

EMPUJES SOBRE ELEMENTOS DE CONTENCION INDUCIDOS POR COMPACTACION DE RELLENOS

Pedro ORTIGOSA*

Milton MEZA**

RESUMEN

Las presiones laterales sobre elementos de contención, al existir compactación de rellenos detrás de ellos, resultan mayores a las supuestas por las teorías clásicas de empujes de tierra. Para abordar el problema se hace una recopilación de experiencias de laboratorio y terreno en las cuales se midieron las presiones laterales generadas por el proceso de compactación. Paralelamente se analizan métodos propuestos por diferentes investigadores para predecir dichas presiones, comparando sus resultados con los valores obtenidos experimentalmente.

Se concluye que el método de Broms es el más adecuado para predecir las presiones por compactación en muros rígidos y flexibles. Se demuestra además que la altura del muro, el peso del equipo de compactación y la orientación del tambor del rodillo con respecto al elemento de contención son factores relevantes en las presiones inducidas.

INTRODUCCION

Las teorías clásicas de empujes de tierra suponen que éstos se desarrollan por

* Investigador del IDIEM, Universidad de Chile.

** Alumno memorista, Sección Mecánica de Suelos del IDIEM.

la acción de un suelo inalterado o colocado en forma suelta contra un elemento de contención. Sin embargo, cuando un relleno requiere ser compactado en contra de una estructura de contención, las presiones laterales de tierra resultantes no coinciden con las obtenidas por dichas teorías. Terzaghi¹ observó que las presiones laterales de tierra después de colocar el relleno y antes que el muro se desplazara dependían del método de compactación; Sowers y otros² encontraron que las presiones laterales después de compactar el relleno excedían a las desarrolladas por el mismo suelo en estado suelto; Gould³ propuso que las presiones en reposo eran un punto de partida para la evaluación de las presiones de tierra producidas por un relleno compactado; Casagrande⁴ cita resultados de medidas de terreno que indican que, incluso para una compactación liviana, se originan presiones laterales mayores a las del estado activo.

El objeto del presente trabajo es reseñar brevemente algunas experiencias de laboratorio y de terreno destinadas a esclarecer la problemática planteada y establecer un método para predecir el orden de magnitud de las presiones sobre elementos de contención, inducidas por compactación de rellenos. Así mismo, se trata de definir los parámetros más importantes que intervienen en el problema de modo de especificar medidas constructivas orientadas a la reducción de dichas presiones. Todo lo anterior, considerando que los empujes por compactación son sólo una de las múltiples variables envueltas en el problema de predecir presiones sobre elementos de contención y teniendo en cuenta que no siempre es posible precisar con una adecuada exactitud los parámetros del suelo que intervienen.

INVESTIGACIONES SOBRE ESFUERZOS LATERALES POR COMPACTACION

Mediciones de laboratorio

Sowers y otros² efectuaron mediciones de presiones laterales sobre las paredes de un molde tipo proctor de paredes rígidas empleando una arcilla limo arenosa y diferentes clases de arenas. El suelo se colocó en capas con distintos contenidos de humedad y utilizando compactación estática y de impacto. En la arcilla, la presión lateral disminuyó al aumentar el contenido de humedad de compactación decayendo rápidamente al acercarse al contenido de humedad óptimo. A su vez, la compactación por impacto produjo presiones menores que la compactación estática para una densidad seca dada, obteniéndose una relación aproximadamente lineal entre la presión lateral y el esfuerzo de compactación dinámico. Para las arenas las presiones fueron muy inferiores a las registradas para la arcilla.

Sherif y Mackey⁵ analizaron el efecto de una carga lineal cíclica de 0.14 t/m actuando en la superficie de un relleno de arena uniforme compactada a una densidad relativa de 90%. Para tal efecto la arena se alojó en un estanque de

paredes rígidas con una altura H de 50 cm. El empuje debido al primer ciclo de carga aplicada a una distancia de la pared del estanque igual a $0.19H$ aumentó el empuje inicial en 22%, porcentaje que creció a un 62% al cabo de 100 ciclos. Para distancias mayores el efecto del ciclaje disminuyó exponencialmente siendo prácticamente nulo a $0.8H$.

Mediciones en terreno

Sowers y otros² efectuaron mediciones en arena y arcilla alojadas en zanjas revestidas de hormigón con un ancho de 1.5 m y alturas variables entre 1.2 y 1.8 m. Los resultados se muestran en las Figs. 1 y 2, observándose que las

presiones laterales para un suelo compactado sobrepasan en gran medida las registradas para el mismo suelo en estado suelto y pueden resultar considerablemente mayores a las presiones en reposo. El efecto de deflexiones en el muro se tradujo en una disminución de la presión por compactación, hecho que se aprecia en la Fig. 1 en donde se produjo, a media altura, una disminución de presión originada por una deflexión lateral del muro en esa zona.

Coyle y Bartoskewitz⁶ presentan el resultado de medidas de presión y desplazamiento tomadas en un muro cantilever de hormigón armado de

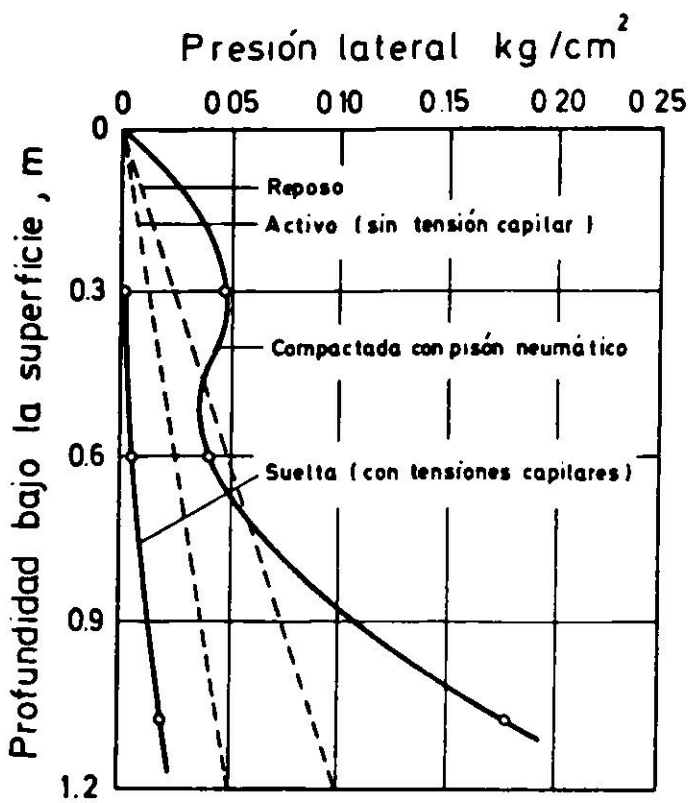


Fig. 1. Presión lateral para arena de río con 14% de humedad colocada en forma suelta y compactada en capas de 10 cm (Sowers y otros²).

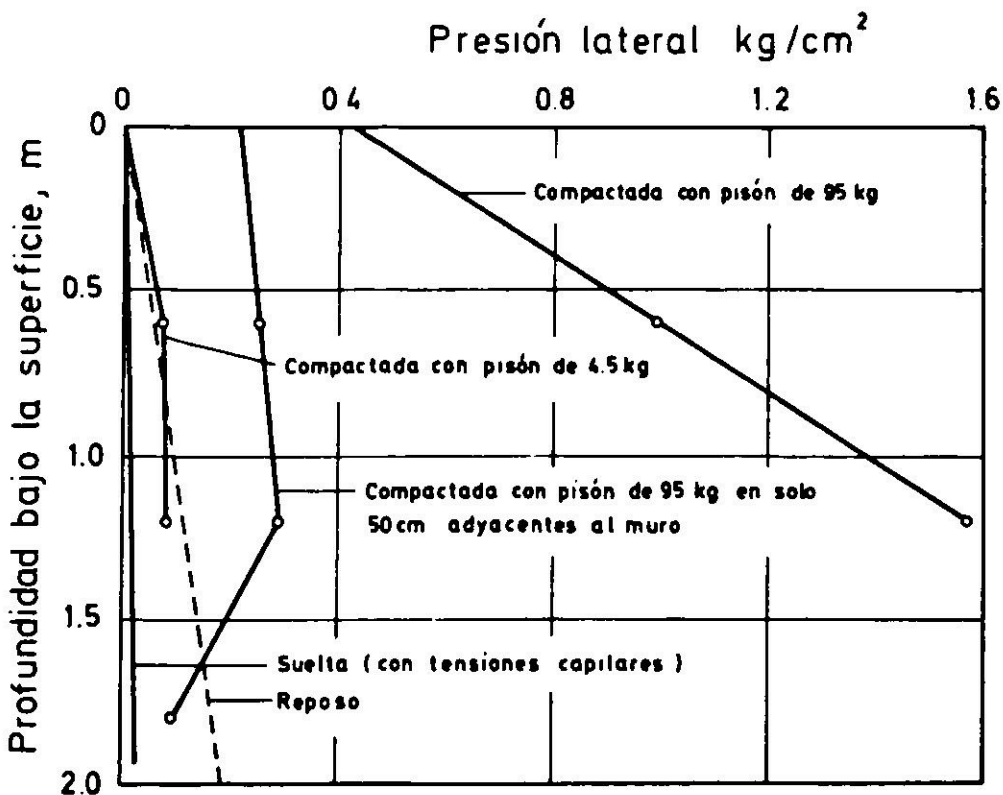


Fig. 2. Presión lateral para arcilla limo arenosa con 0.8 Wopt colocada en forma suelta y compactada en capas de 10 cm (Sowers y otros²).

