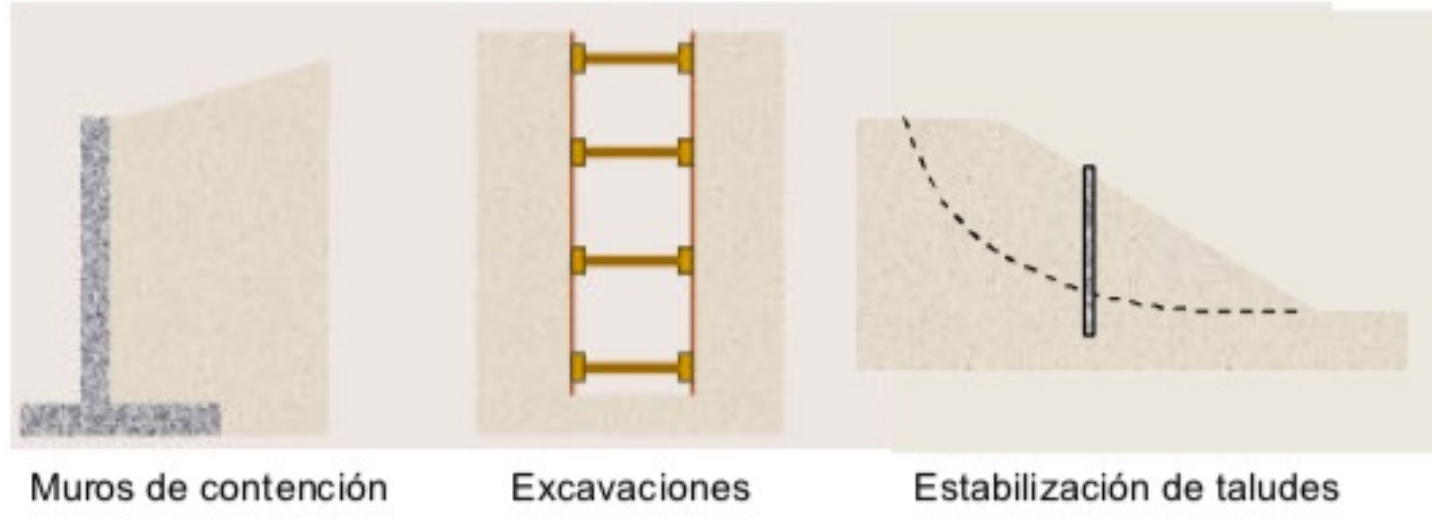


EMPUJE DE SUELOS

En proyectos de ingeniería civil es muy común tener que contener los empujes del suelo.

Es necesario estimar estos empujes para poder diseñar las estructuras de contención.



Las tres principales situaciones de diseño se pueden resumir en:

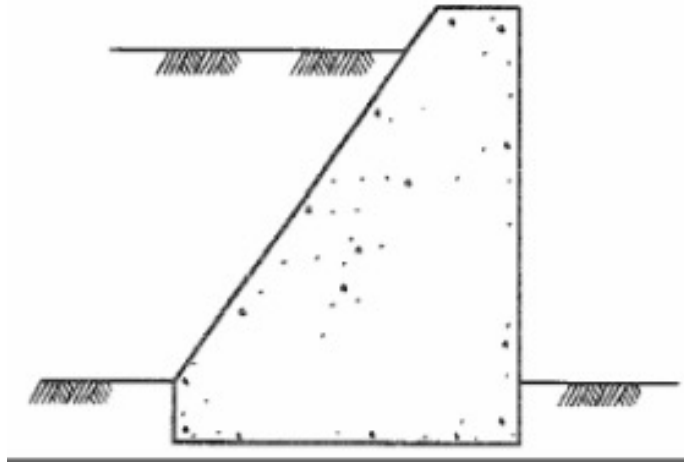
- Excavaciones
 - Es necesario distinguir las estructuras de contención temporales de las permanentes.
 - La estabilidad debe mantenerse en todas las etapas.
 - Control de deformaciones es por lo general el problema mas importante en la práctica.
 - Problemas asociados a la napa.
- Muros de contención
 - El relleno es especificado.
 - La compactación y el drenaje son aspectos importantes.
- Estabilización de taludes

Muros de contención:

- Un muro de contención es una estructura que se utiliza para proporcionar soporte lateral a un terreno, que en ocasiones es un suelo natural y en otras es un relleno artificial.
- Existen muchos tipos de estructuras de contención, cada una adecuada para diferentes aplicaciones.
- Se clasifica a los muros de contención en dos grandes categorías: sistemas estabilizados externamente y sistemas estabilizados internamente.
- Los sistemas estabilizados externamente resisten los empujes de tierra por su peso propio y rigidez.
- Los sistemas estabilizados internamente refuerzan el suelo para proveer la estabilidad necesaria.

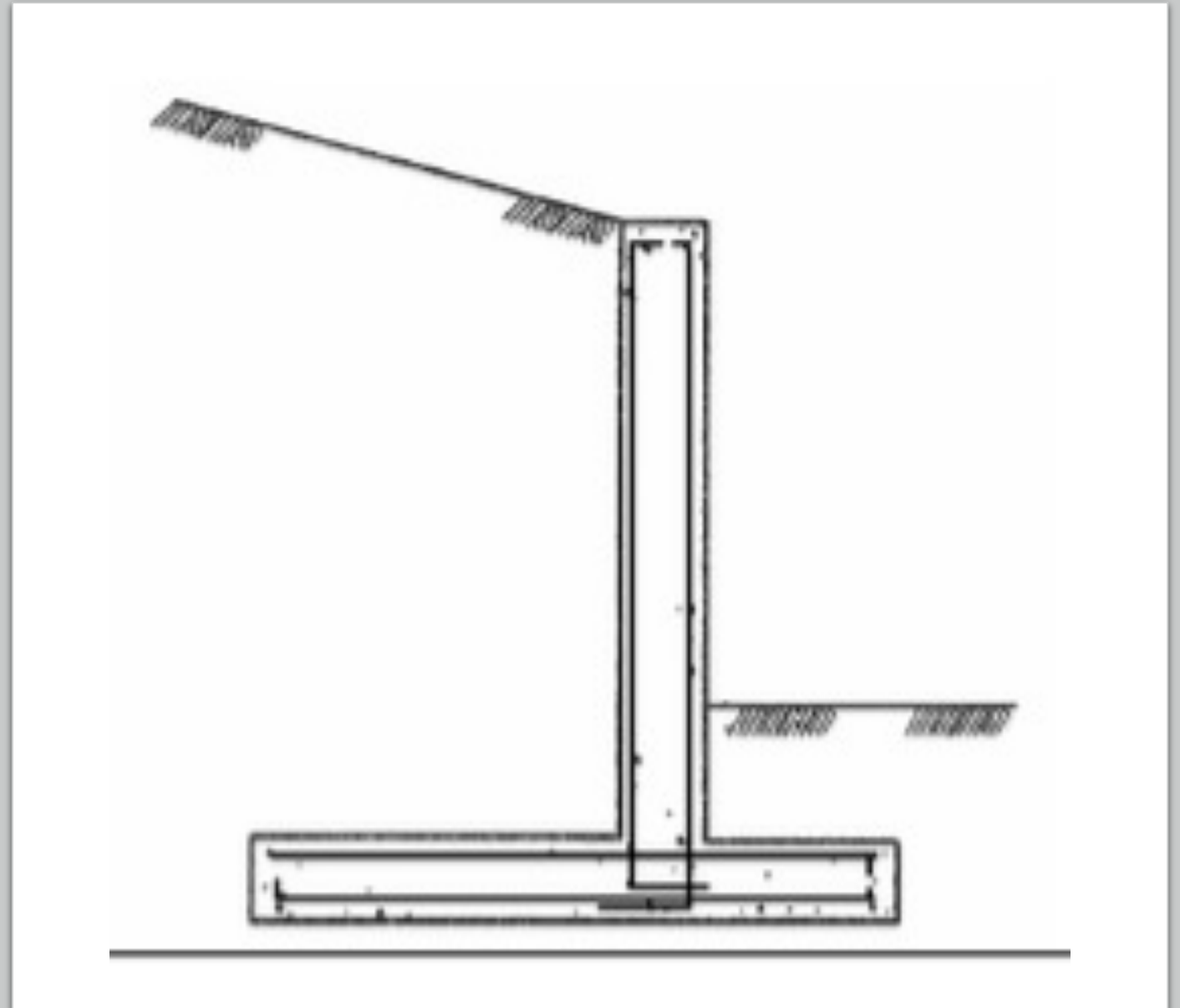
Muros gravitacionales

- Los muros de gravedad se construyen por lo general de hormigón o de mampostería en piedra, con un gran espesor, de tal manera que sean despreciables o no se produzcan los esfuerzos de tensión en ninguna parte de la estructura.
- El muro solo cuenta con su masa y su resistencia a la compresión para resistir las fuerzas que sobre el actúan.



