• EMPUJE DE TIERRAS.

Se supone un terreno horizontal. Las tensiones sobre los planos horizontales aumentan linealmente con la profundidad. Las tensiones sobre los planos verticales aumentan tambiÃ©n de una manera regular. La relaciÃ³n entre ambas es el coeficiente *K0* de “empuje al reposo”, que no tiene por quÃ© ser constante con la profundidad:

Si se introduce una pantalla infinitamente rÃgida y se excava en uno de sus lados, la acciÃ³n de las tierras sobre la pantalla seguirÃ¡ siendo el empuje al reposo.

Si la pantalla no fuese infinitamente rÃgida y cediese un poco, la pantalla se separa del terreno y el empuje decrece. Si la pantalla se sigue moviendo el terreno acabarÃ¡ por romperse, formÃ¡ndose una cuÃ±a de empuje. Se entra en un rÃ©gimen plÃ¡stico donde el empuje no varÃa mÃ¡s que un poco y el movimiento se hace constante. Se habla entonces de un estado de empuje activo, definido por el “coeficiente de empuje activo”, *Ka*.

En el caso de que el movimiento sea comprimiendo el terreno, entonces las tierras oponen un efecto “pasivo”. Se entra en un estado de “empuje pasivo”, definido por el coeficiente *Kp*.

En los muros de contenciÃ³n, debido al empuje del terreno, el cuerpo del muro puede girar respecto al pie, de tal manera que el cuerpo se encuentra en un estado de empuje activo, mientras que el pie estÃ¡ sometido a un estado de empuje pasivo.

• MÃ TODOS PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE EMPUJE.
• MÃ©todo de Rankine.

La teorÃa de Rankine se desarrolla para un medio elÃ¡stico, que se caracteriza por ser granular homogÃ©neo y seco, y plantea las siguientes hipÃ³tesis iniciales:

- El trasdÃ³s del muro es vertical.
- La superficie del terreno es horizontal.
- El terreno puede estar estratificado horizontalmente.
- El nivel freÃ¡tico es horizontal.
- No hay rozamiento entre el terreno y el muro.
- El terreno alcanza una situaciÃ³n de rotura.

El hecho de que no haya rozamiento entre el terreno y el muro origina que no haya tensiones tangenciales en los puntos interiores del terreno, y por tanto, la tensiÃ³n horizontal es una tensiÃ³n principal.

Si se toma un elemento de suelo en reposo y se determinan sus tensiones normales horizontal y frontal, se puede obtener su correspondiente cÃrculo de Mohr ya que la tensiÃ³n horizontal y vertical son tensiones principales:

Ï v = Î³ Â· z Ï h = K0 Â· Ï v

Si a continuaciÃ³n se comienza a descargar el terreno, el valor de la tensiÃ³n horizontal irÃ¡ descendiendo, y por tanto, irÃ¡n a pareciendo diferentes cÃrculos de Mohr para los diferentes valores de Ï h. LlegarÃ¡ un momento en el que el valor de Ï h sea tal que el cÃrculo de Mohr correspondiente sea tangente a la lÃnea de resistencia del terreno. En ese momento se habrÃ¡ alcanzado el estado de empuje activo. AsÃ pues:

AB = OA Â·sen *Ï* ' â

Por tanto:

Si por el contrario lo que se hace es comprimir el terreno, el valor de la tensiÃ³n horizontal aumenta sobrepasando a la tensiÃ³n vertical hasta que llega un momento en que el cÃrculo de Mohr correspondiente es tambiÃ©n tangente a la lÃnea de resistencia del terreno. Se habrÃ¡ alcanzado el estado de empuje pasivo. AsÃ pues:

AB = OA Â·sen Ï ' â

Por tanto:

Se puede observar que si Ï ' = 30Âº, entonces: K0 = 1/2, Ka = 1/3 y Kp = 3.

