



Universidad Nacional de Misiones

# CÁTEDRA DE OBRAS HIDRÁULICAS (CI457)

Ing. José A. Serra

Obras Hidráulicas – Ingeniería de Presas  
Ing. José A. Serra

# INGENIERÍA DE PRESAS DE RELLENO

## Suelos:



Para los fines de la ingeniería, el **suelo** se define como el agregado natural de granos minerales separables por medios mecánicos moderados, como agitación en agua.

La **roca**, por otro lado, es un agregado natural de minerales ligados por enlaces cohesivos fuertes y permanentes.

El límite entre suelo y roca es hasta cierto punto arbitrario, como se ejemplifica en rocas blandas o meteorizadas, como calizas y esquistos meteorizados, o areniscas débilmente cimentadas.

# INGENIERÍA DE PRESAS DE RELLENO

Para la ingeniería, todos los suelos de origen no orgánico (es decir, excluyendo turbas, etc.) se forman mediante procesos de **meteorización y degradación de la roca**.

Pueden ocurrir *in situ* formando los **suelos residuales**. De forma alterna, si agentes naturales remueven y depositan las partículas de roca en alguna otra parte, por ejemplo, mediante acciones glaciales o fluviales, formarán los **suelos transportados**.

Rocas blandas o meteorizadas forman parte de la escala de los suelos residuales.

El transporte produce cambios progresivos en el tamaño y la forma de las partículas minerales así como en su distribución granulométrica, y las partículas más finas son conducidas más lejos.

# INGENIERÍA DE PRESAS DE RELLENO

Deben distinguirse **dos tipos genéricos de grupos de suelos inorgánicos** que resultan de diferentes procesos de meteorización. Las partículas minerales más grandes, con formas más regulares, que constituyen los **limos, las arenas y las gravas**, se originan de la rotura de rocas de relativa estabilidad debido a procesos puramente físicos, como la erosión por agua o glaciación, o la desintegración por las acciones de congelamiento y deshielo.

Ciertas rocas minerales que son químicamente menos estables, por ejemplo, el feldespato, experimentan cambios en su composición mineral durante la meteorización, y al final producen plaquetas 'bidimensionales' de minerales de **arcilla** con tamaño coloidal. Estas originan las partículas de arcilla, que por su superficie específica y su energía superficial alta manifiestan una fuerte atracción al agua y son responsables de las propiedades que particularmente caracterizan los suelos arcillosos, como la **cohesión**, la **plasticidad** y la **susceptibilidad al cambio de volumen con la variación en el contenido de humedad**.

# SUELOS NATURALES

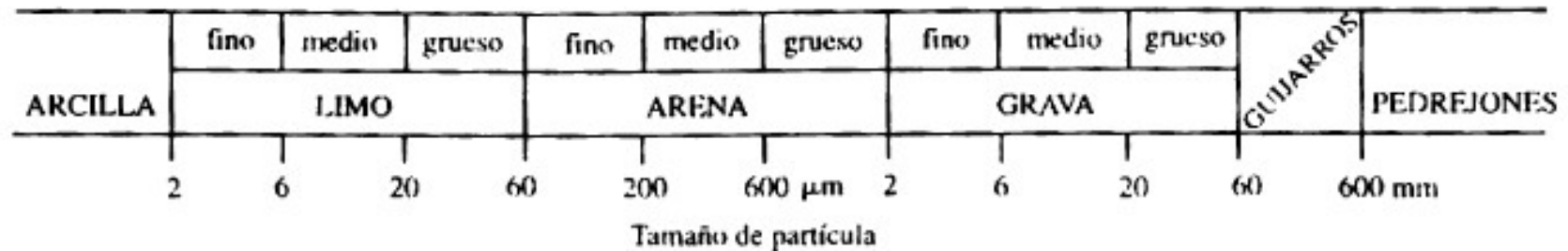
**Las partículas de suelo varían en tamaño desde más de 100mm, pasando por gravas, arenas y limos, hasta arcillas de menos de 0.002 mm.**

Los suelos que se presentan de manera natural por lo general contienen una combinación de tamaños, pero se denominan de acuerdo con el comportamiento del tipo de partícula que los caracteriza como un todo.