Muros cantilever

- El muro cantilever (de hormigón armado) consta de un cuerpo vertical o alzado que contiene la tierra y se mantiene en posición gracias a la zapata o losa base.
- El peso del relleno por encima del talón, además del propio peso del muro, contribuye a la estabilidad de la estructura.



Muros criba

- El sistema está formado por vigas entrelazadas las cuales forman un armazón que se rellena con suelo granular.
- El conjunto actúa como un muro de gravedad y tiene la ventaja de permitir una tolerancia de asentamientos diferenciales apreciables.



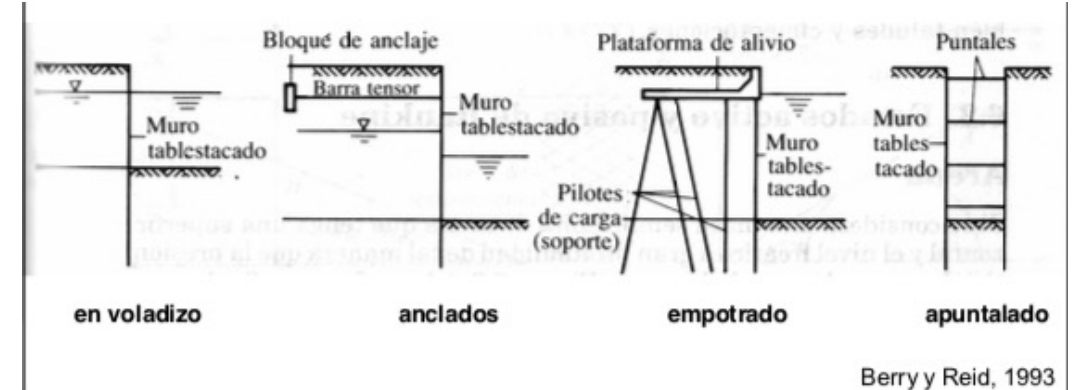
Gaviones

Los muros de gaviones están formados por cajas metálicas apiladas llenas de rocas o agregados, que por lo general tienen dimensiones de 1 m x 1 m de sección transversal por 2 m de largo.



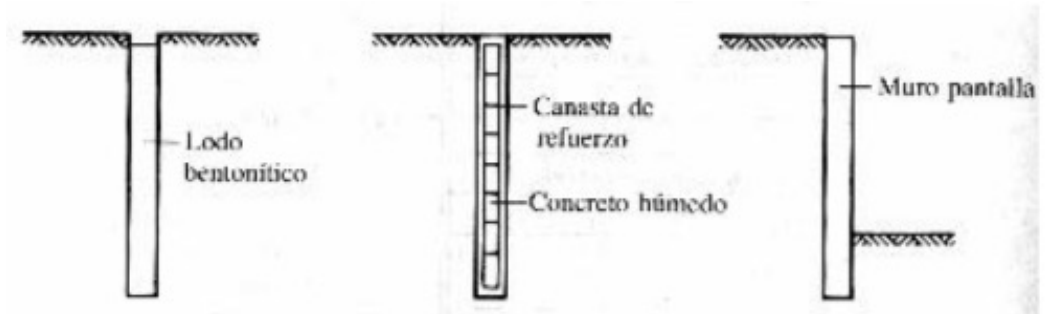
Tablestacas

- Están formados por delgados pilotes (entrelazados) que son hincados en el suelo.
- Son estructuras flexibles cuya estabilidad depende del anclaje en la parte empotrada, del soporte lateral, o de la fijación a una estructura rígida.



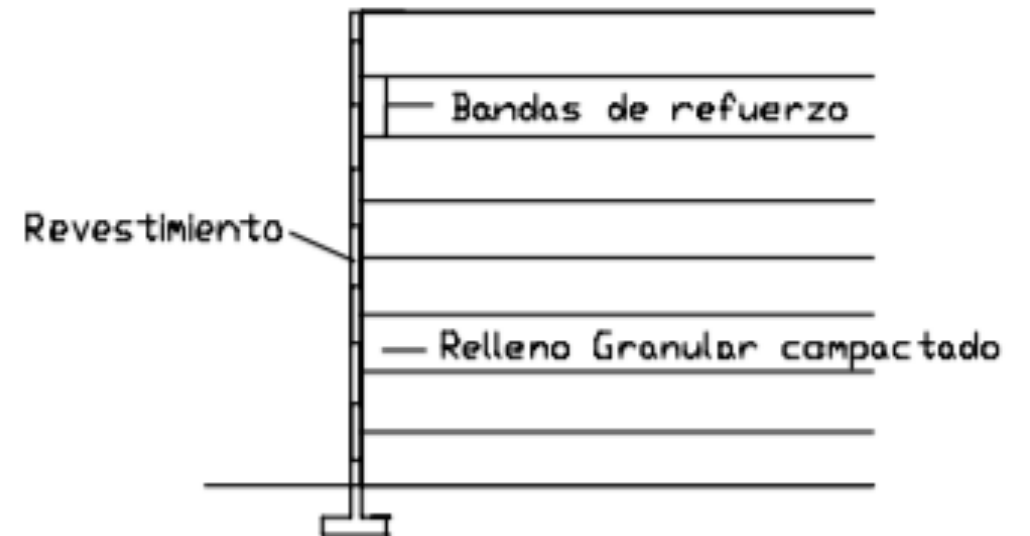
Muros pantalla

- Los muros pantalla se construyen en zanjas sostenidas mediante el uso de lodo bentonítico.
- Después de introducir la armadura se introduce el hormigón, el cual desplaza el lodo bentonítico.
- Finalmente se realiza la excavación.



Tierra armada

Se introducen bandas de refuerzo horizontales en un suelo granular con el fin de estabilizar la masa mediante la movilización de la resistencia a la fricción que tiene lugar en el suelo del entorno.



Tierra armada



Empujes de tierra

- La presión del terreno sobre un muro esta fuertemente condicionada por la deformabilidad del muro.
- Si el muro y el terreno sobre el que se fundan son tales que las deformaciones son prácticamente nulas, se está en el caso de empuje en reposo.
- Si el muro se desplaza, permitiendo la expansión lateral del suelo se produce una falla por corte del suelo retenido y se crea una cuña. El empuje disminuye desde el valor del empuje al reposo hasta el denominado valor del empuje activo, que es el mínimo valor posible del empuje.
- Por el contrario, si se aplican fuerzas al muro de forma que éste empuje al relleno, la falla se produce mediante una cuña mucho más amplia. Este valor recibe el nombre de empuje pasivo y es el mayor valor que puede alcanzar el empuje.