5.6 m de altura apoyado sobre pilotes metálicos de sección doble T. El suelo utilizado correspondió a una arena fina compactada con equipo liviano*. Si bien los empujes tienden a ser superiores al empuje en reposo, es difícil interpretar los resultados debido a problemas de saturación del suelo durante el proceso de colocación del relleno.

Rehman y Broms⁷ utilizaron una arena gravosa y una arena fina limosa compactadas en contra de un muro rígido de hormigón armado de 6 m de longitud y 2.5 m de alto, cuya rotación en la base podía regularse a voluntad. En algunos ensayos el paramento del muro adyacente al relleno fue cubierto con una capa de asfalto de 5 cm de espesor cuyo efecto en la reducción de empujes fue prácticamente nulo. Para la compactación se utilizó una plancha vibradora de 140 kg sobre capas de 20 cm de espesor suelto y una de 400 kg sobre capas de 20 y 40 cm. En todos los casos la humedad de compactación osciló entre 2 - 4% y se dieron cuatro pasadas por capa. En la gran mayoría de los ensayos se produjeron pequeñas rotaciones del muro, que dieron origen a disminuciones de presión como así mismo a una redistribución de ellas a lo largo de la altura del muro. No obstante, los resultados obtenidos son de gran utilidad y se compararán más adelante con los valores obtenidos por diferentes métodos de predicción de empujes por compactación.

Broms e Ingelson⁸ llevaron a cabo mediciones de presión y desplazamientos en el muro frontal de los estribos de un puente con alturas de relleno H del orden de 3 m. El material de relleno consistió en arena uniforme con algo de grava colocada en capas de 50 cm que se compactaron con una humedad de 5.5% y 10 pasadas de rodillo vibratorio de 3.8 ton, salvo una faja adyacente al muro que fue compactada con un equipo vibratorio de 300 kg**. Después de compactado el relleno su peso unitario promedio γ fue de 1.76 ton/m³ y su ángulo de fricción interna ϕ de 33°. En la Fig. 3 se ilustran los coeficientes de presión, K , y desplazamientos laterales del muro, Δ , una vez completado el relleno. A pesar de que Δ_{max}/H varió entre 0.3% (estribo oeste) y 0,45% (estribo este), en gran parte de la altura del muro los empujes fueron bastante superiores al caso en reposo***. Esta situación podría explicarse si se considera que tales desplazamientos se fueron generando a medida que el relleno progresaba, situación muy diferente a compactar en contra de un muro rígido apuntalado que se suelta solamente una vez finalizado el relleno.

* No se dan sus características ni el método empleado para compactar.

** Los autores no aclaran el ancho de faja compactada con el equipo de 300 kg.

*** En general desplazamientos Δ/H del orden del 1% son suficientes para alcanzar el estado activo en suelos granulares densos.

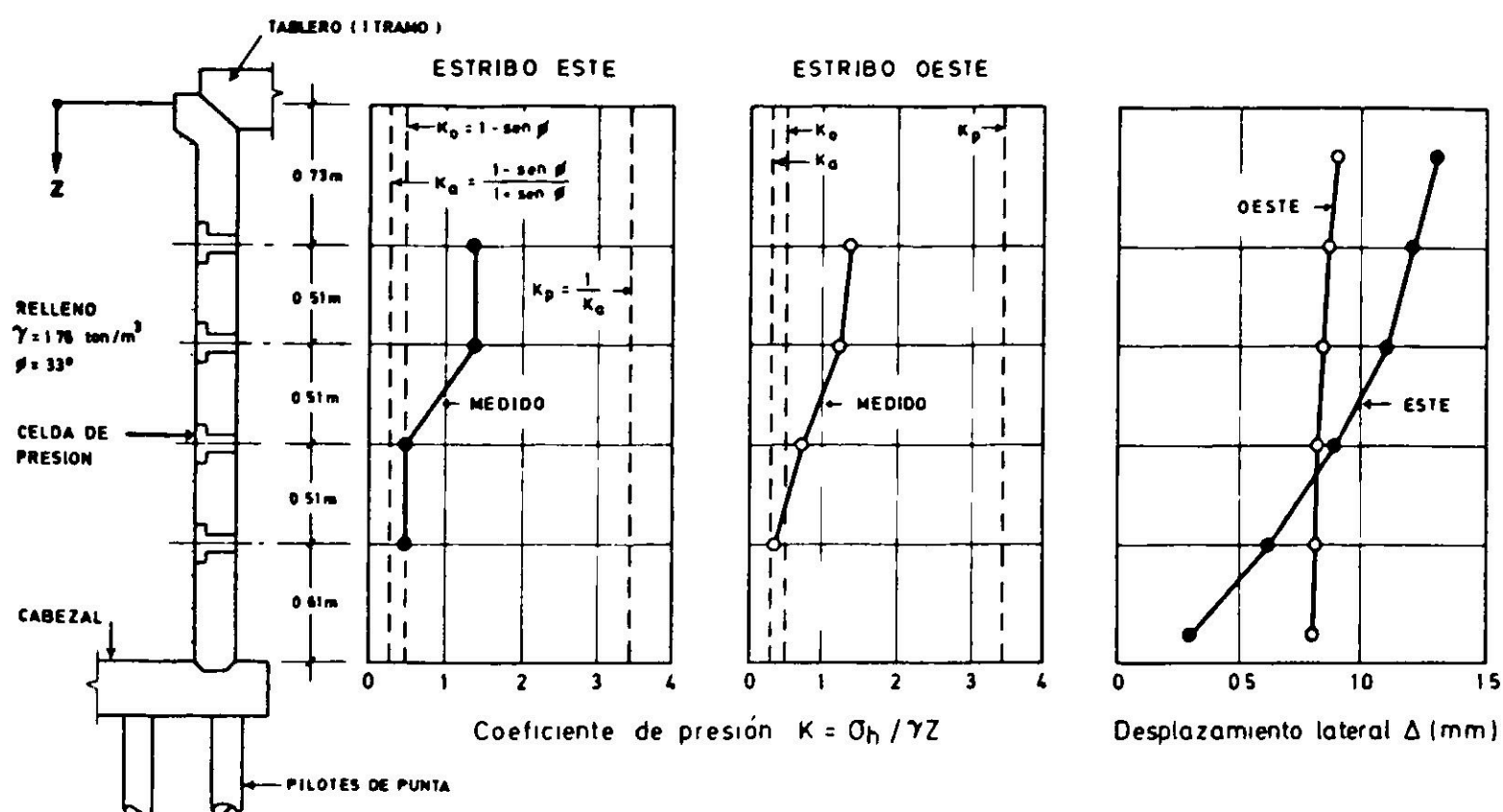


Fig. 3. Coeficiente de presión, K , y desplazamiento lateral del muro con respecto al cabezal, Δ (Broms e Ingelson⁸).

MÉTODOS PARA PREDECIR EMPUJES POR COMPACTACION

Pantallas rígidas sin deformación lateral

Schimdt⁹ propone determinar un coeficiente de presión por compactación K_c para suelos arenosos cuya expresión es de la forma:

$$K_c = K_o \left(\frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma_{vo}} \right)^h \quad 1$$

en que σ_{vo} = presión vertical geostática a la profundidad Z bajo la superficie del relleno ($\sigma_{vo} = \gamma Z$, en que γ corresponde al peso unitario del relleno compactado); K_o = coeficiente de presión lateral en reposo; $\Delta\sigma_v$ = incremento de presión vertical inducido a la profundidad Z por el paso del equipo de compactación y h = coeficiente que varía entre 0.3 y 0.5 dependiendo del tipo de arena.

La presión lateral resultante después de compactado el relleno queda expresada como:

$$\sigma_h = K_c \sigma_{vo} = K_o \sigma_{vo} \left(\frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma_{vo}} \right)^h \quad 2$$

El incremento $\Delta\sigma_v$ se propone estimarlo considerando al rodillo como una carga lineal de longitud infinita aplicada sobre un medio elástico. La intensidad de dicha carga se expresa como $p = CW/L$ en que W es el peso estático del rodillo,

L la longitud del tambor y C un coeficiente cuyo valor depende de si se trata de un equipo estático ($C = 1$) o vibratorio ($C = 2$ a 3). De acuerdo a lo anterior se tiene:

$$\Delta\sigma_v = \frac{2p}{\pi Z} = \frac{2CW}{\pi LZ} \quad 3$$

Los valores de $\Delta\sigma_v$ en profundidad obtenidos con la relación (3) muestran una buena concordancia con los valores medidos por Whiffin¹⁰ para rodillos de 2.3 y 8 ton que operan en régimen estático ($C = 1$). En relación al valor de C para rodillos que operan en régimen vibratorio, las mediciones efectuadas por Whiffin y por D' Appolonia y otros¹¹ indican que dicho coeficiente puede variar entre 2 y 3, es decir, debe duplicarse o triplicarse el peso estático del rodillo.

