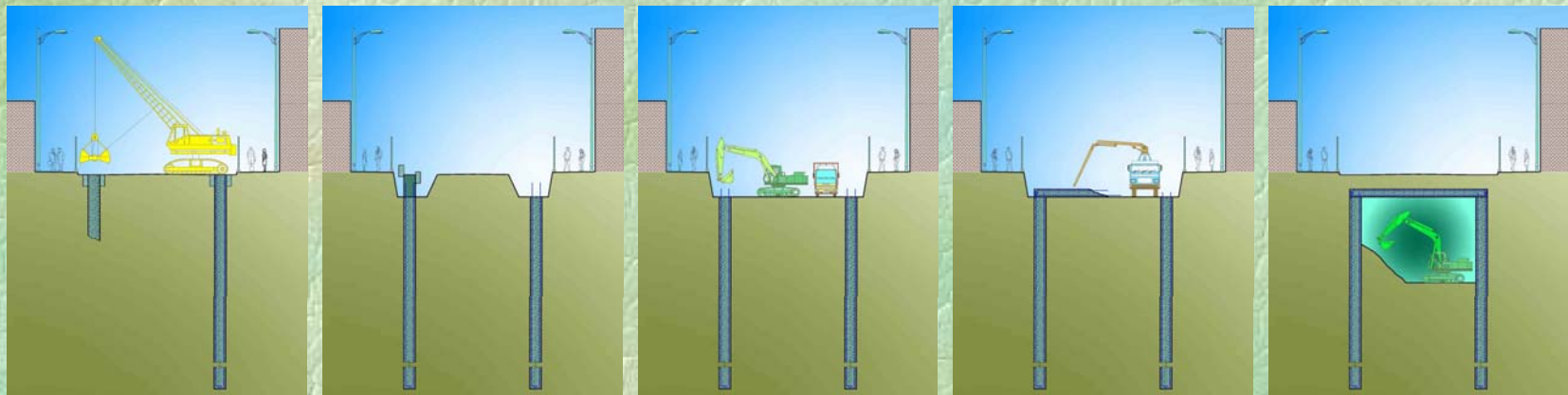


TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Elementos de contención: definiciones y tipologías (I)

① Pantallas.

Se emplean para realizar excavaciones verticales, fundamentalmente en zonas urbanas. Se construyen desde la superficie del terreno previamente a la ejecución de la excavación del terreno. Normalmente llegan a profundidades superiores a los 6 m.



Fases de construcción del metro de Málaga utilizando muros pantalla

Fuente: Junta de Andalucía



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

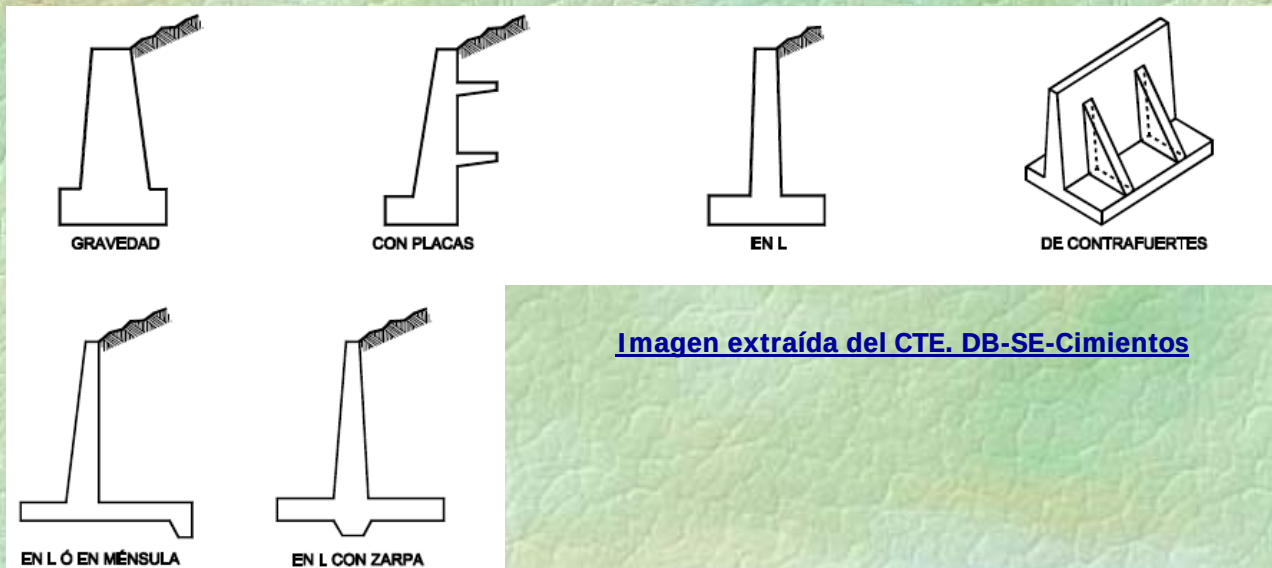
Elementos de contención: definiciones y tipologías (II)