En el caso de que el terreno no sea homogÃ©neo la tensiÃ³n vertical serÃ¡ la suma de los productos de los diferentes pesos especÃficos por su cota:

Ï v = Î£Î³ Â· Î z Ï h = K0 Â· Ï v

Con ello, el coeficiente de empuje activo serÃ¡ diferente para cada capa. AdemÃ¡s, la ley de tensiones horizontales presentarÃ¡ discontinuidades como consecuencia de los diferentes Ã¡ngulos de rozamiento interno de cada capa, mientras que la ley de tensiones verticales serÃ¡ continua.

La presencia del nivel freÃ¡tico tambiÃ©n afecta a las tensiones verticales:

Ï v = Î³ Â· zw + Î³' Â· (z - zw) Ï h = K0 Â· Ï v

AdemÃ¡s, la presiÃ³n que ejerce el agua serÃ¡ tal que:

ew = Î³w Â· (z - zw)

En esta caso no hay discontinuidad en la ley de tensiones horizontales, ya que el hecho de que el terreno estÃ© hÃºmedo o seco no afecta prÃ¡cticamente al Ã¡ngulo de rozamiento interno del terreno.

- **Rozamiento entre tierra y muro.**

La resistencia al corte en el contacto entre un suelo cohesivo y un material de construcciÃ³n viene dada por una ecuaciÃ³n del tipo:

Ï Î´ = af + Ï   Â· tg Î´f

af = adherencia mÃ¡xima Î´f = Ã¡ngulo de rozamiento lÃmite entre tierras y muro

El rozamiento no puede ser nunca superior a la resistencia al corte de un terreno, por lo que los valores de af y Î´f suelen obtenerse en funciÃ³n de la cohesiÃ³n y del Ã¡ngulo de rozamiento interno del terreno:

	Acabado superficial	Arena gruesa		Limo sin cohesiÃ³n			Suelo granular cohesivo (1/2 arcilla y 1/2 arena)	Arcilla	
				Seca	Saturada	Seco	Saturado		

			Densa		Denso	Flojo	Denso	Ã ndice de fluidez 0-0.5		Ã ndice de fluidez 0-0.27	
			Î´f/Ï '	Î´f/Ï '	Î´f/Ï '	Î´f/Ï '	Î´f/Ï '	Î´f/Ï '	af/c	Î´f/Ï '	af/c
Acero	Liso (pulido)	0.54	0.64	0.79	0.40	0.68	0.40	-	0.50	0.25	0.50
	Rugoso (oxidado)	0.76	0.80	0.95	0.48	0.75	0.65	0.35	0.50	0.50	0.80
Madera	Rozamiento paralelo a las fibras	0.76	0.85	0.92	0.55	0.87	0.80	0.20	0.60	0.40	0.85
	Id perpendicular a las fibras	0.88	0.89	0.98	0.63	0.95	0.90	0.40	0.70	0.50	0.85
HormigÃ³n	Liso (encofrado metÃ¡lico)	0.76	0.80	0.92	0.50	0.87	0.84	0.42	0.68	0.40	1.00
	Aspero (encofrado de madera)	0.88	0.88	0.98	0.62	0.96	0.90	0.58	0.80	0.50	1.00
	Rugoso (vertido sobre un terreno preparado)	0.98	0.90	1.00	0.79	1.00	0.95	0.80	0.95	0.60	1.00

- **MÃ©todo de Coulomb.**

Esta teorÃ−a es muy anterior a las restantes teorÃ−as de plasticidad. Se basa en suponer que al moverse el muro bajo la acciÃ³n del empuje de las tierras, se produce el deslizamiento de una cuÃ±a de terreno limitada por el trasdÃ³s y por un plano que pasa por el pie del muro.

Se supone que el drenaje del muro funciona bien y que no hay presiones intersticiales en el terreno. Para calcular el empuje se supone un plano de deslizamiento arbitrario *AC*. La cuÃ±a *BAC* estarÃ¡ en equilibrio bajo la acciÃ³n del peso que gravita sobre ella, *W*, del empuje del trasdÃ³s sobre el terreno, *E*, y de la reacciÃ³n de la masa de suelo sobre la cuÃ±a, *F*. La reacciÃ³n, *F*, forma un Ã¡ngulo *Ï '* con la normal a *AC*.