Reemplazando en la ecuación (2) los términos $\sigma_{vo} = \gamma Z$ y $\Delta\sigma_v = 2CW/\pi LZ$, se llega finalmente a la siguiente expresión válida para rodillos:

$$\sigma_h = K_o \gamma Z \left(1 + \frac{2CW}{\pi \gamma LZ^2} \right)^h \quad 4$$

con $C = 1$ para rodillos estáticos y $C = 2$ para rodillos vibratorios. El hecho de utilizar $C = 2$ o $C = 3$ para rodillos vibratorios no implica cambios substanciales en σ_h ya que el exponente h normalmente se considera igual a 0.40.

Para el caso de planchas vibratoras estas se pueden asimilar a cargas puntuales $P = 2W$ en que W representa el peso estático de la plancha. De acuerdo a relaciones basadas en la teoría de la elasticidad, el incremento $\Delta\sigma_v$ para cargas puntuales que actúan en la superficie de un medio elástico queda dado por:

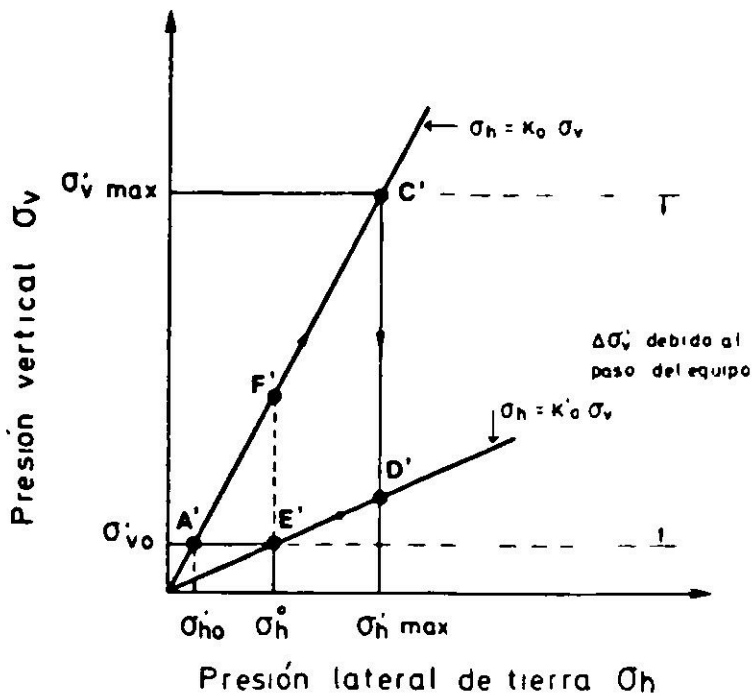
$$\Delta\sigma_v = \frac{3P}{2\pi Z^2} \quad 5$$

con lo cual la relación (4) se transforma en la siguiente expresión, válida para planchas vibratoras:

$$\sigma_h = K_o \gamma Z \left(1 + \frac{3W}{\pi \gamma Z^3} \right)^h \quad 6$$

En contraposición al método formulado por Schimdt, que no considera en forma explícita el proceso de carga-descarga inducido en el relleno por el paso del equipo compactador, Broms¹² propone un procedimiento para tomar en cuenta este hecho. En la Fig. 4a se ilustra la variación de la presión lateral para un elemento de suelo ubicado a una profundidad Z bajo la superficie del relleno, el cual, para efectos del presente análisis, se considera materializado por una sola capa de espesor infinito. Se supone que Z es menor que Z_{cr} (el significado de Z_{cr} se discute más adelante). Antes de que se proceda a la primera pasada del

1ª PASADA A' C' D' E'
RESTOS PASADAS E' F' C' D' E'



1ª PASADA A'' C'' E''
RESTOS PASADAS E'' C'' E''

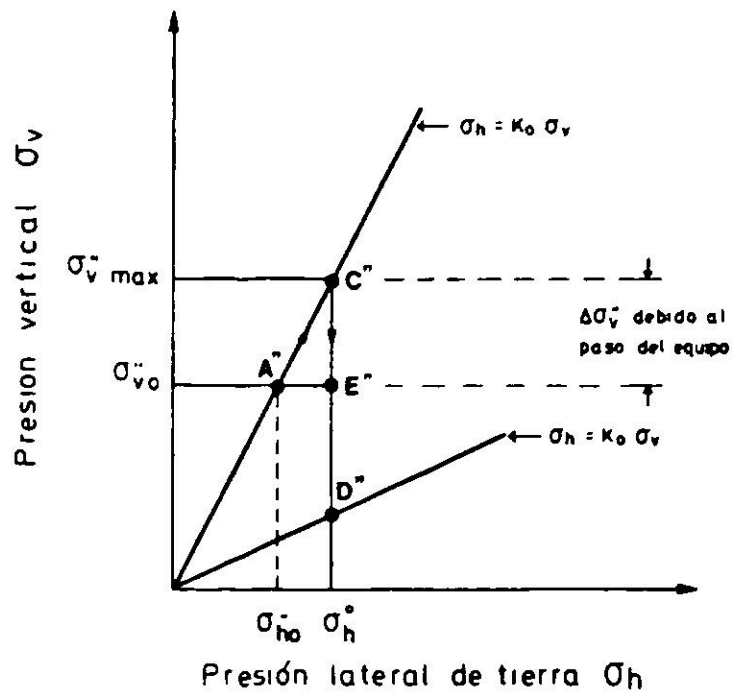


Fig. 4a. Simplificación presiones de tierra durante la compactación en elementos de contención rígidos para $Z \leq Z_{cr}$ (Broms¹²).

Fig. 4b. Simplificación presiones de tierra durante la compactación en elementos de contención rígidos para $Z > Z_{cr}$ (Broms¹²).

equipo la presión de tierras corresponde a la señalada por el punto A'. Al efectuar la primera pasada, la presión vertical en el relleno aumentará a $\sigma'_{v\text{máx}} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$ en que $\Delta\sigma'_v$ se estima con las relaciones (3) o (5) según se trate de un rodillo o una plancha. Si se retira el equipo de compactación, la presión vertical y horizontal disminuirán. De acuerdo a ensayos efectuados por Broms en arenas, la disminución de la presión lateral puede considerarse nula entre C' y D' hasta que σ_v se hace menor que $(K_o \sigma'_{v\text{máx}}) / K'_o$. Entre D' y E' la presión lateral σ_h disminuye de acuerdo a la relación $\sigma_h = K'_o \sigma_v$ en que K'_o corresponde a un coeficiente en reposo para descarga. En esta forma la presión lateral remanente σ_h^0 al cabo de la 1ª pasada del equipo resulta igual a $K'_o \sigma'_{v0} = K'_o \gamma Z$. Para las pasadas siguientes no se consideran cambios significativos en σ_h^0 quedando un ciclo de presiones representado por la trayectoria cerrada E' F' C' D' E'.

En la Fig. 4b se muestra la variación de la presión lateral para un elemento de suelo a una profundidad $Z > Z_{cr}$. En este caso el punto D'' no será alcanzado durante la descarga y la presión lateral remanente σ_h^0 será igual a :

$$K_o \sigma'_{v\text{máx}} = K_o (\sigma''_{v0} + \Delta\sigma''_v).$$

La Fig. 5 ilustra la variación en profundidad de la presión de tierra. En dicha figura la línea 1-3 representa la variación de la presión lateral máxima $K_o \sigma_{v\text{máx}}$ en que $\sigma_{v\text{máx}}$ es igual a la suma de la presión debida al peso del relleno más el incremento de presión vertical debido al paso del equipo. De

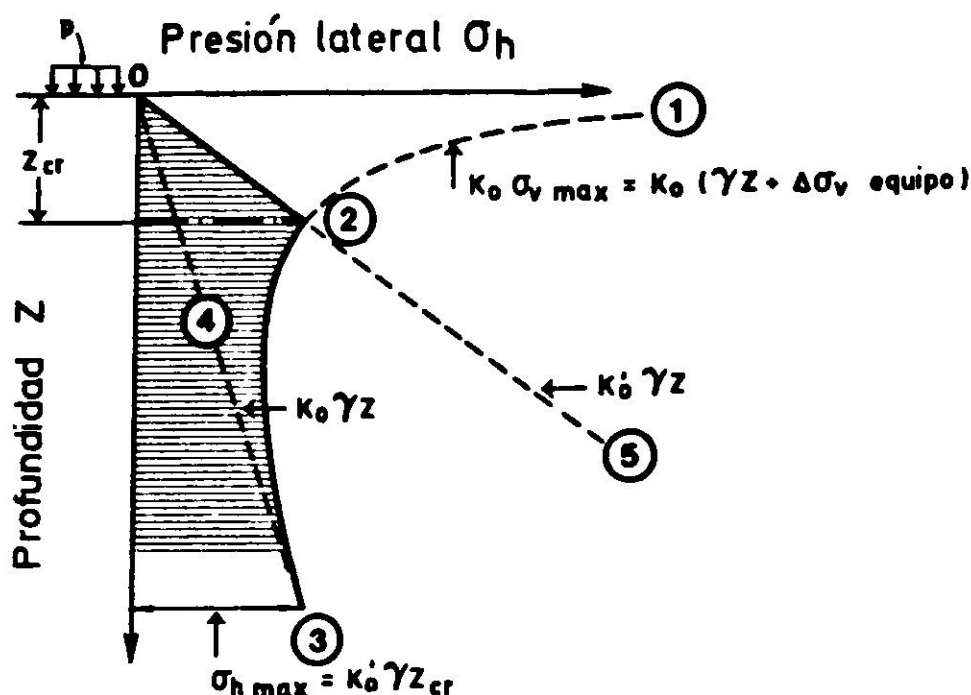


Fig. 5. Distribución de presión lateral sobre elementos de contención rígidos para un rodillo actuando sobre una capa de gran espesor (Broms¹²).