Caso en reposo

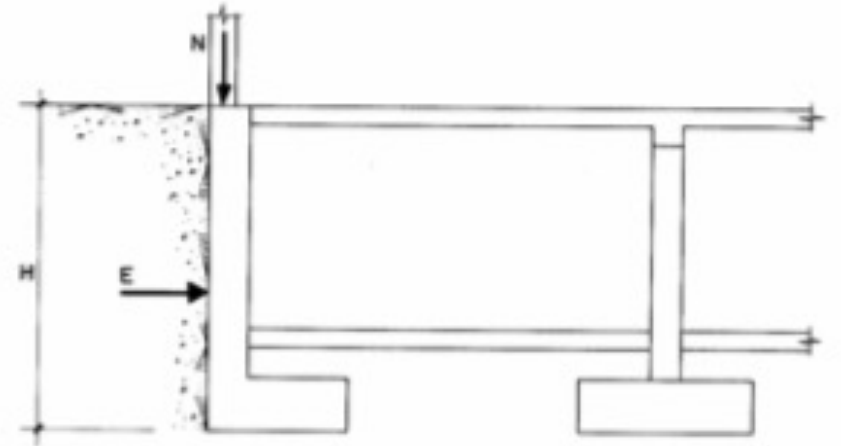
- Coeficiente de empuje de tierra en reposo

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

En suelos granulares:

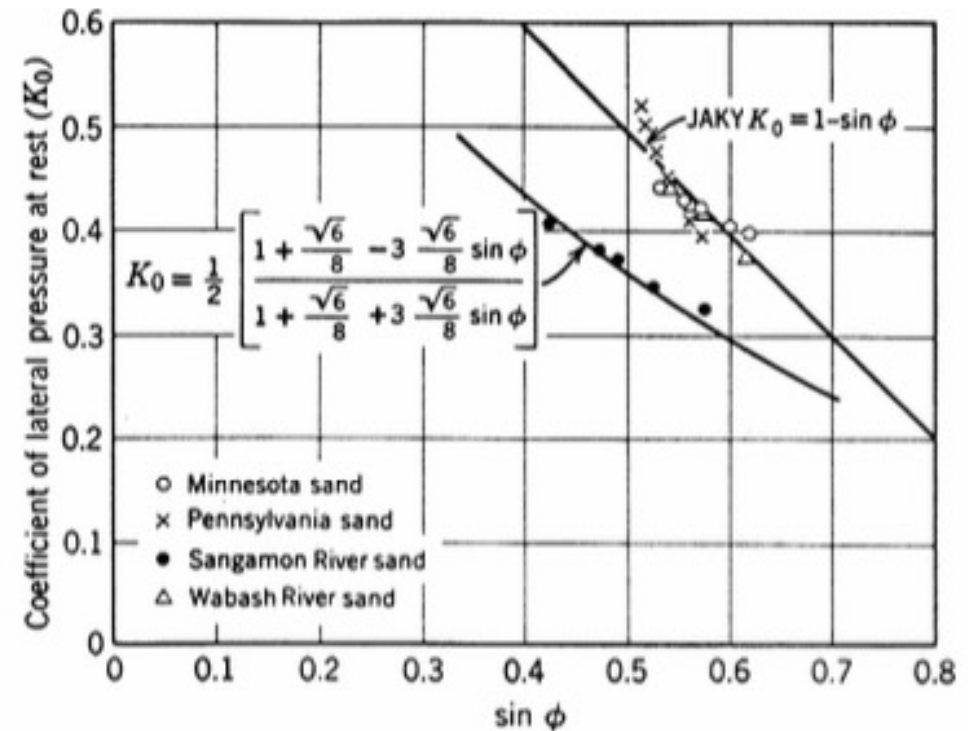
$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (\text{Jaky, 1944})$$

- Por lo general, los muros de subterráneos se diseñan con los empujes en repo



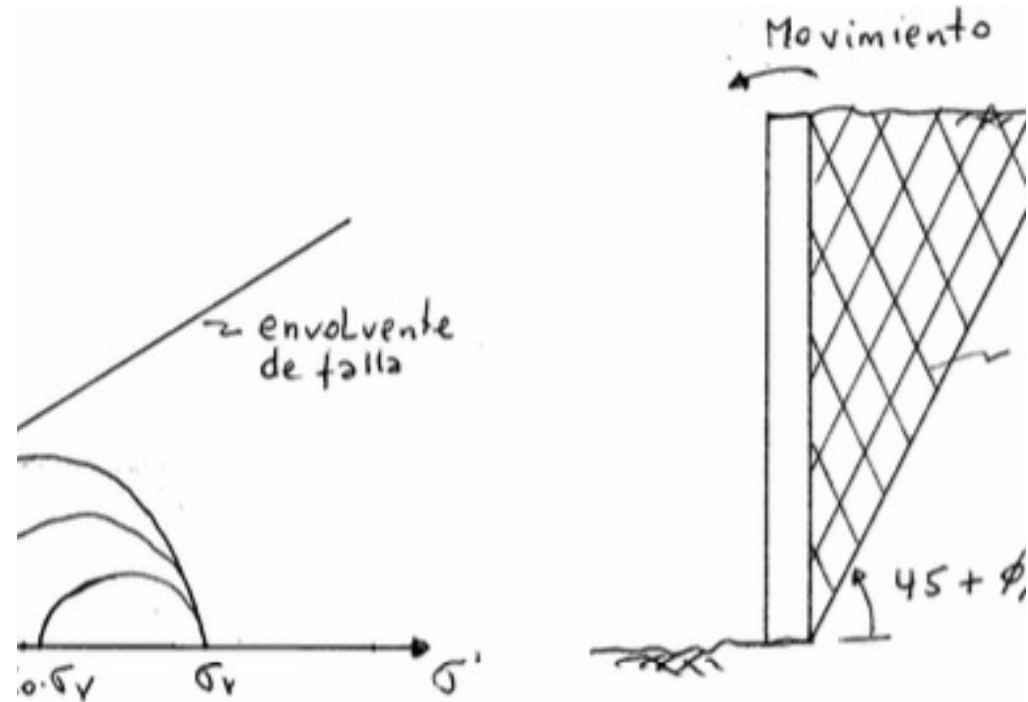
Caso en reposo (cont.)

- La expresión propuesta por Jaky (obtenida experimentalmente) utiliza el ángulo de fricción en la falla (peak).
- En algunos casos esta expresión puede no ser la más adecuada, sin embargo tiende a entregar buenos resultados.



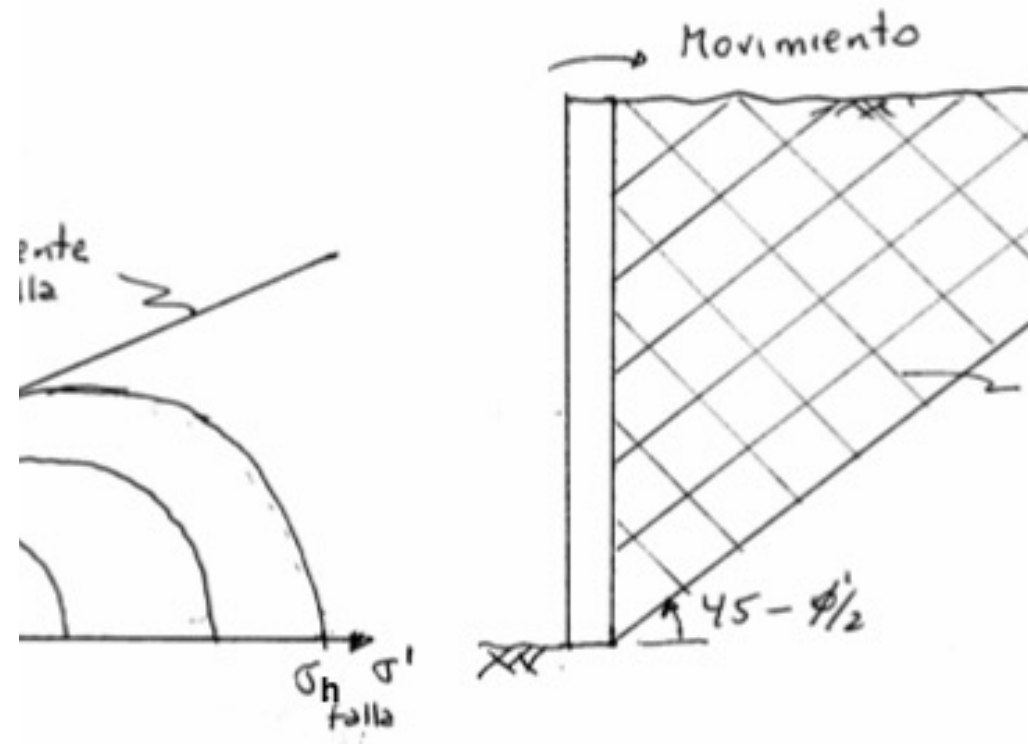
Caso activo

- Si el muro se mueve (traslación o rotación) hacia fuera los esfuerzos horizontales disminuyen.
- Finalmente se puede alcanzar la falla por corte, desarrollándose una cuña activa.