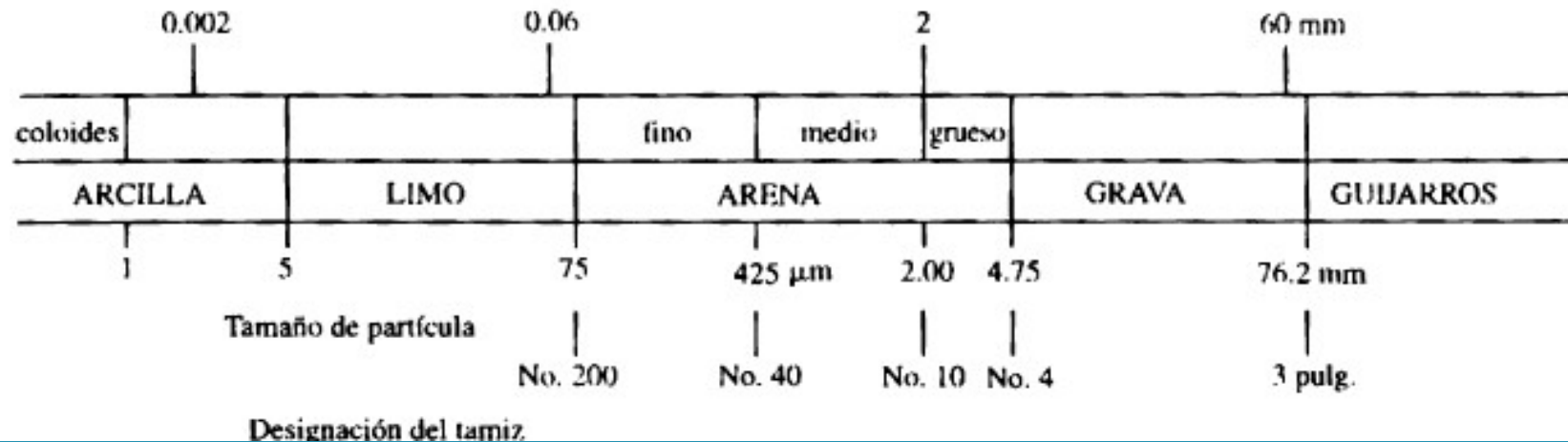
Entonces, un suelo arcilloso se denomina así porque muestra la plasticidad y la cohesión propias de los materiales basados en minerales arcillosos, aunque la matriz mineral contenga diversos tamaños de partículas, y aunque sólo una proporción menor de la matriz sea del tamaño de una arcilla, es decir  $< 0.002$  mm ( $2\mu\text{m}$ ).

# SUELOS NATURALES

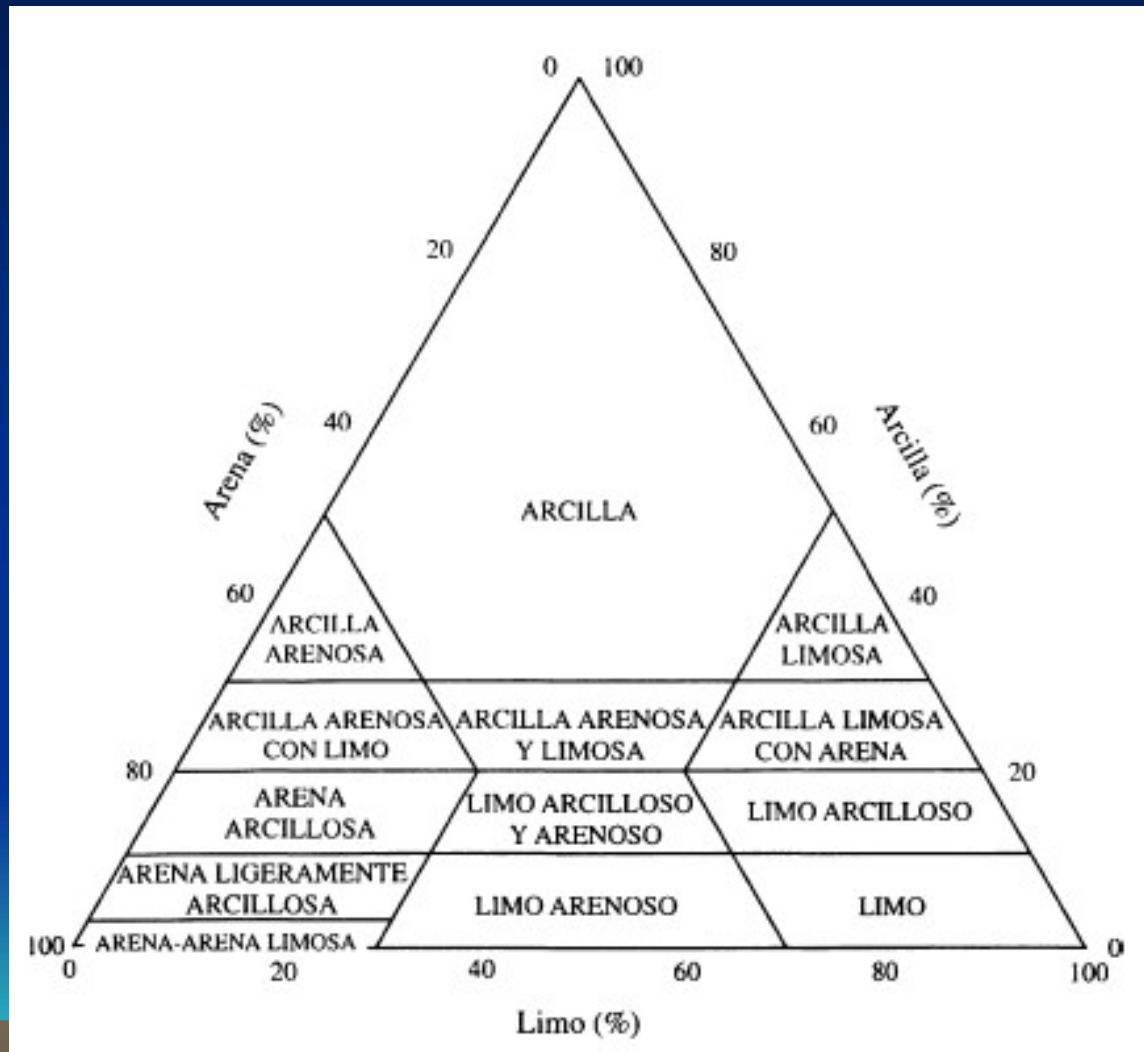
(a) Reino Unido (BS1377 1975)