acuerdo a la Fig. 4a, si la profundidad bajo la superficie del relleno es menor que Z_{cr} , la presión lateral contra el muro disminuirá después que pase el compactador, desde el valor máximo $K_o \sigma_{vm \acute{a}x}$ a un valor σ_h^o igual a $K_o' \sigma_{vo}$ en que σ_{vo} es la presión vertical debida al peso del relleno (línea 0-2). De acuerdo a la Fig. 4b si $Z > Z_{cr}$ la presión remanente quedará dada por $K_o \sigma_{vm \acute{a}x}$ (línea 2-3) hasta empalmar con la línea 0-4 que corresponde a la presión en reposo debida al peso del relleno. La profundidad crítica Z_{cr} correspondiente al punto 2 equivale a la situación en la cual el punto E' coincide con D' (Fig. 4a) o el punto E'' con D'' (Fig. 4b). A dicha profundidad deberá verificarse:

$$K_o \sigma_{vm \acute{a}x} = K_o' \sigma_{vo}$$

$$K_o [\gamma Z_{cr} + (\Delta \sigma_v)_{z = z_{cr}}] = K_o' \gamma Z_{cr}$$

Utilizando las expresiones (3) y (5) para evaluar $\Delta \sigma_v$ a la profundidad $Z = Z_{cr}$ e introduciéndolas en la relación anterior se llega a las siguientes expresiones para Z_{cr} :

$$Z_{cr} = \sqrt{\frac{2CW}{\pi \gamma L} \frac{K_o}{K_o' - K_o}} \quad \text{Rodillos} \quad 7$$

$$Z_{cr} = \sqrt[3]{\frac{3W}{\pi \gamma} \frac{K_o}{K_o' - K_o}} \quad \text{Planchas vibratoras} \quad 8$$

En la relación (7) se propone usar $C = 1$ para rodillos estáticos y $C = 2$ para

rodillos vibratorios. El valor de la presión residual máxima $\sigma_{h\text{máx}}$ correspondiente al punto 2 de la Fig. 5 queda dado por:

$$\sigma_{h\text{máx}} = K'_o \gamma Z_{cr}$$

9

La Fig. 6 muestra la superposición de presiones al compactarse el relleno en capas de espesor e . El área achurada corresponde a la distribución de presiones laterales después de haber sido compactados los niveles A a E. Las mayores presiones se producen a las profundidades críticas que corresponden a los puntos 2^{IV} a 2^I para posteriormente producirse el empalme con la línea de presión en reposo $0^{IV} - 4$. De la figura se concluye que es posible aproximar la distribución de presiones laterales a un diagrama trapecial como el que se muestra en la Fig. 7, aproximación que será tanto más válida cuanto menor sea el espesor de las capas.

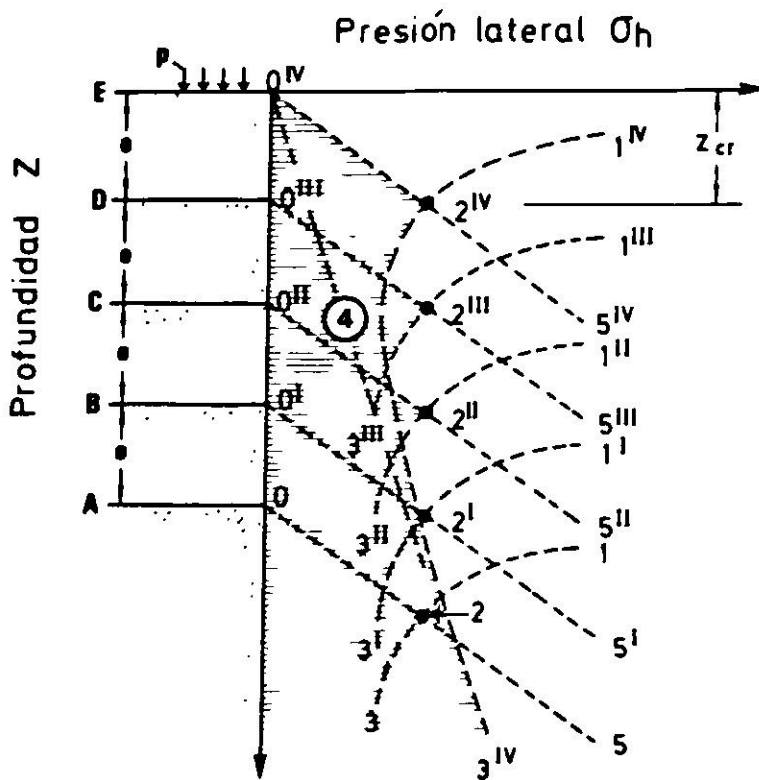


Fig. 6. Superposición de presiones laterales (Broms¹²).

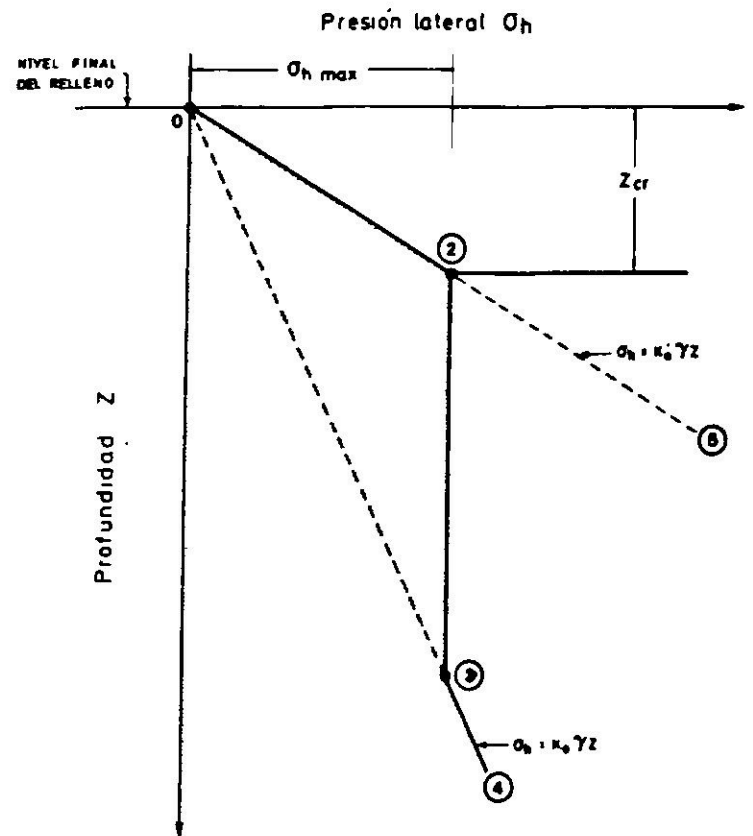


Fig. 7. Diagrama propuesto de presión lateral sobre elementos de contención rígidos (Broms¹²).

Pantallas flexibles con deformación lateral

Aggour y Brown¹³ plantearon una formulación matemática del problema en la que incluyen la compatibilización de deformaciones entre el muro y el suelo a medida que se compactan las capas, así como también la variación de las características de deformación de estas capas a medida que progresa el proceso de compactación. Las formas de los diagramas de presiones laterales una vez compactado el relleno concuerdan con las observadas experimentalmente y con las obtenidas por el método de Broms. Sin embargo, el método resulta un tanto complicado para emplearlo en problemas prácticos de ingeniería.

Ingold¹⁴ propuso un método similar al de Broms, pero con algunas modificaciones para tener en cuenta los desplazamientos laterales del elemento de

contención. Para profundidades inmediatamente bajo la superficie de la capa que se está compactando, la presión lateral residual queda dada por $\sigma_h = K\sigma_{vo} = K\gamma Z$. Por otra parte, las presiones laterales inducidas por el paso del equipo compactador las considera en régimen activo, es decir, $\sigma_h = K_a(\sigma_{vo} + \Delta\sigma_v \text{ equipo})$. En la Fig. 8 se ilustra la variación de σ_h con la profundidad, dada por las relaciones anteriores. Al igual que en el método de Broms se establece una profundidad crítica Z_{cr} para la cual se verifica $K\sigma_{vo} = K_a(\sigma_{vo} + \Delta\sigma_v \text{ equipo})$ y se define una presión lateral máxima $\sigma_{h \text{ máx}}$. Las expresiones correspondientes resultan:

$$Z_{cr} = \sqrt{\frac{2CW}{\pi\gamma L} \frac{K_a}{K - K_a}} \quad \text{Rodillos} \quad 10$$

$$Z_{cr} = \sqrt[3]{\frac{3W}{\pi\gamma} \frac{K_a}{K - K_a}} \quad \text{Planchas vibradoras} \quad 11$$

$$\sigma_{h \text{ máx}} = K\gamma Z_{cr} \quad 12$$

Con $C = 1$ para rodillos estáticos y $C = 2$ para rodillos vibratorios.