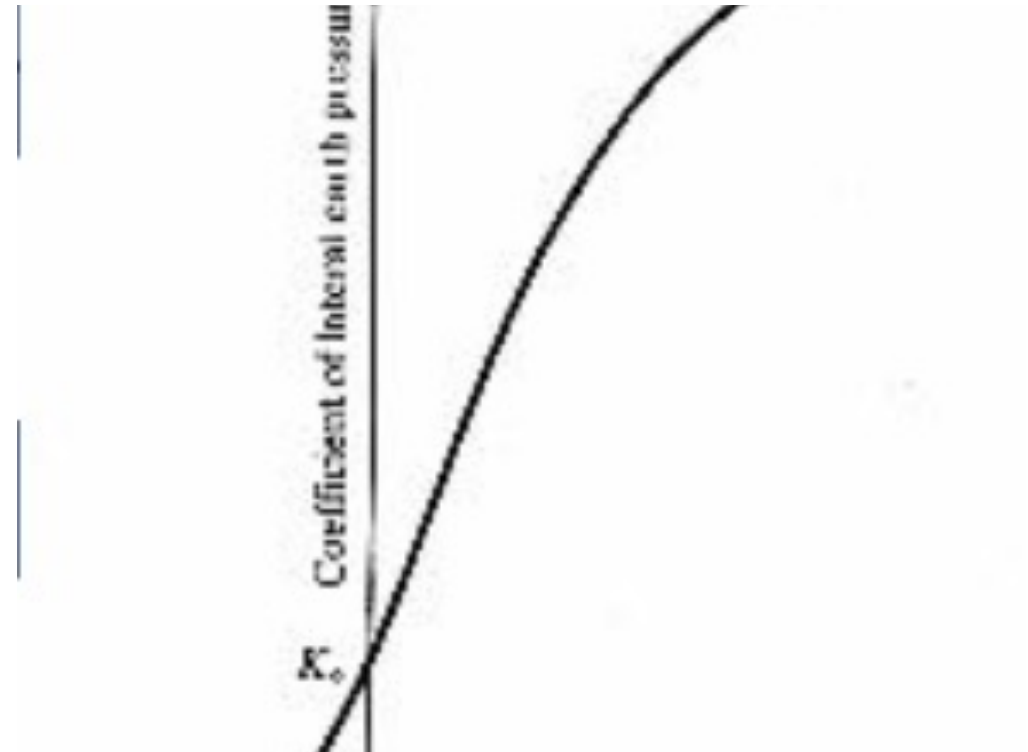
Caso pasivo

- Si el muro se mueve hacia el suelo, los esfuerzos horizontales aumentan.
- Finalmente se puede alcanzar la falla por corte, desarrollándose una cuña activa.



Desplazamiento necesario para alcanzar el caso activo y pasivo

- Basta un pequeño desplazamiento para producir una cuña activa ($\approx 0.001H$ en suelo granular suelto; H : altura del muro).
- El empuje pasivo se moviliza en su totalidad con una gran deformación ($\approx 0.02H$ en suelo granular denso).
- Muros no impedidos de rotar libremente en su base están sujetos por lo general a una pequeña rotación y se diseñan con el empuje activo.



Teoría de Rankine

Rankine desarrolló su teoría a mediados del siglo XIX, asumiendo que:

El suelo es homogéneo e isotrópico.

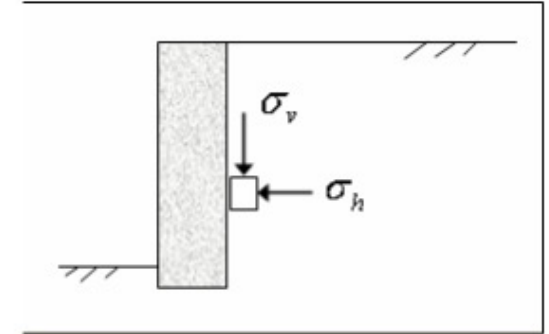
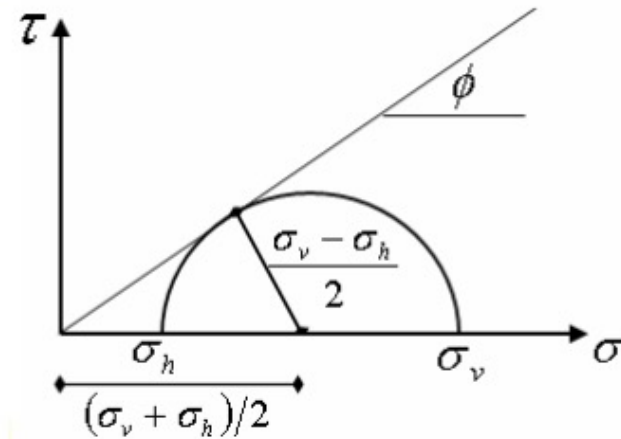
La superficie de falla es plana.

La superficie posterior del muro es vertical.

No existe fricción entre el suelo y la parte posterior del muro.

Estado de Rankine (caso activo)

En un terreno sin cohesión ($c=0$) y con una superficie horizontal se tiene:



En la falla:

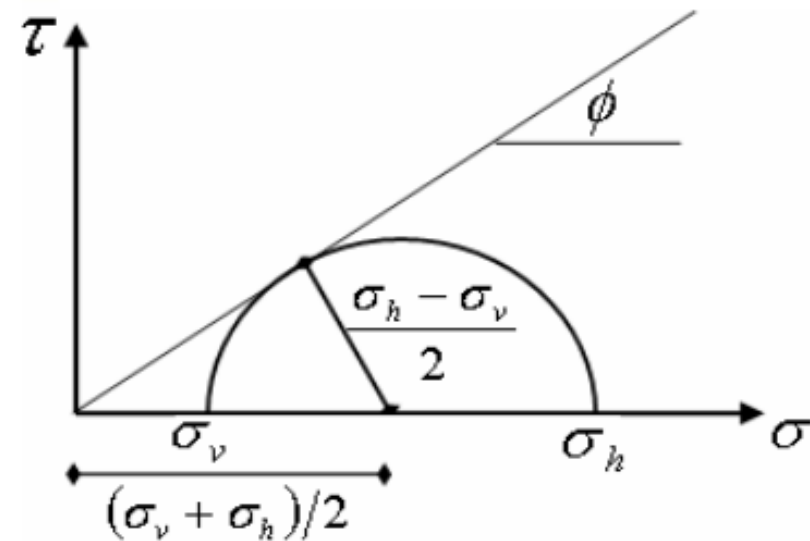
$$\text{sen}(\phi) = \frac{(\sigma_v - \sigma_h)/2}{(\sigma_v + \sigma_h)/2}$$

$$K_a = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \frac{1 - \text{sen} \phi}{1 + \text{sen} \phi} = \tan^2 (45 - \phi/2)$$

K_a : coeficiente lateral de empuje activo

Estado de Rankine (caso pasivo)

- En un terreno sin cohesión ($c=0$) y con una superficie
- horizontal se tiene:



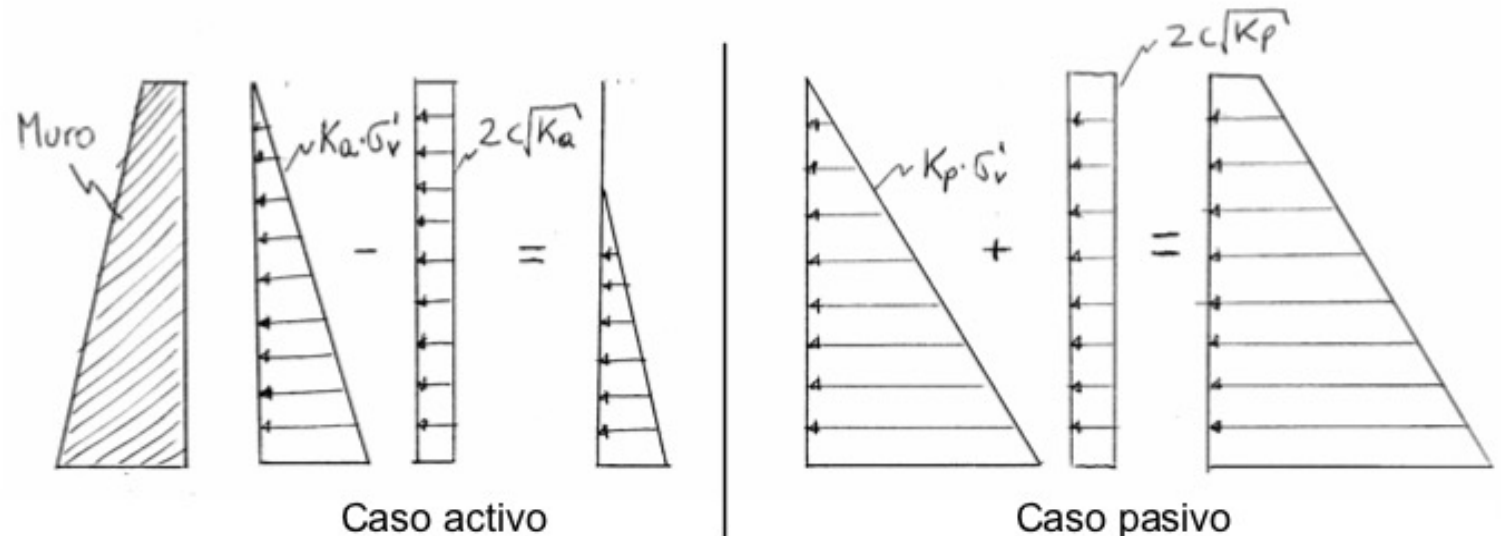
$$K_p = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \tan^2(45 + \phi/2) \quad K_p: \text{coeficiente lateral de empuje pasivo}$$