(b) Estados Unidos (ASTM D422)



# SUELOS NATURALES



# SUELOS NATURALES

El **análisis de los tamaños de partículas es insuficiente** para una clasificación completa de los suelos con granos finos o de los suelos más gruesos cuando la matriz incluye una proporción de finos plásticos, es decir, arcillas.

Es **necesaria una clasificación secundaria basada en el grado de plasticidad**, utilizando los límites de consistencia que se expresan en función del porcentaje del contenido de masa de agua,  $w$ .

El **límite líquido (LL)**, es el contenido de humedad que define el cambio del suelo de su estado (consistencia) plástico al líquido; el **límite plástico (LP)**, define el punto por debajo del cual el suelo es demasiado seco para exhibir plasticidad.

La escala de contenido de agua donde el suelo presenta comportamiento plástico se expresa mediante el **índice de plasticidad,  $IP = LL - LP$** .



# FASES EN EL SUELO

Un suelo puede constituir un **sistema de dos o tres fases** que comprenden la matriz sólida del suelo o esqueleto y el fluido ya sea agua o gas o ambos. ,

**El agua puede existir en el suelo en diversas formas.** El agua además de ser el constituyente principal de la fase líquida, puede presentarse también en una fase gaseosa como vapor de agua y en la fase sólida como agua adsorbida.

Todas las partículas minerales tienden a formar enlaces físico-químicos con el agua, de lo que resulta una película superficial de agua adsorbida o fija.

**Los fenómenos eléctricos asociados que ocurren en las interfaces de partículas de arcilla-agua son los principales responsables de la cohesión y la plasticidad identificada con los suelos arcillosos.**

**Agua libre** es el término utilizado para describir la porción del agua en los poros totales que siguen las leyes normales de la hidráulica. Siempre que esta agua se presenta en los poros del suelo como una fase líquida continua, se aplica la ley de Bernoulli.