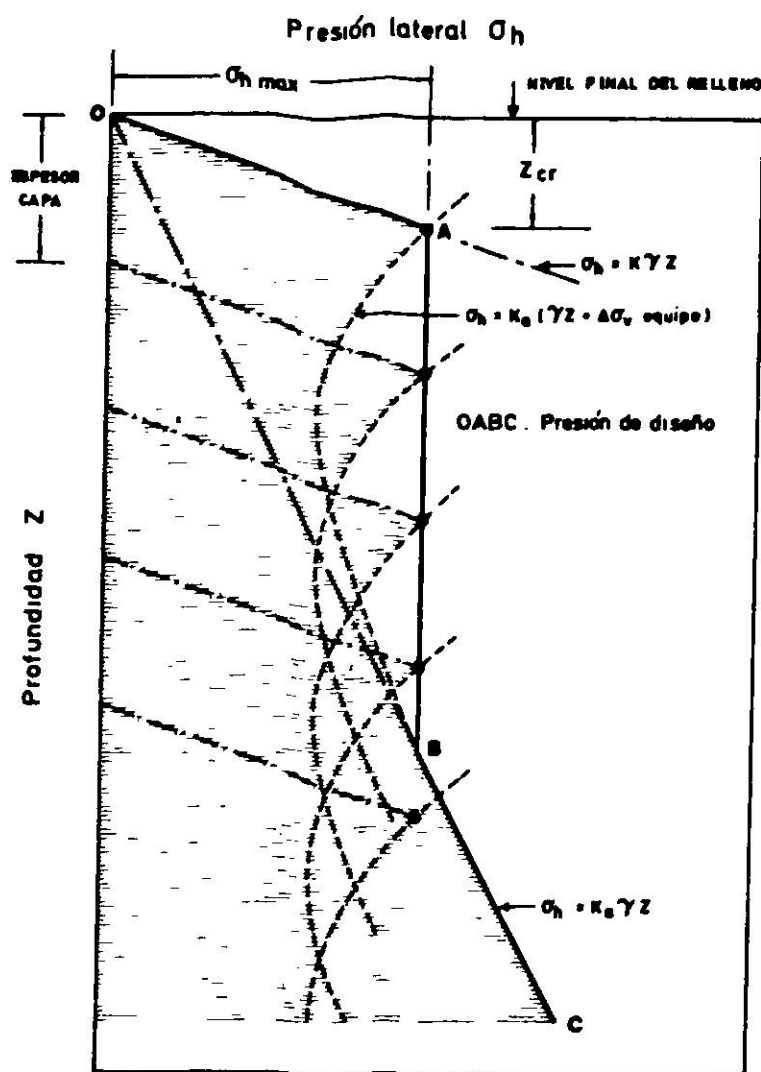


Fig. 8. Diagrama propuesto de presión lateral sobre elementos de contención flexibles, (Ingold¹⁴)

Ingold propone utilizar un valor $K = K_p$ lo que equivale a considerar que,

dentro de la profundidad definida por Z_{cr} , se desarrollan presiones laterales pasivas. Esto parece un contrasentido ya que en esa zona se obtendrían presiones laterales mayores a las dadas por Broms para pantallas rígidas, en las cuales el régimen de presión queda determinado por el coeficiente en reposo para descarga K'_o (ver Fig. 7). Los valores máximos de K'_o informados por Broms resultan del orden de 2.2, cifra que es inferior a los coeficientes de empuje pasivo que normalmente se dan en la práctica. En base a estas consideraciones pareciera más razonable emplear las relaciones (10) a (12) con $K = K'_o$. Esto significa que, para pantallas con desplazamiento lateral, pueden emplearse las relaciones (7, a (9) formuladas por Broms para pantallas rígidas, relaciones en las cuales el coeficiente K_o se reemplaza por el coeficiente de empuje activo K_a para tener en cuenta dicho desplazamiento.

Coeficiente K'_o

La evaluación de este parámetro es fundamental para la predicción de presiones por compactación inducidas sobre elementos de contención. Broms^{1,2} resume algunas experiencias de laboratorio efectuadas con arena de las que concluye que el coeficiente K'_o depende principalmente de la densidad relativa del suelo y de su razón de preconsolidación RPC . Para el caso de rellenos compactados RPC sería proporcional a $1 + (\Delta\sigma_{vequipo}/\sigma_{vo})$. El rango de valores informado por Broms oscila entre 1.0 para $RPC = 6$ y 2.2 para $RPC = 32$, valores que concuerdan con los medidos por D'Appolonia y otros¹¹ a 60 cm bajo la superficie de rellenos de dunas de gran extensión, compactados con rodillos vibradores de 2.9 y 5.7 ton de peso. Los resultados de estas mediciones aparecen graficados en las Figs. 9 y 10 en las cuales σ_h representa la presión horizontal residual a la profundidad de la medición y γZ la presión vertical a esa misma profundidad debida al peso del relleno.

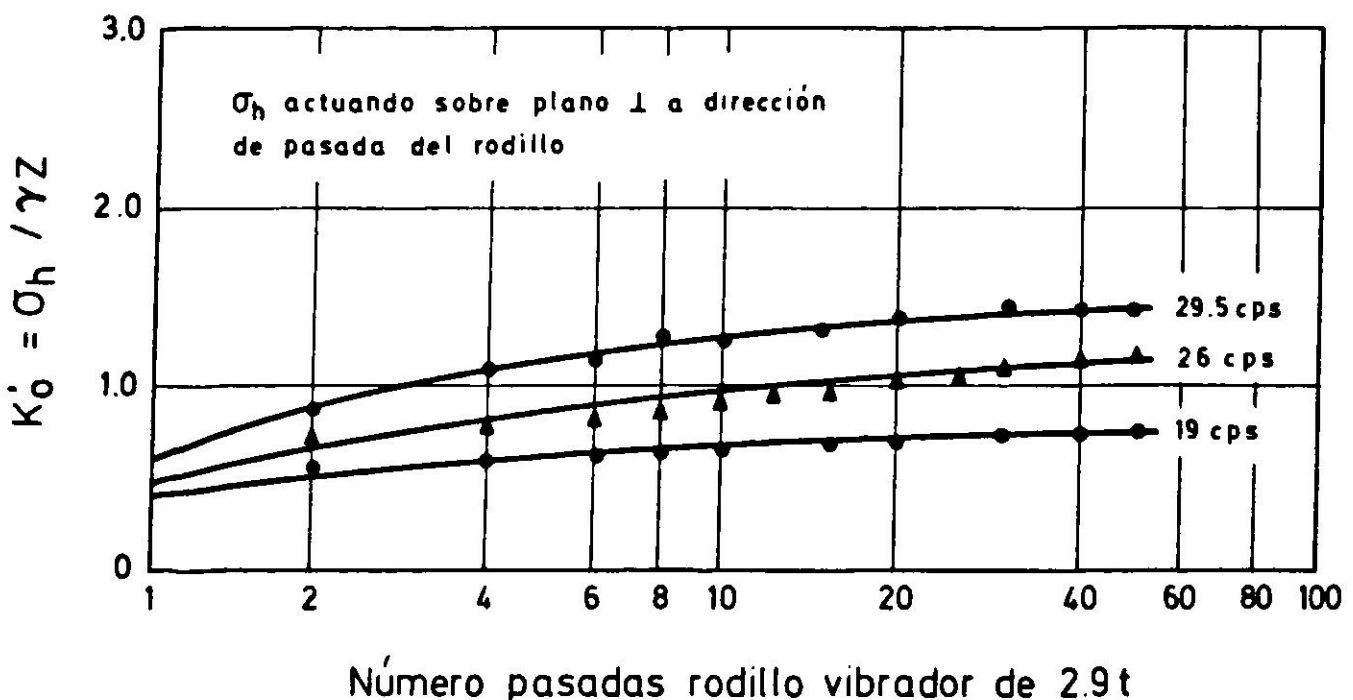
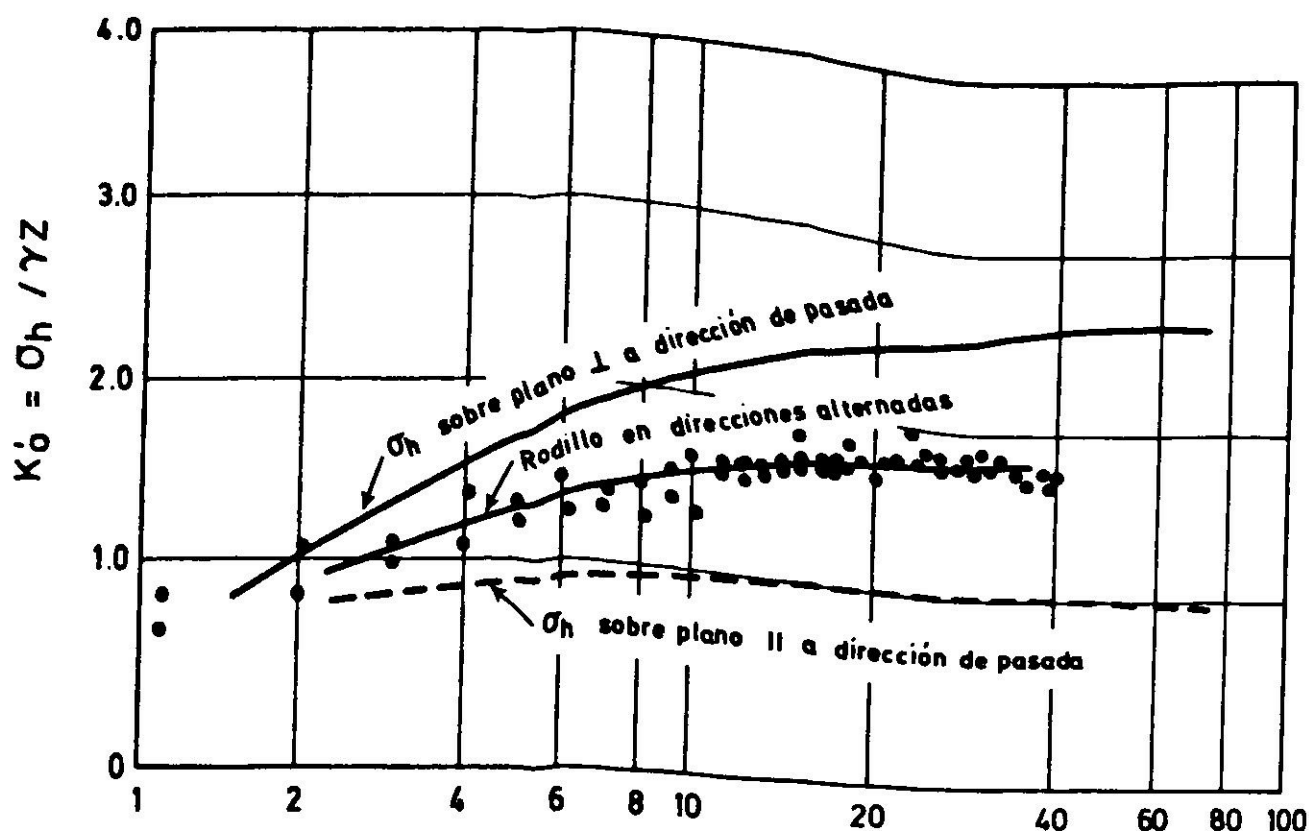