② Muros.

Se ejecutan después de haberse realizado la excavación del terreno, es decir, primero se elimina el terreno, después se construye el muro y finalmente se sitúa un relleno tras el muro.

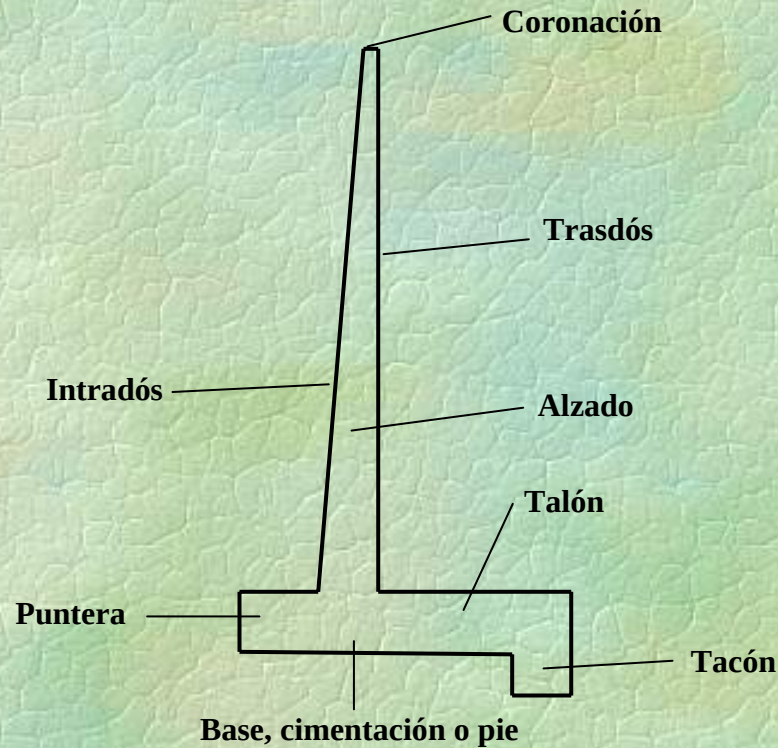
Atendiendo a los materiales y a su forma de fabricación se pueden distinguir:

- ① Muros de gravedad: son muros contruidos utilizando bloques de piedra o mediante hormigón en masa. Interesantes para alturas moderadas (5 - 6 m).
- ② Muros ménsula: ejecutados en hormigón armado. Interesantes hasta 10 - 12 m.
- ③ Muros de contrafuertes: mayor altura y formas más complejas.