# FASES EN EL SUELO

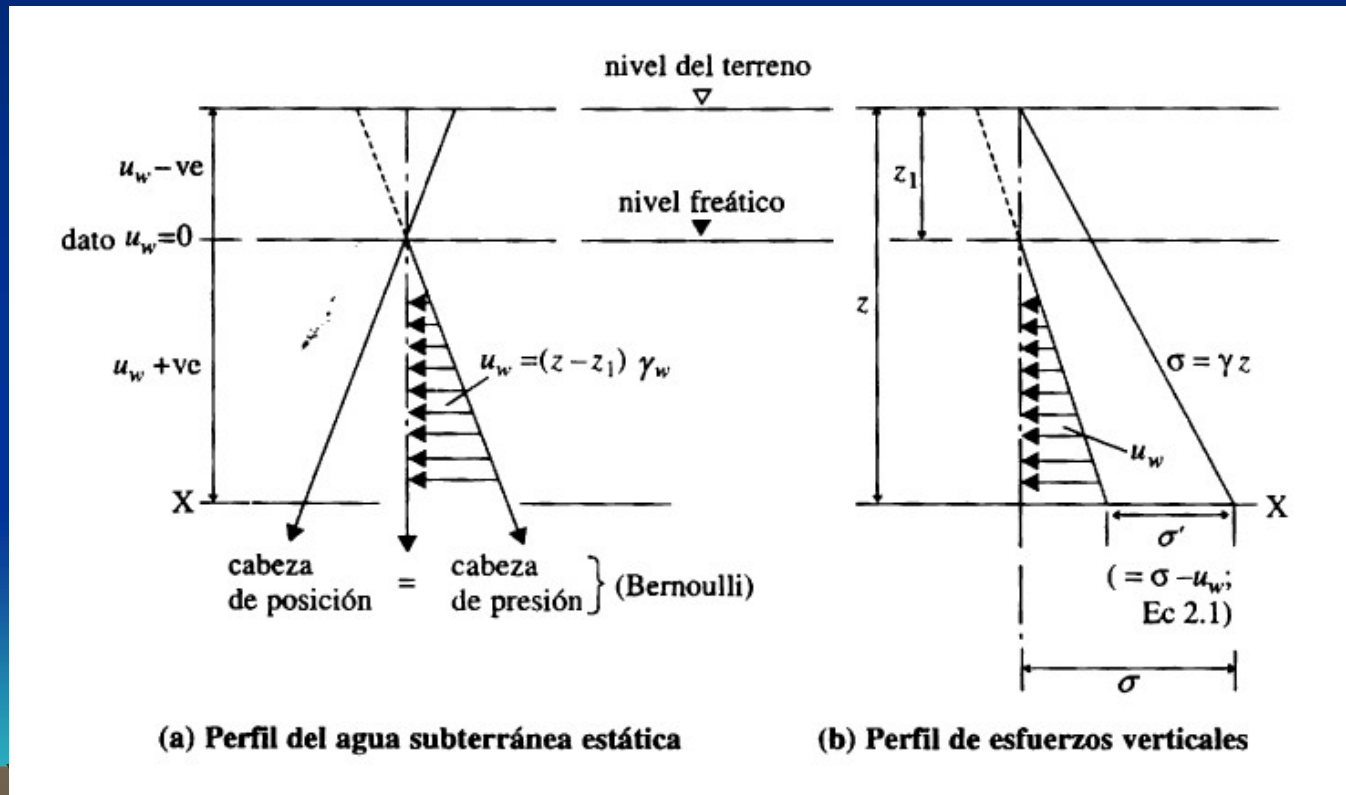
La **superficie freática** se define como el nivel de referencia en el cual la presión de agua en los poros dentro de la masa de suelo es cero, es decir atmosférica. El nivel del agua estable que se obtiene en una tubería vertical se denomina **nivel piezométrico**. El **nivel freático (NF)** o nivel del agua subterránea (NAS) experimenta fluctuaciones estacionales y puede cambiar también como un resultado directo de las operaciones de construcción.

Por debajo del NF se supone que **el suelo está totalmente saturado**, pero puede contener pequeños volúmenes de aire atrapado. Por encima del nivel freático, el agua puede sostenerse debido a las **fuerzas de capilaridad**.

Los suelos limosos y las arcillas con frecuencia empleados en rellenos de terraplenes, en general, están parcialmente saturados cuando se compactan por primera vez, es decir, algún espacio entre los poros está lleno con aire de poros compresible.

# FASES EN EL SUELO

En la figura se muestra la sección vertical de una masa de suelo que está generando un esfuerzo vertical total,  $\sigma$ , y una presión de agua en los poros estática,  $u_w$ , en el plano horizontal X-X a una profundidad  $z$ .



# FASES EN EL SUELO

La presión de agua en los poros que es positiva por debajo del nivel freático disminuye la presión de contacto entre las partículas y el esfuerzo intergranular (efectivo, tensión)  $\sigma'$ , que se transmite a través de las partículas de suelo, el cual es menor que el esfuerzo total  $\sigma$  en una cantidad equivalente a la presión de agua en los poros; es decir, la presión o el esfuerzo efectivos están dados por:

$$\sigma' = \sigma - \mu_w$$

**El nivel de esfuerzo efectivo es el que determina la resistencia al corte que puede soportar un suelo y la compresibilidad de un suelo arcilloso.**

# FASES EN EL SUELO

**Tabla 2.1** Características físicas representativas de los suelos

<i>Tipo de suelos</i>	<i>Contenido natural de agua, <math>w</math> (%)</i>	<i>Peso unitario in situ, <math>\gamma</math> (<math>k N^{m^{-3}}</math>)</i>	<i>Relación de vacíos <math>e</math> (ver nota)</i>	<i>Grado de saturación <math>S_r</math> (%)</i>
Arena uniforme seca, suelta	0	13.5	0.95	0
Arena bien gradada	5	19.5	0.45	40
Arcilla blanda	55	17.0	1.50	>95
Arcilla compactada	20	19.5	0.70	>90
Tilita rígida	10	23.0	0.30	>95
Turba y suelos orgánicos	>250	10.0	>3.50	>90

La densidad relativa de partículas minerales de suelos  $G_s \approx 2.65 - 2.75$ .