Fig. 9. Variación de K'_o con el número de pasadas del rodillo a 60 cm de profundidad, (D'Appolonia y otros¹¹).



Número pasadas rodillo vibrador de 5.7 t operando a 27.5 cps

Fig. 10. Variación de K'_o con el número de pasadas del rodillo a 60 cm de profundidad, (D'Appolonia y otros¹¹).

Número y dirección de las pasadas del equipo de compactación

Ninguno de los métodos formulados considera en forma explícita estos factores en la determinación de las presiones inducidas por el proceso de compactación. Los resultados expuestos en las Figs. 9 y 10 así como las mediciones con carga lineal cíclica de Sherif y Mackey, indican un incremento de la presión lateral residual al aumentar el número de pasadas (ciclos carga-descarga) del equipo compactador. Esto equivaldría a aumentar el coeficiente K'_o asignándole un valor representativo para las condiciones que se esperen en la faena de compactación. Así mismo, en la elección de dicho valor es necesario tener presente la dirección de pasada del tambor del rodillo con respecto al elemento de contención según se deduce de los resultados expuestos en las Figs. 9 y 10.

Influencia de la altura del elemento de contención

Todos los métodos establecen un aumento significativo de las presiones laterales en la zona cercana a la superficie del relleno. Así, de las relaciones (4) y (6) formuladas por Schimdt para pantallas rígidas, se desprende que sólo para grandes profundidades Z bajo la superficie del relleno, la presión lateral tiende a empalmar la clásica distribución triangular en reposo. En el método de Broms, que resulta aplicable tanto para pantallas con y sin desplazamiento lateral, el empalme se produce a una profundidad bien definida según se observa en la Fig. 7. De lo anterior se desprende que cuanto menor sea la altura del muro, mayor será el aumento porcentual de presión lateral con cargo al proceso de compactación, y que dicho aumento resulta más significativo para el caso de muros flexibles. Lo anterior queda ilustrado por los diagramas de presión lateral

expuestos en la Fig. 11. Por consiguiente, sólo en el caso de muros de baja altura los empujes por compactación pueden resultar importantes como para ser considerados en el cálculo o para tomar medidas constructivas tendientes a reducirlos.

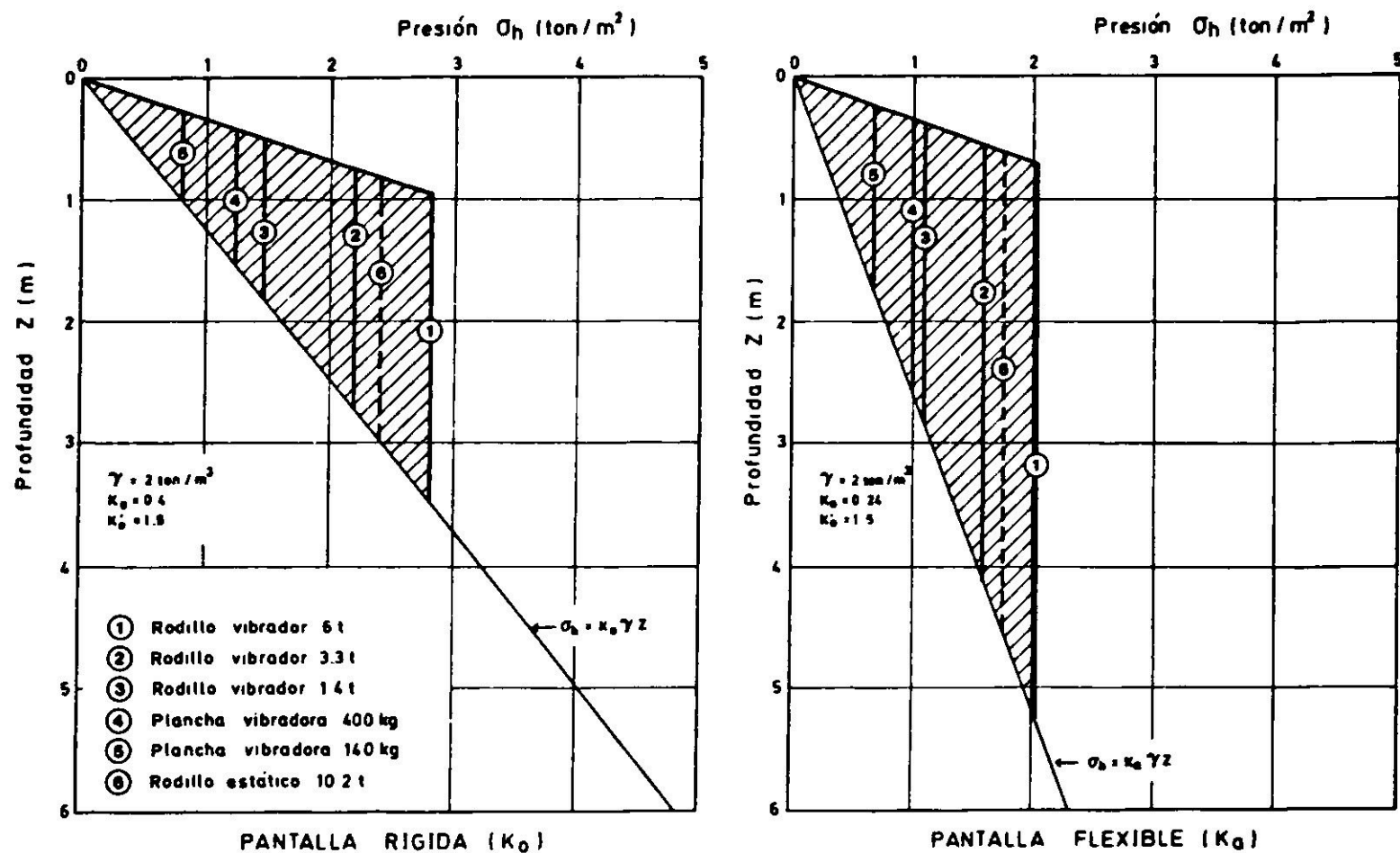


Fig. 11. Empujes por compactación (zona achurada) determinados con las expresiones de Broms.

Influencia de las características del compactador

Todos los métodos coinciden en que el aumento del peso estático del equipo compactador produce un incremento de la presión máxima por compactación. Por otra parte, para equipos vibratorios, los métodos proponen amplificar al doble su peso estático. En la Fig. 11 se ilustran diagramas de presión sobre pantallas rígidas y flexibles considerando equipos con diferentes pesos. Los resultados de esa figura llevan a recomendar el empleo de equipos livianos, por lo menos en una faja próxima al elemento de contención. Sin embargo, el empleo de equipos livianos obligará a reducir el espesor de las capas y, en suelos gravosos, a reducir el tamaño máximo de partículas a fin de lograr los grados de compactación normalmente especificados para rellenos.

Para fijar el ancho de faja a compactar con equipo liviano es posible recurrir a mediciones de la tensión dinámica vertical a diferentes profundidades y distancias de la posición de rodillos vibratorios operando sobre arenas de dunas¹¹ y sobre arcillas limosas¹⁰. Estas mediciones indican una marcada atenuación de las tensiones dinámicas verticales para distancias al eje del rodillo superiores a 1.0 - 1.5 m. Por tal motivo, el empleo de equipos livianos se recomienda efectuarlo

sobre una faja vecina al muro de por lo menos 2 m de ancho.