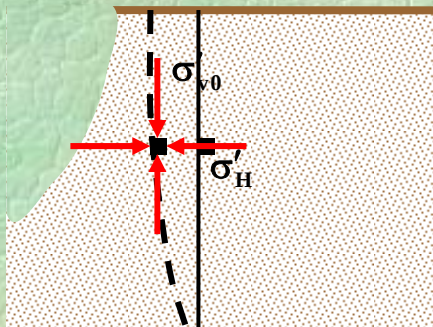
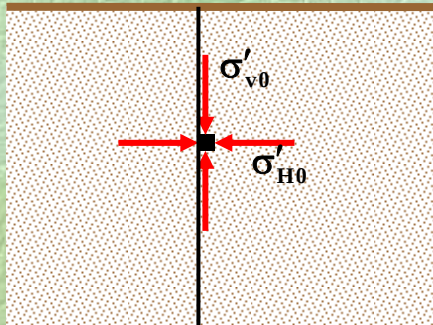
TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Nomenclatura



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Estados límite de Rankine (I)



Cuando $\sigma'_H = \sigma'_{Ha}$
Estado límite activo
"Empuje activo"

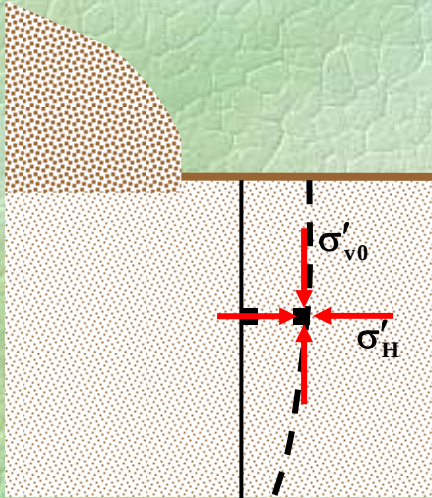
Sea un punto en el interior de un terreno. El círculo de Mohr representativo de su estado de tensiones (R) se indica en la figura de la página siguiente. Si se introduce en el terreno una pantalla de espesor inapreciable, no se alterará el estado de tensiones, que se denomina "estado en reposo".

Si ahora se elimina el terreno situado a la izquierda de la pantalla, ésta se verá sometida a las tensiones que había antes a la derecha, pero sin terreno a la izquierda para mantener el equilibrio. Por lo tanto, la pantalla tenderá a moverse y el terreno de la derecha sufrirá una relajación, disminuyendo su tensión horizontal. En este caso, el círculo de Mohr representativo del estado de tensiones del punto (ver página siguiente) habrá aumentado su tamaño, a pesar de mantenerse la tensión vertical constante.

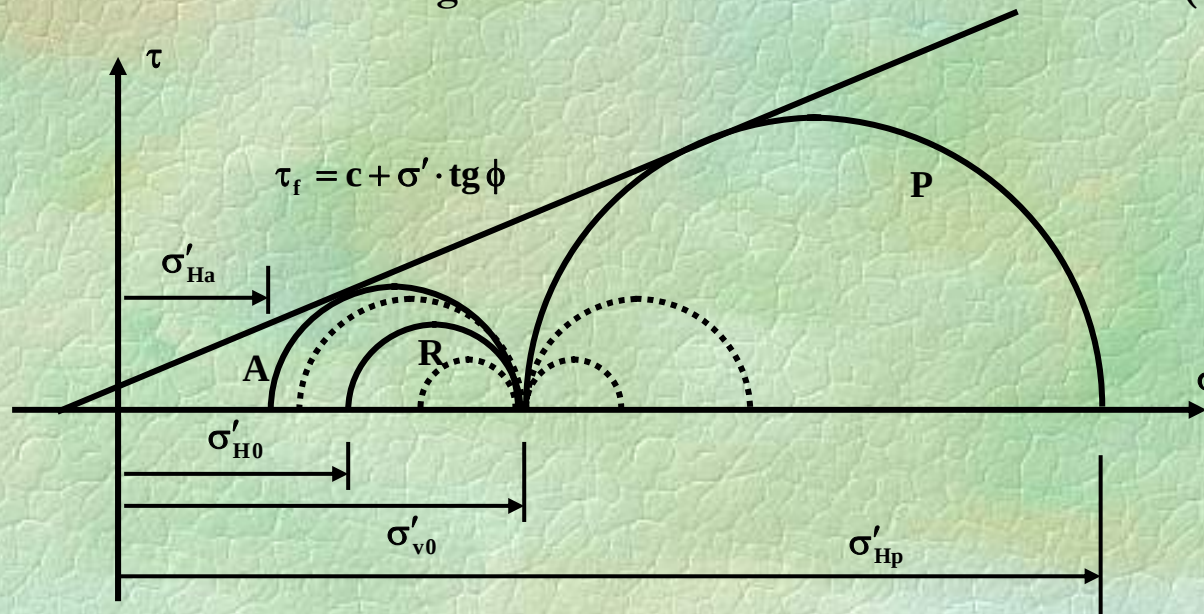
Si la pantalla siguiera moviéndose, el terreno acabaría por fallar por deslizamiento, formándose una *cuña de empuje*. Ahora, el círculo de Mohr (A) sería tangente a la línea de resistencia intrínseca. Dicho estado recibe el nombre de "*estado límite activo*", con tensiones horizontales (σ'_{Ha}), cuya resultante sobre el muro es el "*empuje activo*". U.P.V.

TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Estados límite de Rankine (II)



Si por el contrario, partiendo del estado en reposo se intenta forzar al muro para que se mueva contra el terreno y la fuerza es suficientemente importante, el terreno también puede fallar, siendo impulsada hacia arriba una *cuña de resistencia*. Las tensiones horizontales habrán aumentado, como reacción del terreno que se opone al movimiento, llegándose a un estado de tensiones (σ'_{Hp}), denominado “estado límite pasivo”. El círculo de Mohr habría ido disminuyendo primero y luego aumentando hasta alcanzar también un punto de tangencia a la línea de resistencia intrínseca (P).



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

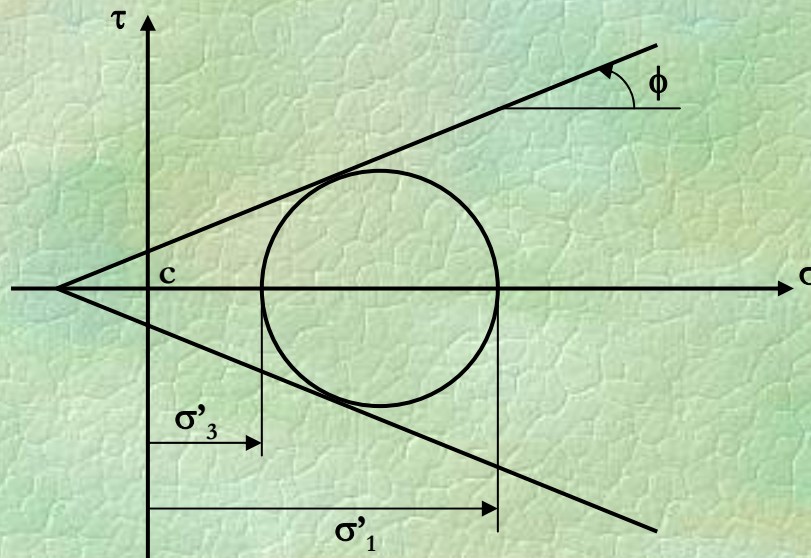
Empuje activo en suelos granulares (I). Teoría de Rankine (I).

➤ Hipótesis de la teoría de Rankine:

❶ Todo el terreno tras el muro se encuentra en estado de fallo, en el estado límite activo, tal como se observa en la figura inferior. Por lo tanto, la relación entre tensiones principales vendrá dada por:

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

❷ No existe rozamiento entre terreno y muro.



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en suelos granulares (II). Teoría de Rankine (II). Casos.