Como se conoce *W* en magnitud y direcciÃ³n, y *E* y *F* en direcciÃ³n, se puede hallar su valor mediante la construcciÃ³n de un polÃ−gono de fuerzas.

El mÃ©todo de Coulomb consiste en tantear diversos planos *AC* y hallar los empujes correspondientes. El mÃ¡ximo empuje hallado de este modo es el empuje activo de Coulomb.

La inclinaciÃ³n real de *F* serÃ¡ menor o igual que *Ï '*, luego el empuje real serÃ¡ igual o superior que el hallado en la figura. Esto serÃ¡ cierto para cualquier posiciÃ³n de *AC*, por lo que el mÃ©todo de Coulomb obtiene un empuje menor al real, siempre que el valor de *Ï '* empleado corresponda a la envolvente de Mohr en deformaciÃ³n plana.

- **MÃ©todo de Culmann.**

La construcciÃ³n de polÃgono de fuerzas queda simplificada mediante el artificio de girar todas las fuerzas un Ã¡ngulo en sentido horario.

Con esta rotaciÃ³n los pesos quedan situados sobre la *lÃnea de talud natural* o sea, formando un Ã¡ngulo *Ï* ' con la horizontal. Las reacciones, *F*, quedan situadas sobre los planos de rotura escogidos. Los empujes, por Ãºltimo, quedan paralelos a una recta que forma el Ã¡ngulo (Ï ' + Î´) con el trasdÃ³s, y definen una curva cuyo mÃ¡ximo es el empuje activo de Coulomb.

- **Empuje activo de Coulomb en el caso de trasdÃ³s plano y superficie libre plana exenta de sobrecarga.**

En tal caso el mÃ¡ximo se puede hallar matemÃ¡ticamente y viene dado, por unidad de longitud de muro, por la expresiÃ³n:

En la que el empuje activo vale:

Cuando Î± = 0 y Î´ = Î² el empuje de Coulomb coincide exactamente con el de Rankine.

Descomponiendo el empuje en sus componentes horizontal y vertical se tiene que:

Siendo:

Kah = Ka Â· cos (Î± + Î´) Ka = Kah Â· tg (Î± + Î´)

Algunos valores del coeficiente Kah figuran en la tabla 10.3.

- **DistribuciÃ³n del empuje.**

Para hallar la distribuciÃ³n se supone que la teorÃa de Coulomb es aplicable a la obtenciÃ³n del empuje sobre cualquier trozo de muro correspondiente a la profundidad *z*. De esta manera se puede hallar *Ea* en funciÃ³n de *z*.

La es el empuje unitario por unidad de longitud medida segÃºn la vertical. La aplicaciÃ³n de este mÃ©todo al caso anterior darÃ¡:

El empuje unitario serÃ¡:

ea = Ka Â· Î³ Â· z

Esta expresiÃ³n indica que los empujes aumentan linealmente con la profundidad.

Un mÃ©todo aproximado para hallar la posiciÃ³n de la resultante del empuje en un caso general es el siguiente:

- Hallar el centro de gravedad de las masas situadas dentro de la cuÃ±a que da el mÃ¡ximo empuje.
- Trazar una paralela al plano de deslizamiento hasta cortar al trasdÃ³s. El punto correspondiente serÃ¡ el de aplicaciÃ³n de la resultante.

- **TrasdÃ³s quebrado.**

En este caso se comienza por calcular el empuje activo de Coulomb, *Ea1*, sobre *AB*.

A continuaciÃ³n se componen *Ea1* y el peso, *W*, que gravita sobre la cuÃ±a *ABCD*. Como se conoce la direcciÃ³n de las dos fuerzas que restan, reacciÃ³n sobre *CD* y empuje sobre *BD*, se puede calcular este Ãºltimo, *E2*. El mÃ¡ximo de *E2* para diversas posiciones de *CD* darÃ¡ el empuje activo sobre *BC*.