Estados de Rankine (en suelos cohesivos)

$$\sigma'_{h \text{ activo}} = K_a \sigma'_v - 2c\sqrt{K_a}$$

$$\sigma'_{h \text{ pasivo}} = K_p \sigma'_v + 2c\sqrt{K_p}$$

La distribución de esfuerzos en ambos casos es:



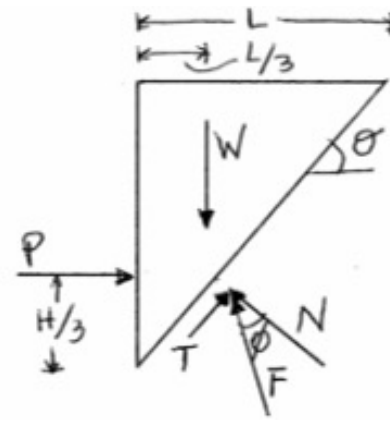
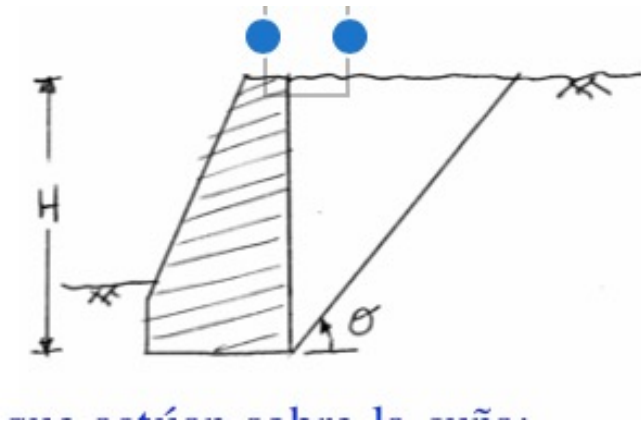
Teoría de Coulomb (método de la cuña), 1776

El método de Coulomb considera la fricción entre el muro (trasdós) y el terreno, y es mas general que el desarrollado por Rankine.

El método considera una cierta cuña de suelo, la cual ejerce una fuerza P sobre el muro, fuerza que satisface las condiciones de equilibrio.

La fuerza real que actuará sobre el muro en el caso activo será el valor máximo de P obtenido al considerar todas las cuñas posibles.

A pesar de que el empuje activo es el mínimo posible con el que el terreno puede estar en equilibrio, debemos determinar la cuña correspondiente al máximo valor de este empuje.



Método de la cuña

Caso sencillo

- En caso sencillo de un muro de contención vertical, sin roce a trasdós, relleno horizontal y sin cohesión.

Fuerzas que actúan sobre la cuña:

W : peso del suelo = $\frac{1}{2} \gamma H^2 \cotg(\theta)$

P : Resultante de las presiones existentes entre el suelo y el muro.

N : Resultante de los esfuerzos normales sobre el plano de falla elegido.

T : Resultante de los esfuerzos tangenciales sobre el plano de falla elegido = $N \tan(\varphi)$

Método de la cuña

Condiciones de equilibrio:

$$\sum F_v = 0 \Rightarrow W = F \cos(\theta - \phi)$$

$$\sum F_h = 0 \Rightarrow P = F \operatorname{sen}(\theta - \phi)$$

$$P = \frac{W}{\cos(\theta - \phi)} \operatorname{sen}(\theta - \phi) = W \tan(\theta - \phi) = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan(\theta - \phi) \cotan(\theta)$$

La cuña activa (θ_{activa}), es decir la que da el valor máximo de P (empuje activo) se puede calcular iterando o derivando la expresión $P(\theta)$.

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[-\frac{\tan(\theta - \phi)}{\operatorname{sen}^2(\theta)} + \frac{\cotan(\theta)}{\cos^2(\theta - \phi)} \right] = 0 \quad (\text{Ver Lambe y Whitman, página 186})$$

Esta expresión se anula para $\theta_{\text{activo}} = 45 + \phi/2$

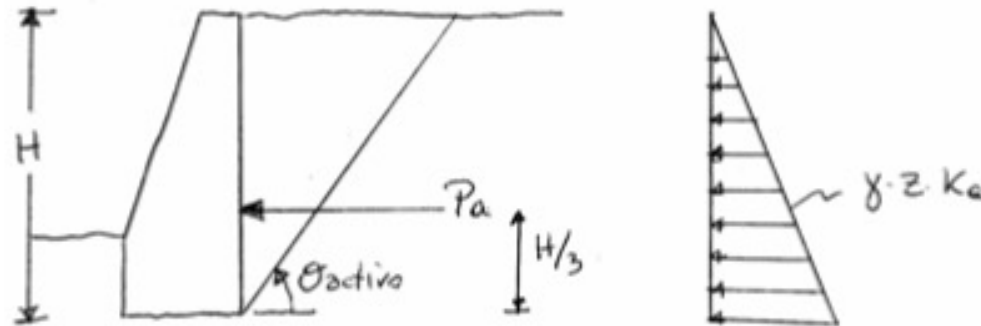
Metodo de la cuña

Remplazando θ_{activo} en la expresión de P se obtiene:

$$P_a = P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 (45 - \phi/2) = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

$$\Rightarrow K_a = \tan^2 (45 - \phi/2) = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)}$$

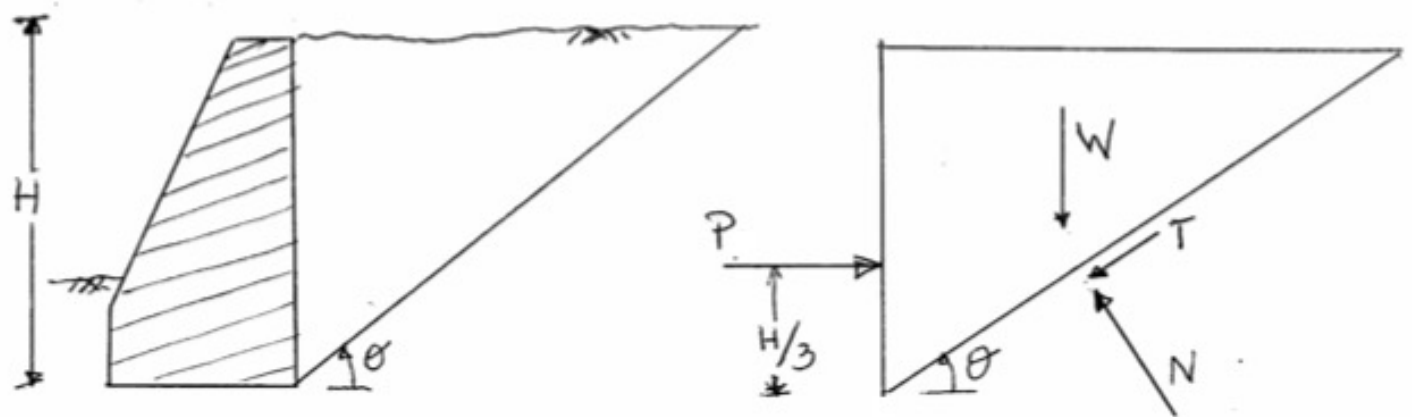
Se asume que P_a actúa a un tercio de la altura del muro ($H/3$) y que la distribución de empujes es lineal.