COMPARACION DE RESULTADOS

Se efectuó una comparación de los empujes obtenidos mediante los métodos expuestos con los entregados por las mediciones de terreno. Se excluyeron las mediciones de Sowers y otros y las de Coyle y Bartoskewitz por no contarse con las características precisas de los equipos de compactación utilizados y/o la metodología constructiva de colocación del relleno. En lo referente a las mediciones de laboratorio no resulta posible compararlas con los métodos de predicción, por lo que su utilidad es más bien de tipo cualitativo.

En la Tabla I se presenta un resumen con los datos de cálculo utilizados en la predicción de empujes mediante el empleo de los métodos de Schimdt (pantallas rígidas), Broms con K_o (pantallas rígidas) y Broms con K_a (pantallas flexibles).

TABLA I

DATOS UTILIZADOS EN LA PREDICCIÓN DE EMPUJES. POR COMPACTACION

Mediciones en arena gravosa (Rehman y Broms ⁷)		Mediciones en arena con algo de grava : (Broms e Ingelson ⁸)	
Altura del relleno	$H = 2 \text{ m}$	Altura del relleno	$H = 3 \text{ m}$
Plancha vibradora	$W = 140 \text{ kg}$	Rodillo vibrador	$W = 3.8 \text{ ton}$
Espesor capa	$e = 20 \text{ cm}$	Longitud del tambor	$L = 1.5 \text{ m}$
N° de pasadas/capa	$N = 4$	Espesor capa	$e = 50 \text{ cm}$
	$\gamma = 2 \text{ ton/m}^3$	N° pasadas/capa	$N = 10$
	$K_o = 0.35 (*)$		$\gamma = 1.76 \text{ ton/m}^3$
	$K_a = 0.28 (**)$	Angulo de fricción	$\phi = 33^\circ$
	$h = 0.4 (**)$		$K_o = 1 - \text{sen}\phi = 0.45$
	$K'_o = 1.0 (**)$		$K_a = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi} = 0.29$
Altura del relleno	$H = 2 \text{ m}$		$h = 0.4 (**)$
Plancha vibradora	$W = 400 \text{ kg}$		$K'_o = 1.5 (**)$
Espesor capa	$e = 40 \text{ cm}$		
N° pasadas/capa	$N = 4$		
	$\gamma = 1.98 \text{ ton/m}^3$		
	$K_o = 0.35 (*)$		
	$K_a = 0.28 (**)$		
	$h = 0.4 (**)$		
	$K'_o = 1.0 (**)$		
		(*) Medido para suelo depositado en forma suelta.	
		(**) Valores estimados	

En las Figs. 12 a 14 se ilustran los resultados de la comparación entre los valores calculados y los obtenidos en las mediciones de terreno. Dicha comparación permite concluir que el método de Broms da distribuciones de presiones que se

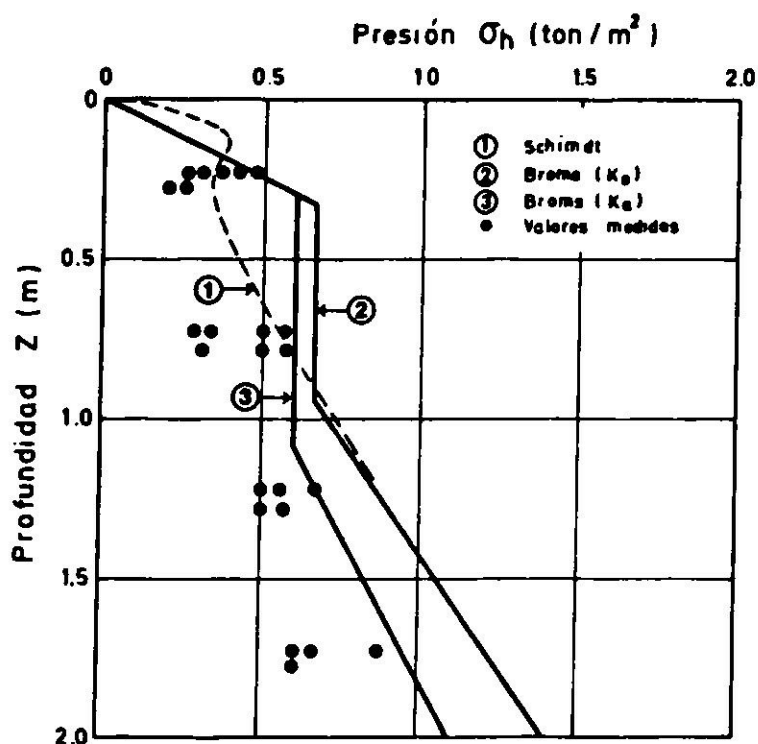


Fig. 12. Resultados en arena gravosa compactada con plancha vibradora de 140 kg.

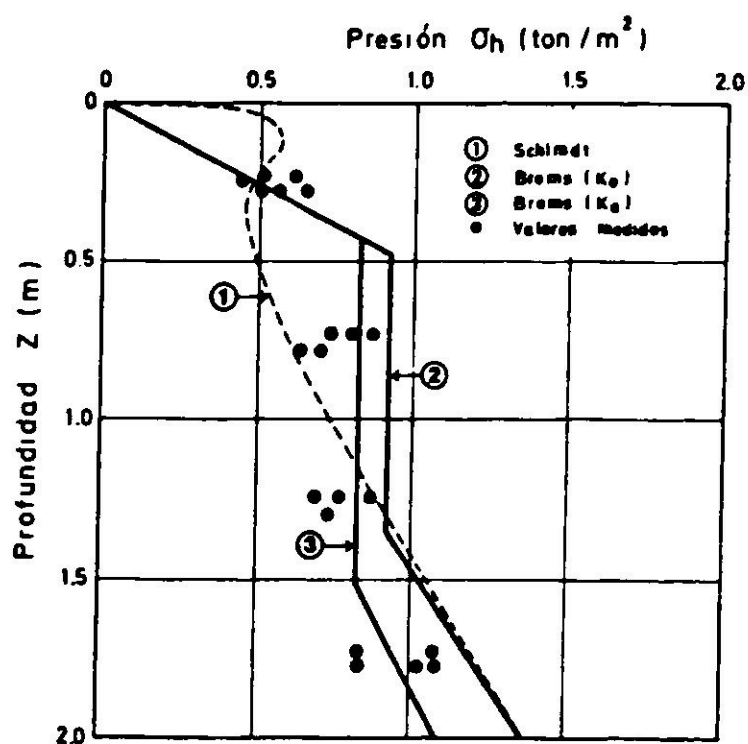


Fig. 13. Resultados en arena gravosa compactada con plancha vibradora de 400 kg.