$e$  = Volumen relativo de vacíos de los poros respecto al volumen de los sólidos de la matriz.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

La respuesta del suelo es importante en la construcción de presas de relleno, en cuanto al desempeño de los suelos de **rellenos de tierra compactados mecánicamente** y de los suelos naturales de cimentación subyacentes.

En la construcción de rellenos de tierra es necesario **considerar las características portantes del relleno compactado y el comportamiento del suelo a medida que avanza la construcción.**

Es conveniente **clasificar los problemas** relacionados con la respuesta de los suelos a condiciones específicas de carga en **problemas de estabilidad o de deformación**. Los problemas de estabilidad tienen que ver con el equilibrio entre las fuerzas y los momentos y la resistencia del suelo movilizado.

Cuando las primeras, que surgen de las cargas (o de la remoción del soporte como en una excavación de una zanja) exceden la resistencia al corte que puede movilizar el suelo, **ocurrirá la falla.**

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

Lo cual se manifiesta en general de manera progresiva y, en la fase final, con desplazamientos de masas grandes, relativamente rápidos, como en un talud de suelo.

**Los problemas de estabilidad involucran conceptos de resistencia al corte del suelo y la respuesta esfuerzo-deformación.**

Si bien una masa de suelo puede ser estable en el sentido descrito anteriormente, puede, no obstante, sufrir **deformación** como resultado de **cambios en las condiciones de carga o de drenaje**.

Las **deformaciones** más importantes de los suelos, sin embargo, por lo general **conllevan cambios en el volumen** producto de alteraciones en las configuraciones geométricas del agregado de partículas de suelo, es decir, un suelo suelto adoptará una estructura más compacta y densa cuando se cargue.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

Si las **partículas de suelo** son relativamente **gruesas**, como arenas, este cambio ocurre casi de inmediato al aplicar la carga.

En **suelos arcillosos saturados**, sin embargo, los cambios de volumen y las sedimentaciones debido a las cargas externas ocurren con lentitud mediante procesos hidrodinámicos complejos conocidos como **consolidación**.

La **RESISTENCIA AL CORTE** de un suelo se define como la máxima resistencia a los esfuerzos cortantes que se puede movilizar. Cuando ésta se excede ocurre la falla, por lo general a lo largo de superficies de falla identificables. La resistencia al corte se cuantifica de ordinario mediante dos parámetros:

- 1. **La cohesión,  $c$** , resulta esencialmente de las fuerzas eléctricas complejas que entrelazan las partículas del tamaño de las arcillas.
- 2. **El ángulo de resistencia al corte,  $\phi$** , que se desarrolla por la resistencia a la fricción entre las partículas y su entramado.



# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

La resistencia al corte de un suelo en un punto sobre un plano particular se puede expresar como una función lineal del esfuerzo normal,  $\sigma_N$ , en el mismo punto utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$\tau = C + \sigma_N \cdot \tan \Phi$$

Como se expresó anteriormente, la resistencia al corte se determina por el nivel de esfuerzo efectivo (entre partículas) y no por el nivel de esfuerzo total. Una forma más apropiada de la ecuación es:

$$\tau' = C' + \sigma'_N \cdot \tan \Phi'$$

Con los parámetros de resistencia al corte, expresados en función de los esfuerzos efectivos .

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

**Suelos más gruesos como las arenas**, adquieren su resistencia al corte sobre todo del entramado, entre partículas y la fricción interna, denominándose así **suelos no cohesivos ( $c = 0$ ) o de fricción**.

Cuando las **arcillas saturadas** se cargan en condiciones de no drenadas, pueden parecer que sólo tengan cohesión. Con frecuencia, las arcillas se identifican en términos generales como **suelos cohesivos ( $c > 0$ ,  $\phi = 0$ )**.

**Suelos de tipo intermedio y la mayoría de los suelos ‘cohesivos’, exhibirán tanto cohesión como fricción interna.**

**La densidad controla en gran parte la resistencia al corte de los suelos. A mayor densidad, el ángulo de resistencia al corte es más grande.**

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

La mayoría de los problemas en ingeniería suceden con suelos cohesivos finos, y surgen de la naturaleza de las partículas de arcilla.

Debido a su baja permeabilidad y gran afinidad al agua, usualmente los suelos arcillosos se hallan en estados saturados o casi saturados.

Cambios en las condiciones externas de carga, que incluyen operaciones de construcción, generan altas presiones en el agua de los poros que se disipan con mucha lentitud.

**Se establece una relación clara entre la resistencia al corte y el incremento en el contenido de agua: para contenidos altos, las fuerzas cohesivas entre las partículas de arcilla se debilitan con rapidez, lo que genera una gran reducción de las resistencias al corte.**

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

**El factor que más influye sobre las características de resistencia al corte y consolidación de una arcilla saturada es su historia de esfuerzos y no su densidad.**

Si los esfuerzos efectivos actuales *in situ* son los más grandes que ha soportado la arcilla en su historia, ésta se describe como **normalmente consolidada (NC)**.