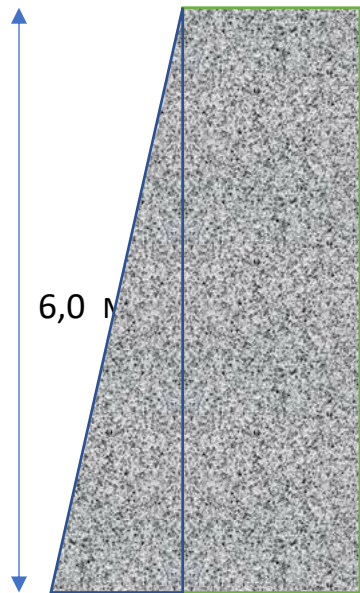
Caso pasivo

- El método de la cuña para el caso pasivo es igual al del caso activo, pero con la diferencia que los esfuerzos tangenciales sobre la superficie de deslizamiento actúan junto con el peso del suelo W oponiéndose al empuje horizontal P que se ejerce sobre el muro.

Aunque el empuje pasivo es el máximo posible para el cual se suelo puede mantenerse en equilibrio, debe determinarse la cuña que da lugar al menor valor de este empuje.



EJERCICIO:



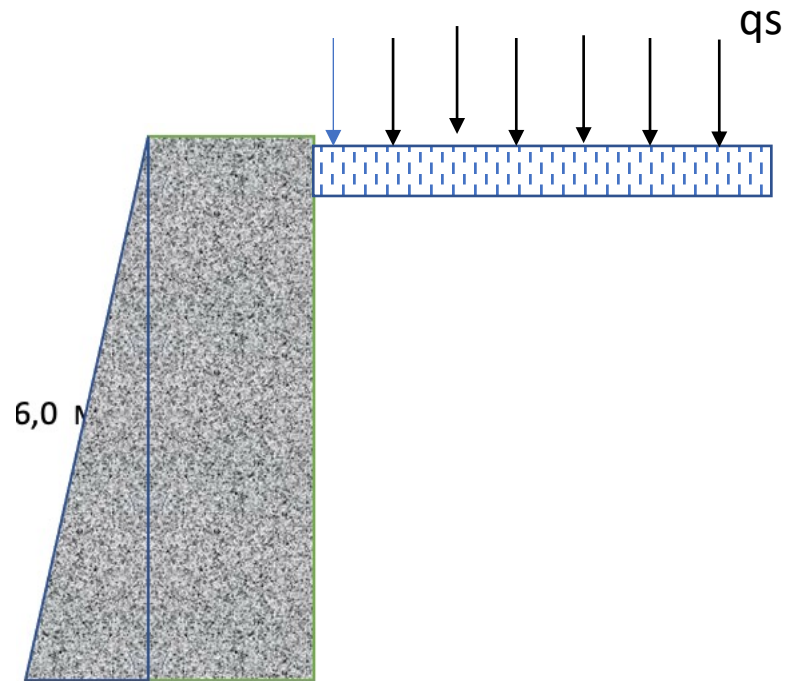
$$\gamma = 1,8 \text{ tn}$$

$$\phi = 30^\circ$$

Calcular para el estado activo:

- a.- Las presiones horizontales en la base del muro
- b.- Empuje horizontal total
- c.- Posición del empuje

EMPUJE ACTIVO CON SOBRECARGA UNIFORME



Puede deberse a material almacenado o vehículos estacionados.

$$\sigma_v = q_s + \gamma z$$

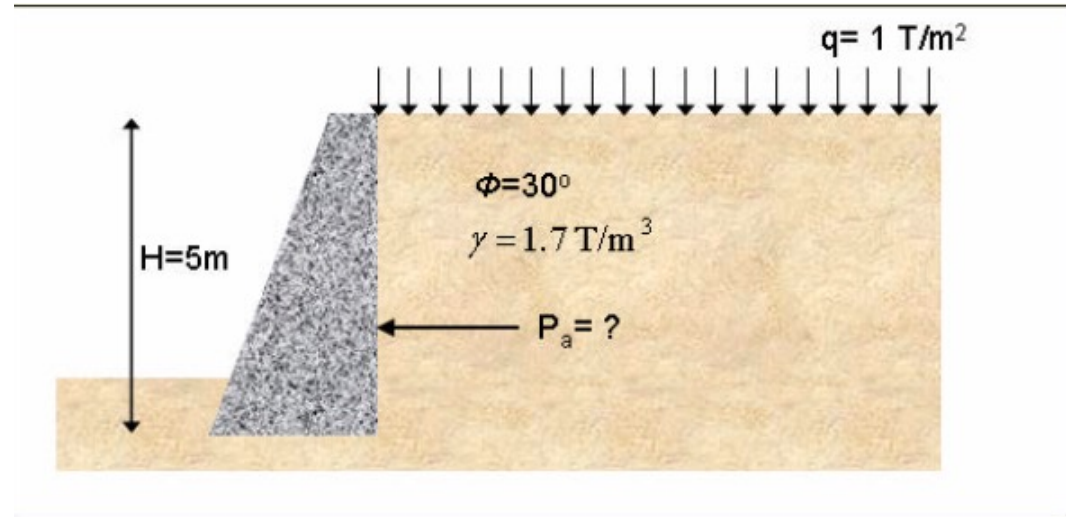
$$\sigma_h = (q_s + \gamma z) \frac{1 - \sin f}{1 + \sin f} = (q_s + \gamma z) K_a$$

Empuje total activo:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a + q_s H K_a$$

Ejercicio

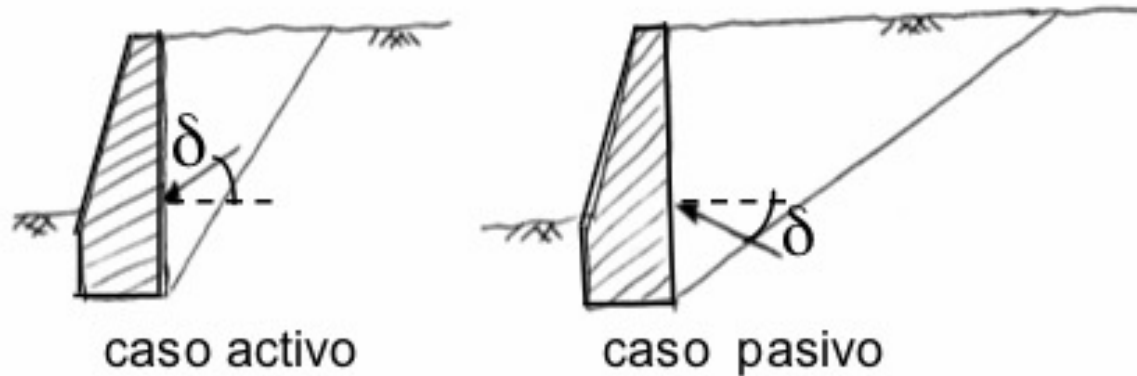
Calcular el empuje activo para el muro de contención de la figura utilizando los métodos de Rankine y de Coulomb. El relleno es un suelo granular sin cohesión, además no considere el roce muro-suelo a trasdós.



Muros con fricción a trasdós

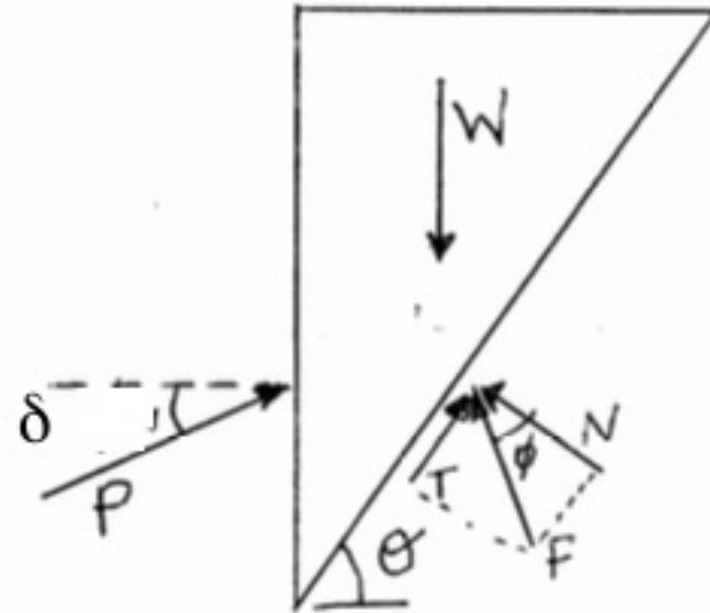
- En general se desarrollan fuerzas tangenciales entre el suelo y muro debido a los movimientos relativos entre ambos.
- En la zona activa, el desplazamiento del suelo produce una fuerza tangencial hacia abajo sobre el muro.
- El ángulo de fricción entre el suelo y el muro δ se considera por lo general como una fracción del ángulo de fricción del suelo.