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\sigma'_{Ha} = \sigma'_v \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = K_a \cdot \sigma'_v = K_a \cdot (\gamma \cdot z)$$

K_a es el coeficiente de empuje activo

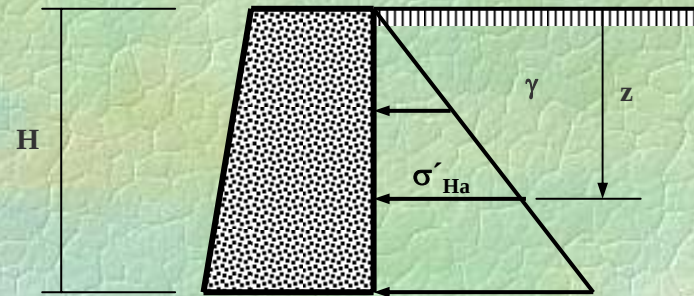
$$E_a = E_{aH} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

E_a recibe el nombre de empuje activo

$$\sigma_v = \sigma'_v = (\gamma \cdot z) + q$$

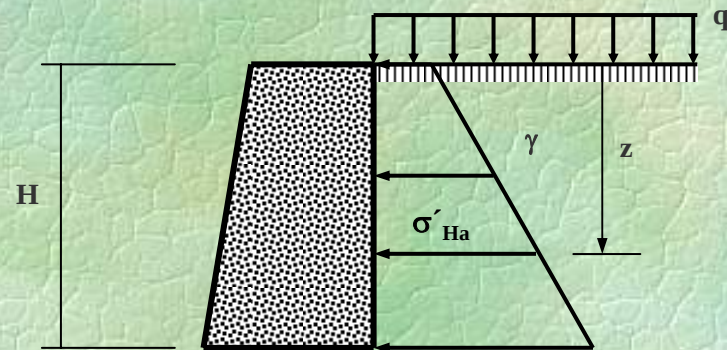
$$\sigma'_{Ha} = \sigma'_v \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = K_a \cdot \sigma'_v = K_a \cdot [(\gamma \cdot z) + q]$$

$$E_a = E_{aH} = \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot H\right) \cdot K_a = \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot H\right) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$



$$\bar{z} = \frac{2}{3} \cdot H$$

Posición del punto de aplicación sobre el muro



$$\bar{z} = H \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot H + 3 \cdot q}{3 \cdot \gamma \cdot H + 6 \cdot q}\right)$$

TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en suelos granulares (III). Teoría de Rankine (III). Casos.

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = (\gamma \cdot H_1 + \gamma_{\text{sat}} \cdot z') - \gamma_w \cdot z' = \gamma \cdot H_1 + \gamma' \cdot z'$$

$$\sigma'_{\text{Ha}} = \sigma'_v \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = K_a \cdot \sigma'_v = K_a \cdot (\gamma \cdot H_1 + \gamma' \cdot z')$$

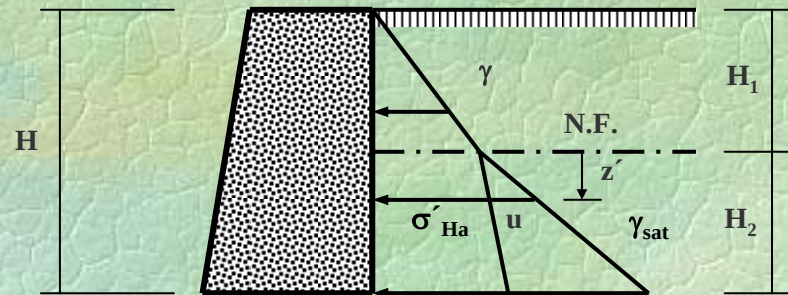
$$q_{\text{terreno}} = \gamma \cdot H_1 \quad \longrightarrow \quad \sigma'_{\text{Ha}} = K_a \cdot (\gamma' \cdot z' + q_{\text{terreno}})$$

$$E_{a2} = E_{aH2} = \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H_2^2 + q_{\text{terreno}} \cdot H_2 \right) \cdot K_a = \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H_2^2 + q_{\text{terreno}} \cdot H_2 \right) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$u = \gamma_w \cdot z'$$

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H_2^2$$

$$\bar{z} = H_1 + \frac{2}{3} \cdot H_2$$



$$\bar{z} = H_1 + H_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma' \cdot H_2 + 3 \cdot q_{\text{terreno}}}{3 \cdot \gamma' \cdot H_2 + 6 \cdot q_{\text{terreno}}} \right)$$



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en suelos granulares (IV). Teoría de Coulomb (I).