Si, por el contrario, se han aliviado los niveles previos de esfuerzo efectivo, por ejemplo como resultado de una glaciación, la arcilla se describe como **sobreconsolidada (SC)**.

La relación entre los máximos esfuerzos efectivos previos y los presentes *in situ* es la **relación de sobreconsolidación (RSC)**.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

## COMPRESIBILIDAD Y CONSOLIDACIÓN

Cuando se aplica carga a una masa de suelo puede ocurrir compresión y sedimentación como consecuencia de uno o más de los siguientes tres mecanismos:

- **1. deformación elástica de las partículas de suelo;**
- **2. compresión del fluido de los poros;**
- **3. expulsión del fluido de los poros de la zona esforzada, con reordenamiento de las partículas de suelo.**

Las **partículas de suelo y agua son sensiblemente incompresibles**, en consecuencia, la compresión o disminución del volumen de un suelo de grano fino saturado debido a la aplicación de esfuerzos o cargas se debe, casi en su totalidad al mecanismo 3 (expulsión de la presión de agua en los poros) a medida que se disipa el exceso de la presión del agua en los poros.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

•Este **proceso hidrodinámico** se denomina **consolidación** y es relevante, en su mayor parte, en las arcillas y en los suelos orgánicos en donde el proceso de cambio de volumen es en comparación lento por sus permeabilidades muy bajas.

El proceso de consolidación es en parte reversible, es decir, suelos compresibles pueden expandirse al remover la carga.

**Las características unidimensionales de consolidación vertical, determinadas en los ensayos de laboratorio, se expresan mediante dos coeficientes:**

- El **coeficiente de compresibilidad volumétrica,  $m_v$** , se requiere para determinar la magnitud de la sedimentación de consolidación dependiente del tiempo.
- El **coeficiente de consolidación,  $c_v$** , se utiliza para establecer las tasas de sedimentación.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \sigma'_v}$$

Incremento de la deformación vertical con respecto al incremento de las tensiones efectivas verticales, si no se permite movimiento lateral.

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$$

Donde k es un coeficiente de permeabilidad.

El coeficiente de consolidación secundaria,  $C\alpha$ , se utiliza para describir sedimentaciones subsecuentes continuas debido al arrastre de la estructura del suelo bajo esfuerzos efectivos constantes.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

## PERMEABILIDAD

La **permeabilidad del suelo** es importante en los problemas de infiltración, estabilidad de taludes y consolidación.

También es importante en los procesos de tratamientos del terreno, por ejemplo, en inyecciones y en desecaciones.

La permeabilidad relativa de los suelos saturados es estimada mediante un coeficiente de permeabilidad,  $k$ , que se expresa en unidades de velocidad (m/s).

**Es de las propiedades del suelo, la más variable entre los extremos de una grava gruesa hasta una arcilla intacta, y aun dentro de suelos uniformes ideales.**

El flujo de agua en un suelo saturado puede representarse por:



# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

El flujo de agua en un suelo saturado puede representarse por:

## ECUACIÓN DE DARCY

$$v = -k \cdot \frac{dh}{dl} = -k \cdot i$$

Donde  $v$  es la velocidad y  $dh/dl$  es el gradiente hidráulico.

Las permeabilidades del suelo son sin duda anisotrópicas, con  $k_h$ , el coeficiente de permeabilidad horizontal, varias veces más grande que  $k_v$ , el coeficiente de permeabilidad vertical.

**En rellenos compactados la relación  $k_h / k_v$  puede exceder de 20.**

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

**Tabla 2.3** Ilustración de propiedades mecánicas para tipo de suelos seleccionados (comparar con la tabla 2.6)

Descripción	Peso unitario saturado $\gamma$ ( $kNm^{-3}$ )	Resistencia al corte (esfuerzo efectivo)		Coeficiente de permeabilidad ( $\times 10^{-4} m^2kN^{-1}$ )	Coeficiente de permeabilidad horizontal $k_h$ ( $m s^{-1}$ )
		Cohesión $c'$ ( $kN m^{-2}$ )	Fricción $\phi'$ (grados)		
Gravillas	17-22	0	30-45	(0.1-1.0)	$10^{-1} - 10^{-2}$
Arenas		0	30-45		$10^{-2} - 10^{-5}$
Limos		<5	20-35		$10^{-4} - 10^{-6}$
Arcillas (blanda-medias)	15-21	0	20-30	(1.0-10.0)	Arcilla intacta $< 10^{-8}$
Arcillas (sensitivas, limosas)		<10	<30		Si está meteorizada, fisurada o con lentes de limo $10^{-3} - 10^{-8}$
Arcillas (medias-rígidas)		<50	<20		

1. Valores de  $n_v$  y  $k_h$  están sujetos a una variación amplia; los valores citados son sólo una guía del orden de magnitud.
2.  $k_h > 10^{-3} m s^{-1}$  es necesario para un buen drenaje;  $k_h < 10^{-6} m s^{-1}$  corresponde a ser virtualmente permeable.
3. Las propiedades de suelos de grano grueso se controlan con la densidad relativa y la forma de la partícula; aquellos suelos de tipo arcilloso están influidos por la historia de esfuerzos, etcétera.