- **Sobrecargas.**

El mÃ©todo de Coulomb tiene en cuenta la existencia de sobrecargas siempre que Ã©stas sean indefinidas en el sentido longitudinal del muro.

Si se trata de una sobrecarga uniforme, *q*, el peso que gravita sobre la cuÃ±a *ABC* serÃ¡:

Si ahora se supone un relleno de peso especÃfico ficticio, *Î³2*, sin sobrecarga, el peso de la cuÃ±a correspondiente serÃ¡:

Si *W1 = W2* se tiene:

En tal caso, los empujes serÃ¡n iguales y valdrÃ¡n:

El empuje por unidad de longitud medida segÃºn la vertical serÃ¡:

AsÃ pues, una sobre carga uniforme da lugar a un empuje constante sin que se altere la posiciÃ³n de deslizamiento.

En el caso de *Î² = 0*, se tiene:

Ejemplo

Calcular las leyes de presiones y empujes.

Lo primero es calcular el valor de Ka correspondiente a cada capa:

Conocidos los valores de Ka se pueden hallar las leyes de presiones y empujes:

<u>PRESIONES</u>	<u>EMPUJES</u>
1 â Ï 1 = 1 T/m2	1 â E1 = Ï 1 Â· Ka1 = 1 Â· 0.417 = 0.417 T/m2
2 â Ï 2 = Ï 1 + Î³1 Â· z = 1 + 2 Â· 1 = 3 T/m2	2 â E2 = Ï 2 Â· Ka1 = 3 Â· 0.417 = 1.251 T/m2
	2 â E2 = Ï 2 Â· Ka2 = 3 Â· 0.300 = 0.900 T/m2
3 â Ï 3 = Ï 2 + Î³2 Â· z = 3 + 2 Â· 9 = 21 T/m2	3 â E3 = Ï 3 Â· Ka2 = 21 Â· 0.300 = 6.300 T/m2

Las correspondientes leyes serÃ¡n:

Descomponiendo la ley de empujes en figuras simples se pueden obtener los empujes actuantes y su punto de aplicaciÃ³n en funciÃ³n de los centros de gravedad:

E1 = 0.417 Â· 1 = 0.417 T/m

E2 = 0.5 Â· (1.251 - 0.900) Â· 1 = 0.1755 T/m

E3 = 0.900 Â· 9 = 8.1 T/m

E4 = 0.5 Â· (6.300 - 0.900) Â· 9 = 24.3 T/m

Los puntos de aplicaciÃ³n serÃ–an:

Z1 = 9.500 m

Z2 = 9.333 m

Z3 = 4.500 m

Z4 = 3.000 m

En el caso de considerar un nivel freÃ¡tico a una profundidad de - 1 m, habrÃ–a que considerar el empuje correspondiente al agua, asÃ– como la variaciÃ³n de las presiones verticales:

PRESIONES	EMPUJES
1 â Ï 1 = 1 T/m2	1 â E1 = Ï 1 Â· Ka1 = 1 Â· 0.417 = 0.417 T/m2
2 â Ï 2 = Ï 1 + Î³1 Â· z = 1 + 2 Â· 1 = 3 T/m2	2 â E2 = Ï 2 Â· Ka1 = 3 Â· 0.417 = 1.251 T/m2
3 â Ï 3 = Ï 2 + Î³sat2 Â· z = 3 + 2 Â· 9 = 21 T/m2	2 â E2 = Ï 2 Â· Ka2 = 3 Â· 0.300 = 0.900 T/m2
3 â Ï '3 = Ï 3 - 9 = 12 T/m2	3 â E3 = Ï 3 Â· Ka2 = 21 Â· 0.300 = 6.300 T/m2

E1 = 0.417 Â· 1 = 0.417 T/m

E2 = 0.5 Â· (1.251 - 0.900) Â· 1 = 0.1755 T/m

E'3 = 0.900 Â· 9 = 8.1 T/m

E'4 = 0.5 Â· (6.300 - 0.900) Â· 9 = 24.3 T/m

Los puntos de aplicaciÃ³n serÃ–an:

Z1 = 9.500 m

Z2 = 9.333 m

Z3 = 4.500 m

Z4 = 3.000 m

Zw = 3.000 m

- **Empujes sobre muros en L.**

Los muros aligerados en L soportan el empuje del terreno gracias al peso del terreno situado sobre el talÃ³n del muro, a diferencia de los muros por gravedad que soportan el empuje gracias a su propio peso.