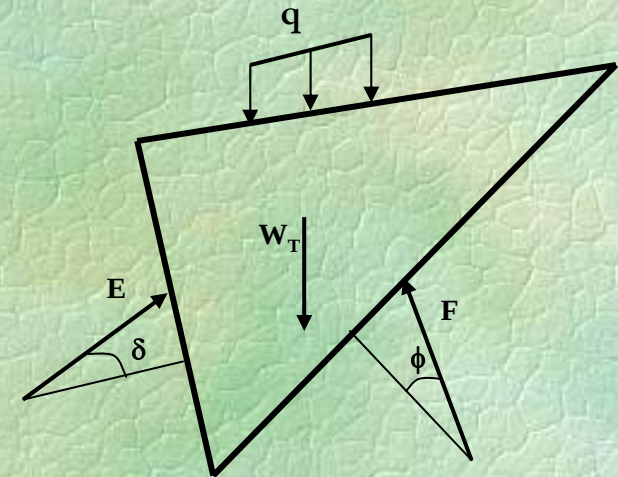
➤ Coulomb observó:

- ➊ El muro tiende a girar alrededor del punto más bajo de su trasdós.
- ➋ El terreno situado detrás del muro experimenta una descarga lateral que le conduce al estado activo.
- ➌ Además, se produce un pequeño movimiento vertical (asiento) del terreno inmediatamente situado junto al trasdós del muro.
- ➍ Finalmente puede apreciarse que una cuña del terreno acompaña al muro.

➤ La cuña de empuje se encuentra en equilibrio.

Fuerzas actuantes:

- ➊ El peso propio de la cuña (W).
- ➋ Las acciones sobre el terreno, si las hubiera (q).
- ➌ La acción de la masa de suelo que no se mueve (F), que se encontrará girada respecto a la normal de contacto el ángulo de rozamiento interno, ϕ .
- ➍ La reacción del muro contra el terreno (E), que se encontrará girada respecto a la normal de contacto el ángulo de rozamiento entre terreno y muro, δ .
- ➎ De estudiar el equilibrio de las fuerzas se obtiene el empuje del terreno sobre el muro.



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en suelos granulares (V). Teoría de Coulomb (II).

➔ Los casos más sencillos se pueden resolver matemáticamente.

Coeficientes de empuje activo

$$\lambda_H = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

$$\lambda_V = \lambda_H \cdot \cot g(\alpha - \delta)$$

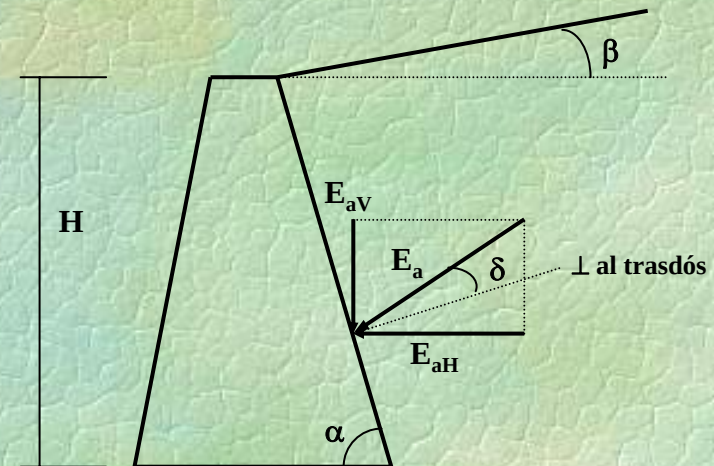
$$\left. \begin{aligned} e_{aH} &= \gamma \cdot z \cdot \lambda_H \\ e_{aV} &= \gamma \cdot z \cdot \lambda_V \end{aligned} \right\} \text{Presiones}$$