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

## COMPACTACIÓN

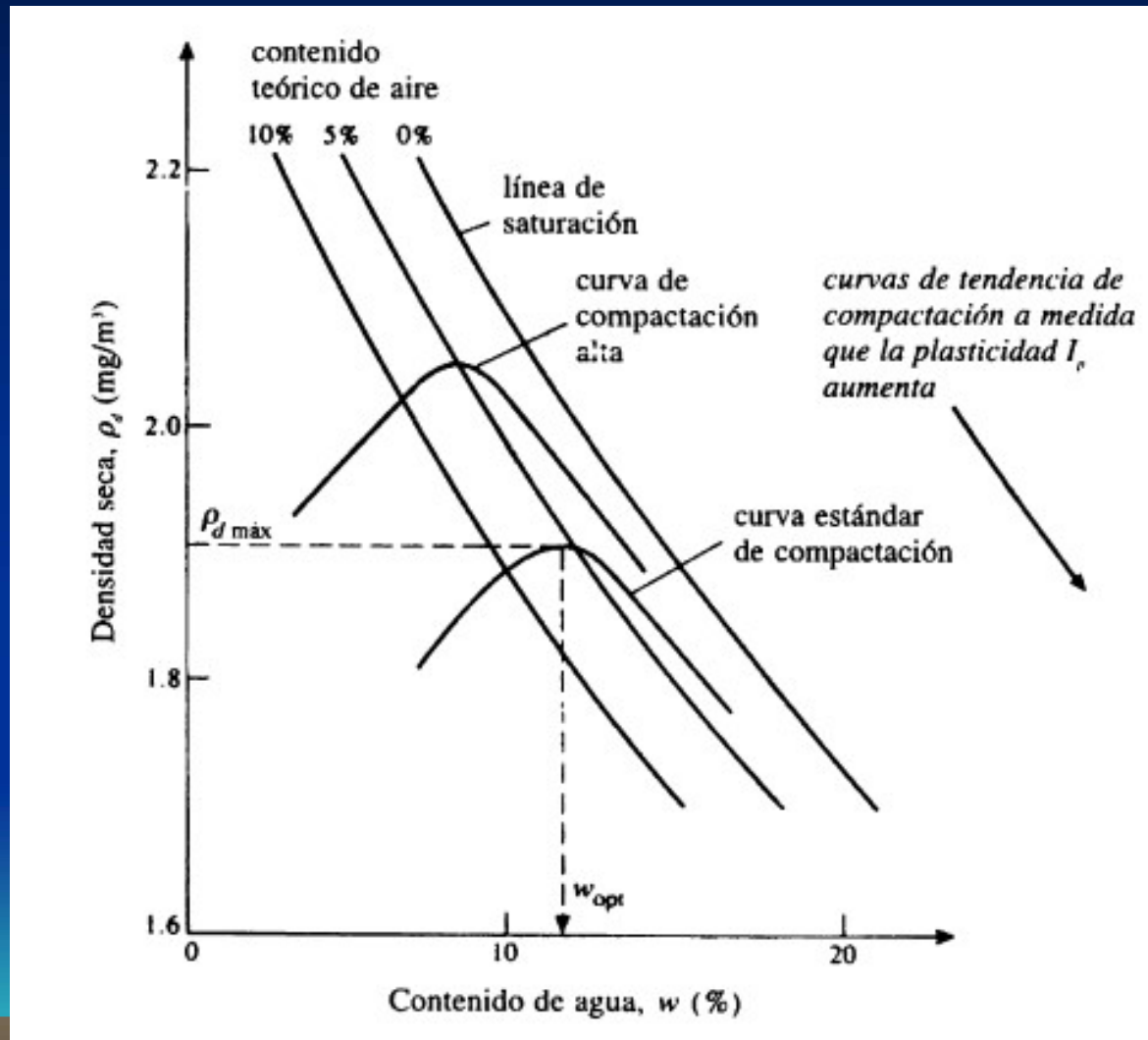
La **Compactación** es el proceso de densificación debido a la expulsión de aire del espacio vacío del suelo, lo que da como resultado una disposición más cercana de las partículas, una mejora en la resistencia y una reducción en la sedimentación.

