilotes o pantallas) de manera que de los resultados y de la relación entre las tensiones y los corrimientos observados se pueda deducir, con mejor conocimiento de causa, el valor o los valores que conviene adoptar para el coeficiente de balasto, en cada caso concreto, e incluso su variación de un punto a otro.

BIBLIOGRAFÍA

- Broms, B.B. (1972): *Stability of flexible Structures (Piles and Piles Groups)*. (V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones. Sesión III b, (Madrid)
- Rowe, P.W. (1951): *Cantilever sheet piling in cohesionless soil*. (Engineering).
- Rowe, P.W. (1951): *A theoretical and experimental analysis of sheet-pile walls*. (Proc. I.C.E).
- Terzaghi, K. (1955): *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. (Geotechnique).
- Verdeyen, J. (1964): *L'application à la pratique des coefficients de raideur du sol*. (Bulletin Technique de la Suisse Romande).