$$E_{aH} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \lambda_H$$

$$E_{aV} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \lambda_V$$

$$\bar{z} = \frac{2}{3} \cdot H$$

Empujes



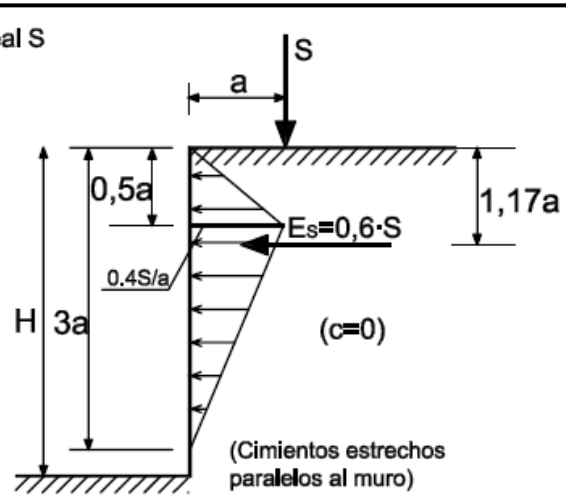
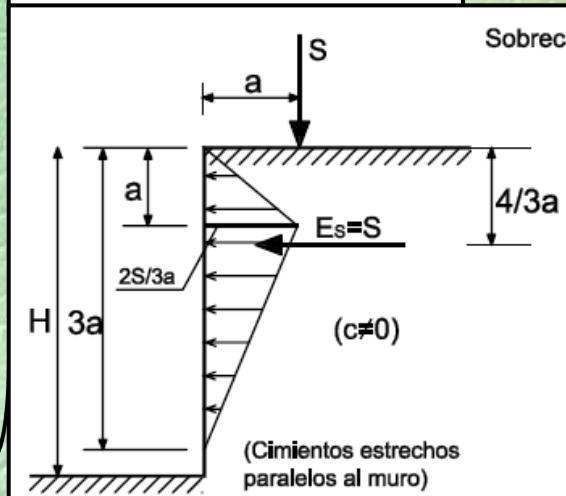
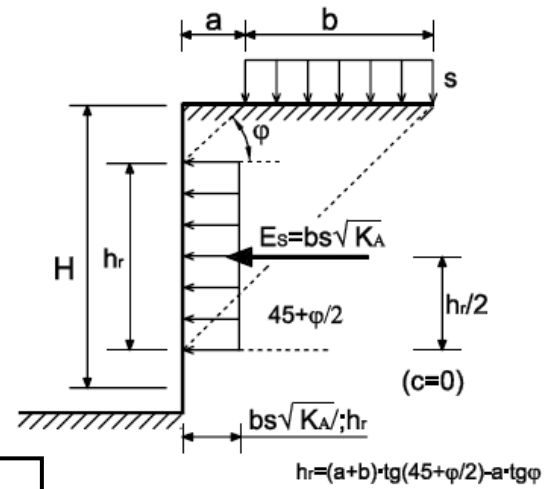
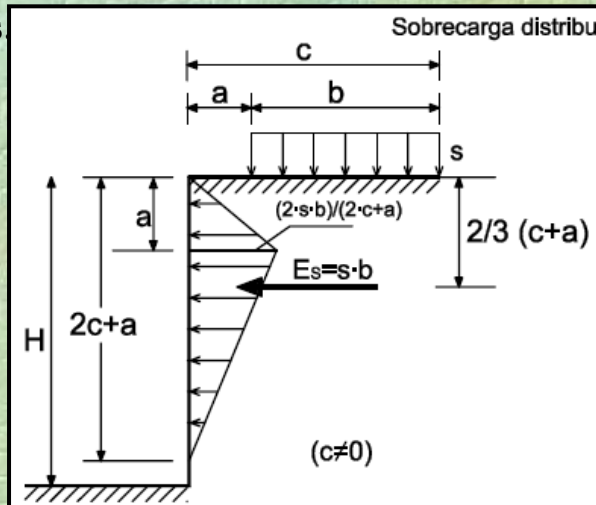
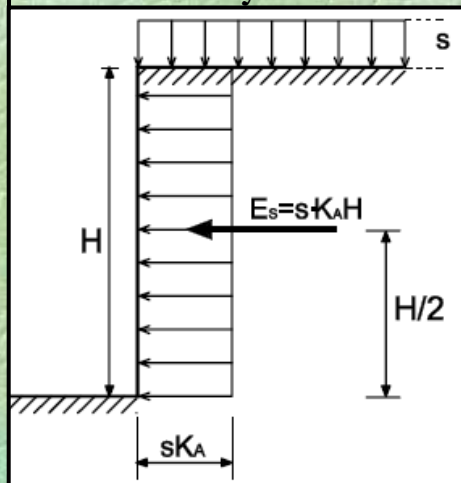
NOTA: El CTE, DB-SE-Cimientos y otros documentos proporcionan expresiones distintas para el cálculo de los coeficientes de empuje activo. No obstante, son equivalentes a las aquí indicadas.