$$\delta \approx \frac{1}{2}\phi \quad \text{ó} \quad \frac{2}{3}\phi$$



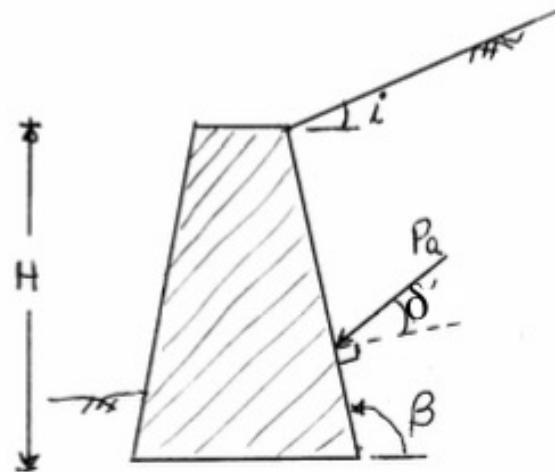
Muros con fricción a trasdós

- Empuje activo mediante el método de la cuña
- Se asume que la superficie de falla es recta, lo cual es una aproximación.
- La figura muestra las fuerzas que actúan en la cuña activa, en donde P esta inclinado en lugar de horizontal.
- La inclinación de la superficie de falla ya no es $45 + \phi/2$.



Caso mas general

- El método de las cuñas se generalizó para muros de retención inclinados y superficies del terreno también inclinadas, teniendo en cuenta la fricción del muro.
- La inclinación de P con respecto a la normal del muro es δ .
- La expresión de K_a fue deducida por Coulomb en 1776 por el método de la cuña con superficie de deslizamiento plana.



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

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

Efecto de la cohesión

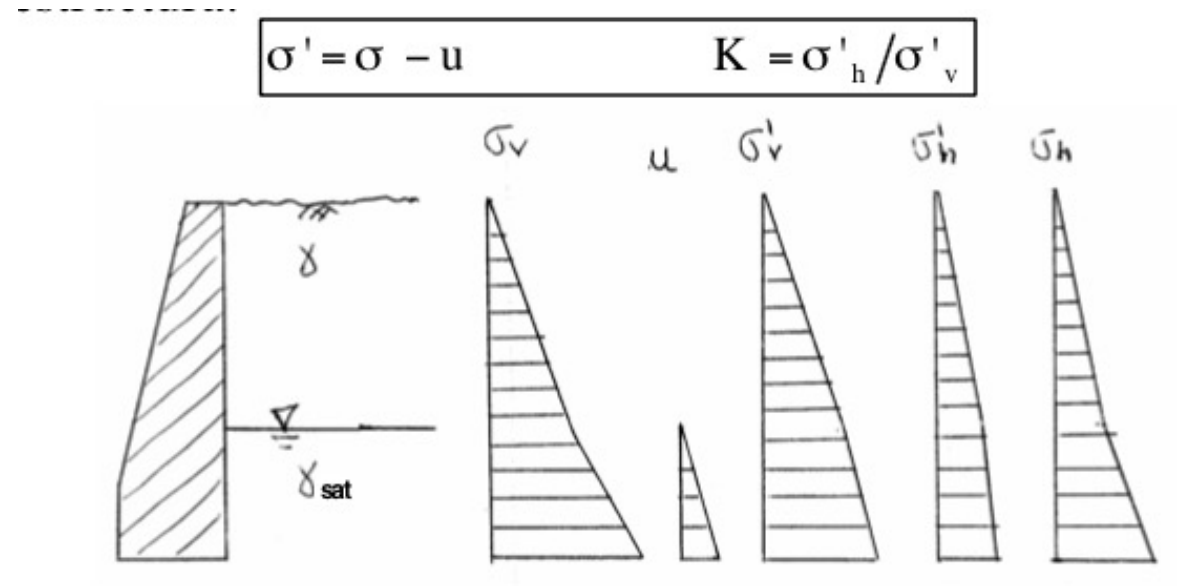
La ecuación anterior (caso general) se dedujo para $c=0$ y su empleo para $c>0$ es aproximado ya que los esfuerzos horizontales y verticales no son los principales.

$$P_a \approx \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2 c H \sqrt{K_a}$$

- Por lo general no se considera el efecto de la cohesión en el cálculo del roce muro-suelo a trasdós.
- Se recomienda utilizar materiales no cohesivos como materiales de relleno ya que son más predecibles que los materiales cohesivos y tienen mejores propiedades de drenaje.

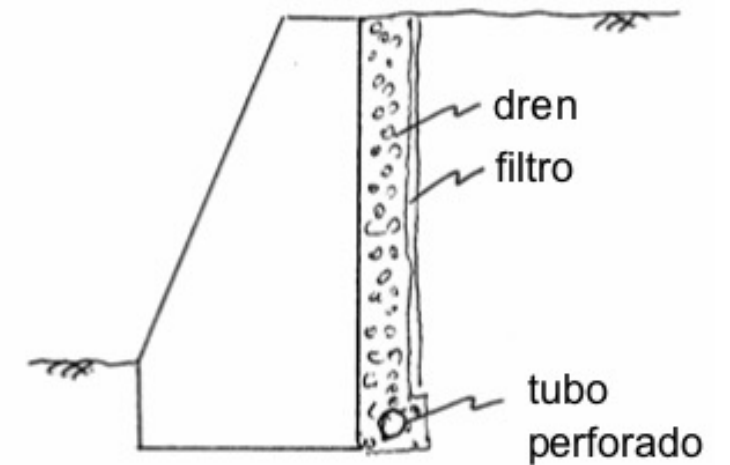
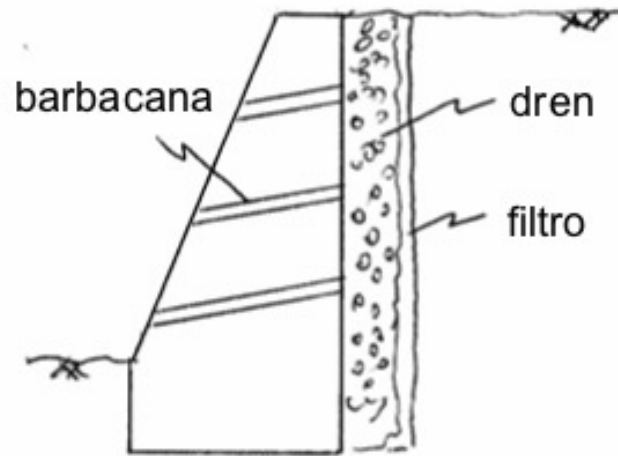
Efecto de la napa de agua

- Si el aporte de agua (por la acción de la lluvia, infiltraciones subterráneas, etc.) excede a la capacidad de desagüe, el nivel del agua puede subir a niveles por sobre la base del muro.
- La existencia de una napa de agua influye considerablemente en el empuje sobre el muro y por ende en la estabilidad de la estructura.