En este tipo de muros es posible establecer que el terreno situado en la cuÃ±a *BCD* es un terreno rÃgidamente unido al muro, mientras que el situado en la cuÃ±a *ABC* es un terreno plastificado.

Una soluciÃ³n estÃ¡ticamente admisible es suponer que dentro de la cuÃ±a *BCD* se ha formado un estado activo de Rankine. En tal caso, el empuje sobre *AF* estarÃ¡ situado a un tercio de la altura, inclinado un Ã¡ngulo Î² respecto a la horizontal, y de valor:

Siendo Kar el coeficiente de empuje activo de Rankine, de valor:

En el caso de que Î² = 0:

- **Teorema de los estados correspondientes de Caquot.**
- Se elimina la cohesiÃ³n del suelo.
- Se aumentan las tensiones normales en c Â·ctg Ï '.

Se observa que el cÃrculo correspondiente al suelo sin cohesiÃ³n es tangente a la lÃnea de resistencia del suelo sin cohesiÃ³n.

- **TeorÃa de Rankine en suelos con cohesiÃ³n.**

La teorÃa de Rankine establece que:

Ï h = Kar Â· Ï v

Por tanto:

Teniendo en cuenta que Ï v = q + Î³ Â· z, se tiene que:

En el caso de que Kar sea negativo aparecerÃ¡n tracciones que causarÃ¡n una grieta que anule el empuje superior. Por ello, es importante determinar la profundidad de dicha grieta. Como la profundidad (z0) de dicha grieta se corresponde con los puntos de tensiÃ³n nula, se tiene que:

De esta forma:

En el caso de una arcilla a corto plazo se cumple que Ï u = 0, por tanto:

En las arcillas se puede dar una situaciÃ³n intermedia, entre el corto y el largo plazo, como consecuencia de la apariciÃ³n de filtraciones por encima de la cota de tensiones nulas, de tal manera que el empuje del agua por encima de z0 es mayor que el empuje del terreno, aunque a cotas mayores no. En tal caso se tiene que:

- z0 â ¤ zw â   Como a corto plazo.
-

Siendo:

En el caso de que se trate de un caso a largo plazo se ha de determinar la profundidad de la grieta de tracciÃ³n en cada caso. AsÃ:

-
-

- **MÃ TODO SEMIEMPÃ RICO DE TERZAGHI Y PECK.**

Las teorÃas de empuje de tierras de Rankine y Coulomb capacitan para calcular muros con exactitud muy razonable, pero exigen un conocimiento bastante perfecto de las caracterÃsticas resistentes del terreno, lo cual precisa, a su vez, la ejecuciÃ³n de ensayos, en general en el laboratorio, y en algunos casos “in situ”.

Sin embargo, las condiciones de un terreno pueden variar a lo largo de las diferentes Ã©pocas del aÃ±o, por lo que el muestreo para muros gran importancia es considerable y estÃ¡ justificado. Pero, en muros de poca importancia serÃa un trabajo excesivo y poco prÃ¡ctico, por lo que se suele recurrir a algÃºn sistema de cÃ¡lculo aproximado.

Terzaghi y Peck formularon un sistema de cÃ¡lculo para pequeÃ±os muros que llamaron semiempÃrico. Se basa en la clasificaciÃ³n de los terrenos en cinco tipos, fÃ¡cilmente identificables por simple inspecciÃ³n. Para cada una de ellas dan un Ã¡baco basado en las teorÃas del empuje de tierras y en las caracterÃsticas medias de los terrenos que cada clase abarca, pero introduciendo correcciones para tener en cuenta los efectos de las variaciones de cohesiÃ³n, etc.