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en suelos granulares (VI). Teoría de Coulomb (III).

Cuando existen sobrecargas en la superficie del terreno, se pueden utilizar las indicaciones del CTE.DB-SE-Cimientos indicadas en la figura, superponiéndose los empujes debidos al terreno y a las sobrecargas



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en suelos granulares (VII). Teoría de Coulomb (IV).

➤ Angulo de rozamiento entre terreno y muro, δ :

- ➊ En terrenos anegados y en muros de superficie muy lisa se tomará $\delta = 0$.
- ➋ Con terrenos bien drenados y muros poco rugosos, se tomará $\delta \leq \phi/3$.
- ➌ Con terrenos bien drenados y muros rugosos, su valor será $\delta \leq 2 \cdot \phi/3$.

➤ Si tras el muro existe agua, habrá que calcular el empuje hidrostático.

➤ El empuje hidrostático es muy superior al del terreno, por lo que en la práctica se disponen dispositivos de drenaje para reducirlo.

Empuje activo en suelos cohesivos. Teoría de Rankine.

➤ El análisis se realiza en dos situaciones:

- ➊ Fallo sin drenaje (a corto plazo o instantáneo).
- ➋ Fallo con drenaje (a largo plazo).

➤ Se utiliza el mismo procedimiento que para rellenos granulares, aunque ahora **SI** hay cohesión.

➤ Esta cohesión puede producir que la parte superior del terreno "trabaje" a tracción y como eso no es posible se producirían grietas.

➤ Además, la cohesión varía con la humedad, y por tanto, el empuje del relleno.

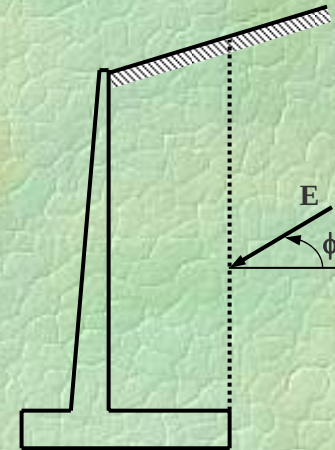
➤ Por ello, la normativa española recomienda: 1) no emplear suelos cohesivos como relleno, y 2) si ello no es posible, considerar el terreno como granular.



TEMA 8. EMPUJES DEL TERRENO.

Empuje activo en muros ménsula

- La existencia del talón modifica el cálculo, ya que si el muro deslizara o volcara, la masa de terreno que descansa sobre dicho talón le acompañaría.
- Por tanto, se la considera una parte más del muro.
- El empuje se calcula mediante la teoría de Coulomb, pero actuando sobre un trasdós virtual.
- Ahora el ángulo de rozamiento será ϕ .



Empuje en reposo: muros de sótano

- En este caso no se produce desplazamiento del muro, por lo que los empujes se corresponden con el estado en reposo.

$$K_0 = \frac{\sigma'_H}{\sigma'_V}$$

Tipo de suelo	K_0
Granular suelto	0'5 – 0'6
Granular denso	0'3 – 0'5
Cohesivo, blando	0'9 – 1'1
Cohesivo, duro	0'8 – 0'9