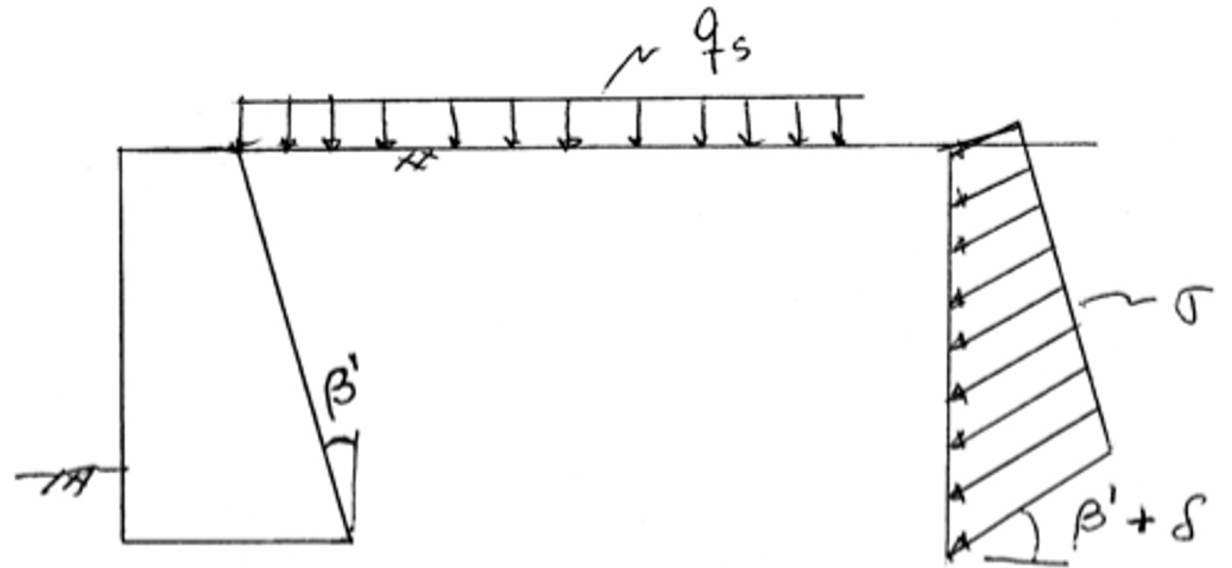
Drenaje

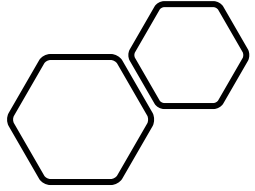
- Para eliminar o disminuir el efecto de la napa de aguas se utilizan sistemas de drenaje que evacuen el agua.
- Una solución es utilizar barbacanas con un sistema de drenaje y filtro.
- Otra solución es utilizar un drenaje posterior con un tubo recolector en la base.



Efecto de la sobrecarga

$$\sigma = (\gamma z + q_s) K_a$$

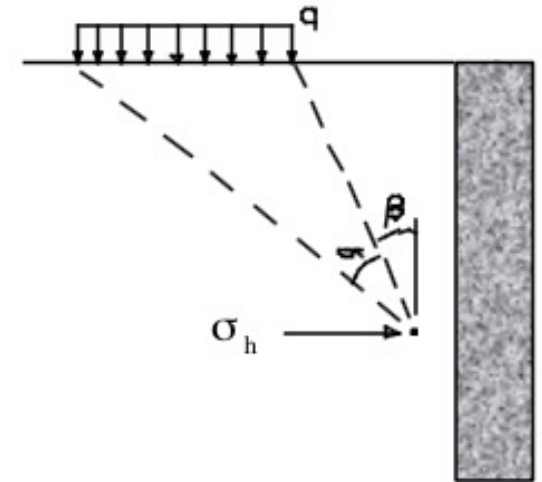




Efecto de la sobrecarga

$$\sigma_h = F \frac{q}{\pi} (\alpha - \sin(\alpha) \cos(\alpha + 2\beta))$$

- Sobrecarga uniforme aplicada sobre una franja “finita”
- Dependiendo de la ubicación y magnitud de la sobrecarga, el ángulo de la superficie de deslizamiento puede variar; sin embargo se esta por el lado de la seguridad, ya que el ángulo de desplazamiento original entrega el mayor empuje sobre el muro.
- El incremento de esfuerzo horizontal en un punto a una profundidad z , producido por una presión uniforme q que actúa sobre una franja flexible es:

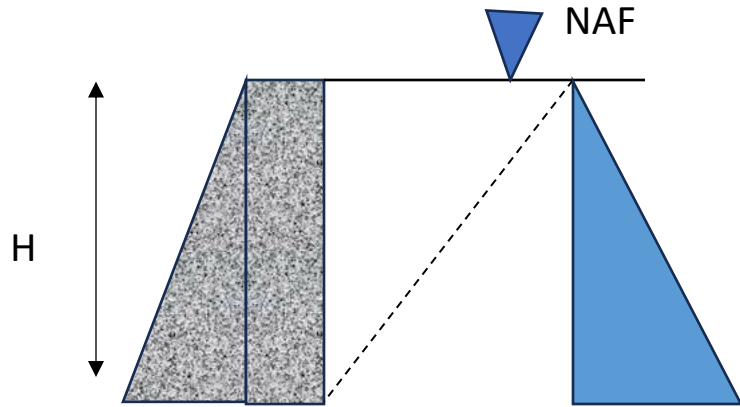




Efecto de la sobrecarga

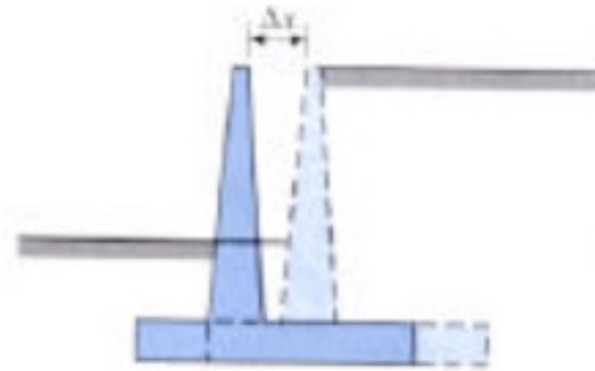
- En muros rígidos el aumento de presión provocado por la imposibilidad de deformación es equivalente a la acción de una carga ficticia igual y simétrica en relación del plano del muro, y tiene por efecto duplicar el valor. Estos resultados han sido prácticamente confirmados por las experiencias de Spanger en 1938.
 - El factor F se aplica al empuje y debe estar en un rango desde 1 si se considera al muro como flexible hasta 2 si se considera como rígido.
- 
- 

Muros de retención Sumergidos:

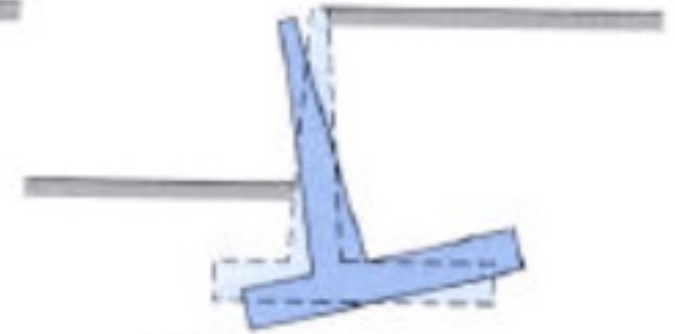


$$Ea = \frac{1}{2} \times \gamma \times H^2$$

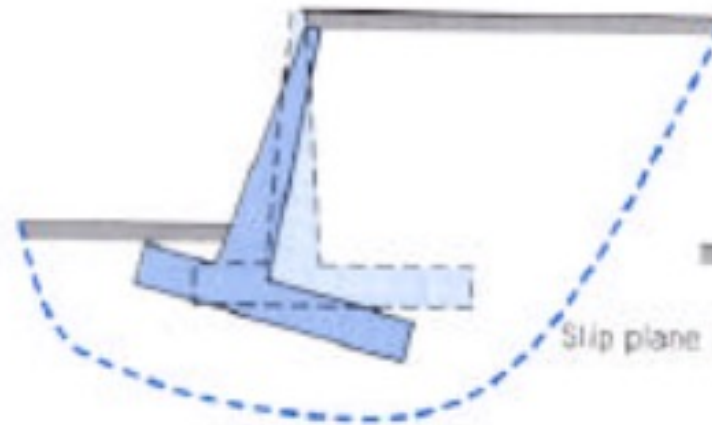
Modos de falla en muros rígidos



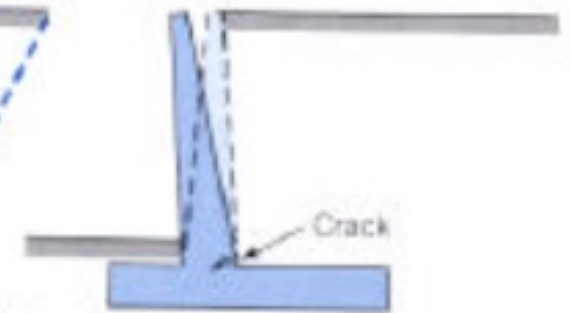
Falla por traslación



Falla por rotación



Falla por estabilidad global



Falla estructural