- **Campo de aplicaciÃ³n.**

El mÃ©todo es aplicable sÃ³lo en muros de menos de 6 m de altura y Ãºnicamente a muros cuyo trasdÃ³s sostenga un relleno. No es aplicable a muros adosados a taludes que inicialmente se sostienen por sÃ mismos.

- **ClasificaciÃ³n de los terrenos.**

Los terrenos se clasifican en los cinco grupos siguientes:

- Suelos de grano grueso sin mezcla de finos, muy permeables (arena limpia o grava).
- Suelos de grano grueso, pero de pequeÃ±a permeabilidad, debido a la presencia de una cantidad apreciable de finos limosos.
- Suelos residuales compuestos de arena fina limosa, con materiales de grano grueso, incluso bolos, y bastante arcilla.
- Arcilla blanda o muy blanda, fangos orgÃ¡nicos, o arcillas limosas.
- Arcilla media firme, depositada en terrones y protegida de tal forma del agua, durante las lluvias, aun cuando sean abundantes, o durante las inundaciones, no pueda penetrar detrÃ¡s del muro mÃ¡s que en cantidades insignificantes. Si esta condiciÃ³n no puede cumplirse, no se puede emplear arcilla de estas caracterÃsticas para el relleno del trasdÃ³s del muro. El peligro crece rÃ¡pidamente al ser la arcilla mÃ¡s firme o dura.
- **Empleo de los Ã¡bacos.**

Los casos prÃ¡cticos mÃ¡s frecuentes en lo que se refiere a la disposiciÃ³n del terraplÃ©n y su sobrecarga pueden clasificarse en cuatro tipos:

- TerraplÃ©n con superficie plana, horizontal o inclinada, sin sobrecarga.
- TerraplÃ©n con superficie plana inclinada, elevÃ¡ndose desde la coronaciÃ³n del muro hasta una cierta altura, a partir de la cual, es horizontal, sin sobrecarga.
- TerraplÃ©n con sobrecarga uniforme.
- TerraplÃ©n con carga lineal uniforme, paralela a la coronaciÃ³n del muro.

Las figuras 10.46 y 10.47 corresponden respectivamente a los casos a) y b). De acuerdo con la nota de la figura, cuando se utiliza el terraplÃ©n del tipo 5 hay que disminuir H en 1.20 m, por lo que el punto de aplicaciÃ³n del empuje se sitÃºa a una altura de 1/3 (H-1.2) m sobre el plano de la base.

En los casos c) y d), la componente horizontal del empuje se incrementa en el valor correspondiente a la fuerza horizontal producida por la sobrecarga, cuyo cÃ¡lculo se indica en las figuras 10.48 y 10.49. Cuando el punto D' queda por debajo del plano de base del muro, la influencia de la sobrecarga es nula. Para la aplicaciÃ³n de las figuras es indiferente que el punto C estÃ© situado a un lado u otro de A. Los valores del coeficiente C, en funciÃ³n del tipo de terraplÃ©n son los siguientes:

Tipo de terraplÃ©n	1	2	3	4	5
C	0.27	0.30	0.39	1.00	1.00

Las sobrecargas producen tambiÃ©n una presiÃ³n vertical, cuya magnitud se calcula segÃºn se indican en las figuras; de esta presiÃ³n sÃ³lo ha de tenerse en cuenta la parte que actÃºa sobre el talÃ³n del cimiento del muro, seÃ±aladas en las figuras por un rayado vertical.

El procedimiento descrito se aplica a muros cimentados sobre terreno bastante firme, en cuyo caso, el rozamiento y adherencia entre muro y terraplÃ©n tienden a reducir el empuje. Por el contrario, si el terreno de cimentaciÃ³n es compresible y cede, cambia el sentido de aquellas fuerzas y aumenta considerablemente el empuje. En este caso, los valores del empuje calculado para terraplenes del tipo 1, 2, 3 y 5 deben aumentarse en un 50%.

Tema 15: EMPUJE DE TIERRAS

1

13

MECÃ”NICA DEL SUELO