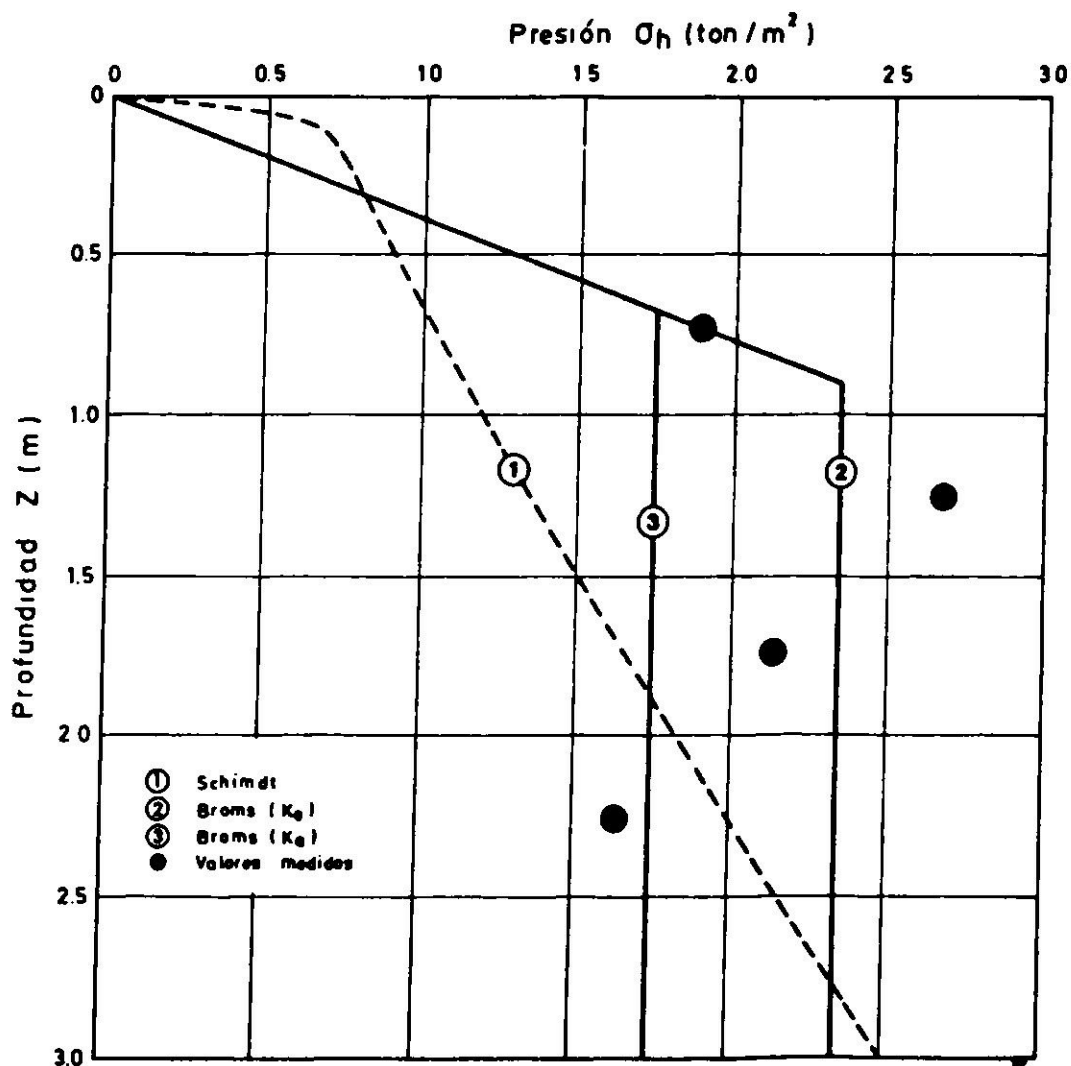


Fig. 14. Resultados en arena con algo de grava compactada con rodillo vibrador de 3.8 ton.

ajustan razonablemente bien con las medidas, existiendo diferencias que más bien son atribuibles a la magnitud de los desplazamientos laterales del elemento de contención y a errores asociados a la elección de los valores de K_o , K'_o y K_a . No obstante, pareciera que la adopción de $K'_o = 1$ para planchas vibradoras y 1.5 para rodillos representa una buena aproximación para efectos de cálculo. Sin embargo, por muy bien que se elija el valor de K'_o los resultados del cálculo

mantendrán una fuerte dependencia de si el problema se trata en régimen de reposo o activo, lo cual será función de la magnitud esperada del desplazamiento lateral del muro en cada caso particular.

CONCLUSIONES

1. El proceso de compactación de un relleno produce un efecto de *pretensado lateral* que se manifiesta en un aumento importante de las presiones horizontales dentro de la masa de suelo. Este aumento va acompañado de deformaciones de cortes cíclicas que incursionan dentro del campo plástico y que son originadas por las sucesivas pasadas del equipo compactador.

El efecto combinado del *pretensado lateral* y de las deformaciones cíclicas constituye un proceso que resulta relevante en el mejoramiento de las características mecánicas del relleno compactado y que, en la práctica, se controla indirectamente a través de determinaciones de densidad.

2. Las presiones horizontales inducidas por la compactación de rellenos granulares en contra de elementos de contención rígidos, pueden ser estimadas con una razonable precisión mediante el diagrama de presiones propuesto por Broms, el cual se esquematiza en la Fig. 7. En dicha figura las expresiones formuladas por Broms para Z_{cr} y $\sigma_{h\text{máx}}$ resultan:

$$Z_{cr} = \sqrt{\frac{2CW}{\pi\gamma L} \frac{K_o}{K'_o - K_o}} \quad \text{Rodillos} \begin{cases} C = 1 \text{ rodillo estático} \\ C = 2 \text{ rodillo vibratorio} \end{cases}$$

$$Z_{cr} = \sqrt[3]{\frac{3W}{\pi\gamma} \frac{K_o}{K'_o - K_o}} \quad \text{Planchas vibratoras}$$

$$\sigma_{h\text{máx}} = K'_o \gamma Z_{cr}$$

en que W representa el peso estático del rodillo o de la plancha; γ el peso unitario del relleno compactado; K_o el coeficiente de empuje en reposo del relleno compactado; K'_o un coeficiente de empuje en descarga y L la longitud del tambor del rodillo.

3. Para elementos de contención que experimenten deformaciones laterales iguales o superiores al 1% de la altura del relleno, se podrá utilizar el diagrama de la Fig. 7 reemplazando K_o por el coeficiente de empuje activo K_a del relleno compactado. Asimismo, en el cálculo de Z_{cr} se utilizarán las expresiones formuladas por Broms reemplazando en ellas K_o por K_a .

4. La estimación del coeficiente de empuje en reposo se propone efectuarla como $K_o = 1 - \text{sen}\phi$ en que ϕ representa el ángulo de fricción interna del relleno compactado. El coeficiente de empuje activo queda definido por la clásica relación $K_a = (1 - \text{sen}\phi)/(1 + \text{sen}\phi)$. En lo referente al coeficiente K'_o , para efectos de diseño se propone un valor igual a 1.0 en el caso de planchas vibratoras e igual a 1.5 en el caso de rodillos con pesos superiores a 1.5 ton.
5. El incremento del empuje con cargo al proceso de compactación resulta más significativo cuanto menor sea la altura del muro. A su vez, para una altura dada, dicho incremento es más significativo en el caso de muros con desplazamiento lateral calculados en régimen activo.
6. Como medidas constructivas tendientes a reducir la magnitud de los empujes por compactación pueden reseñarse, entre otras, las siguientes:
 - a) en el caso de elementos de contención que puedan experimentar desplazamientos laterales (por ej. muros cantilever), apuntalarlos lateralmente durante el proceso de compactación, para posteriormente retirar dicho arriostamiento una vez finalizada la colocación del relleno;
 - b) utilizar equipos livianos en una faja de 2 m de ancho mínimo inmediatamente vecina al elemento de contención. Esto obligará a reducir el espesor de las capas y, en el caso de suelos gravosos, a reducir el tamaño máximo de partículas para lograr los grados de compactación normalmente especificados para rellenos estructurales;
 - c) en el caso de rodillos, desplazarlos en sentido paralelo al paramento del elemento de contención;
 - d) reducir al mínimo indispensable el número de pasadas necesarias para lograr el grado de compactación especificado.
7. Para la verificación sísmica de la estabilidad de elementos de contención que experimenten deformaciones laterales durante un sismo no se considerará la existencia de empujes por compactación, en el entendido de que éstos se relajan totalmente una vez producidas tales deformaciones.

REFERENCIAS

1. TERZAGHI, K. Large retaining-wall tests, I: Pressure of dry sand, *Engineering News-Record*, vol. 112, 1934, pp. 136–140.
2. SOWERS, G.F.; ROBB, A.D.; MULLIS, C.H. y GLENN, A.J. The residual lateral pressures produced by compacting soils, *Proceedings Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. II, 1957, pp. 243–247.
3. GOULD, J.P. Lateral pressures on rigid permanent structures, *Specialty Conference on lateral stresses in the ground and design of earth retaining structures*, ASCE, Cornell 1970, pp. 219–269.
4. CASAGRANDE, L. Comments on conventional design of retaining walls structures, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, vol. 99, nº SM2, 1973.

5. SHERIF, M.M. y MACKEY, R.D. Pressures on retaining walls with repeated loading, *Journal of the Geotech. Engineering Division, ASCE*, vol. 103, n° GT11, 1977.
6. COYLE, H.M. y BARTOSKEWITZ, R.E. *Field measurements of lateral earth pressures and movements on retaining walls*, Texas Transportation Institute, Texas, 1977.
7. REHNMAN, S.E. y BROMS, B.B. Lateral pressures on basements walls: Results from full-scale tests, *Proceedings Fifth European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid, vol. 1, 1972, pp. 189–197.
8. BROMS, B.B. e INGELSON, I. Earth pressure against the abutments of a rigid frame bridge, *Geotechnique*, vol. 21, n° 1, 1971, pp. 15–28.
9. SCHIMDT, B. Lateral stresses in uniaxial strain, *The Danish Geotechnical Institute, Bulletin* n° 23, 1967.
10. WHIFFIN, A.C. The pressures generated in soil by compaction equipment, *Symposium on Dynamic testing of Soils*, Spec. Tech. Publ. n° 156, 1954, pp. 186–204.
11. D'APPOLONIA, D.J.; WHITMAN, R.V. y D'APPOLONIA, E. Sand compaction with vibratory rollers, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 95, n° SM1, 1969.
12. BROMS, B.B. Lateral earth pressures due to compaction of cohesionless soils, *Proceedings Fourth Conference on Soil Mechanics*, Budapest, 1971, pp. 373–384.
13. AGGOUR, M.S. y BROMS, B.B. The prediction of earth pressure on retaining walls due to compaction, *Geotechnique*, vol. 24, n° 4, 1974, pp. 489–502.
14. INGOLD, T.S. Retaining wall performance during backfilling, *Journal of the Geotech. Engineering Division, ASCE*, vol. 105, n° GT5, 1979.

LATERAL PRESSURES AGAINST EARTH RETAINING STRUCTURES DUE TO FILL COMPACTION

SUMMARY

When fills are compacted against earth retaining structures, resulting earth pressures are larger than those obtained by classical earth pressure theories. In order to clarify this phenomenon, both lab and field pressure measurements performed on compacted fills, were collected. Besides, a comparison between predicted and measured pressures due to compaction is made.

It is concluded that Broms method is a good approach for predicting earth pressures due to fill compaction against rigid and flexible structures. The importance of the structure height, the weight of the compaction equipment and the relative direction between the roller drum and the face of the earth retaining structure are also pointed out.