(El proceso no debe confundirse con la consolidación, en donde el volumen disminuye como resultado de una expulsión gradual de agua bajo una carga aplicada).

La compactación en el campo de los rellenos de terraplenes por lo general se logra mediante el paso de **rodillos por capas delgadas**, a menudo ayudadas por la **excitación vibratoria del equipo**.

**El grado de compactación de un suelo se mide en función de la densidad seca. La densidad seca obtenida durante la compactación varía con el contenido de agua de un suelo y el esfuerzo de compactación aplicado.**

# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS



# RESPUESTA DEL SUELO A CARGAS

Para **contenidos bajos de agua**, el suelo es **rígido y difícil de compactar**, lo que produce bajas densidades secas: a medida que el contenido de agua se incrementa la compactación se hace más fácil y se obtienen densidades secas más altas.

A **contenidos de agua altos**, el agua ocupa un volumen cada vez mayor del espacio de los vacíos del suelo y la **densidad seca disminuye**.

**Para un esfuerzo de compactación dado hay, por consiguiente, un valor óptimo de contenido de agua donde se obtiene el máximo valor de la densidad seca.**

Al incrementar los esfuerzos de compactación, se desplaza la curva de densidad seca-contenido de humedad para dar una más alta densidad seca máxima con un menor contenido óptimo de agua.

En general, el espesor máximo especificado de la capa para una compactación de campo efectiva está en el rango de 150-250mm.

# PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PRESAS

En su forma más simple y antigua, la presa de relleno se construía con suelos de baja permeabilidad y de perfil nominalmente homogéneo. Su sección no presentaba drenaje interno ni rastrillo. Aunque las presas de ese tipo evidenciaron vulnerabilidad a problemas asociados con infiltraciones incontroladas, poco progresó el diseño antes del siglo XIX.

**Entonces se reconoció que, en principio, las presas de relleno más grandes requerían dos elementos constitutivos:**

- **1. un elemento impermeable de retención de agua o núcleo de un suelo con permeabilidad muy baja, por ejemplo, arcilla;**
- **2. espaldones de soporte de un relleno de tierra más grueso (o de enrocado), para proporcionar estabilidad estructural.**

# PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PRESAS

Como principio de diseño más avanzado, desde 1860 los **espaldones se ‘zonificaron’**, a menudo colocando los suelos más finos adyacentes al elemento del núcleo y material de relleno un poco más grueso hacia ambos paramentos.

**Las prácticas actuales de diseño de presas de relleno conservan estos principios.**

Para el **elemento impermeable del núcleo** se emplean rellenos limosos de grano fino o arcillosos compactados o, en algunos casos, materiales manufacturados, como asfalto o concreto.

Según su disponibilidad, **rellenos más gruesos** de diferentes tipos que abarcan hasta enrocados gruesos, se compactan en zonas designadas de **ambos espaldones**, donde las características propias de cada uno pueden desplegarse mejor dentro de un perfil efectivo y estable.

# PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PRESAS

## RELLENOS HOMOGENEOS

En general se limita a presas más pequeñas, menos importantes y a diques en ingeniería fluvial.

Se requiere una **disponibilidad amplia de suelo con permeabilidad suficientemente baja** y se hace necesario un **diseño cuidadoso** y una planeación de los detalles internos a fin de **controlar la infiltración y las presiones de agua en los poros.**

## RELLENOS HETEROGENEOS

El perfil con un núcleo central del relleno térreo, es el más común en las presas de relleno de mayor tamaño.

Los **núcleos angostos de arcilla blanda compresible o de concreto** han sido remplazados desde 1940-950 por los **núcleos de arcilla compactada**, los cuales son técnicamente superiores.

El **núcleo esbelto puede ser vulnerable** a fraccionamiento y erosión interna los **núcleos más anchos presentan los menores gradientes hidráulicos internos.**



# PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PRESAS

**El cambio hacia núcleos más anchos** coincide con el desarrollo de la teoría de la mecánica de suelos y con la introducción de equipos de compactación y movimiento de tierra de gran capacidad.

**El ancho de la base del núcleo ahora es, en general entre 20 y 40% de la altura del relleno.**

En presas de enrocado, el **perfil con un núcleo inclinado**, se considera a veces ventajoso al moderar el riesgo de agrietamiento del núcleo como resultado de la transferencia de carga entre el núcleo compresible y el espaldón más rígido de enrocado.

Los enrocados con cubierta, presentan una **membrana impermeable de concreto o asfáltica aguas arriba**. **Membranas asfálticas delgadas (0.15-0.30 m de espesor)** se emplean ampliamente cuando el suelo apropiado para la construcción del núcleo no está disponible o no es económico.

# PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE PRESAS

Una membrana asfáltica puede soportar deformaciones importantes sin romperse. Las **membranas de asfalto más gruesas (0.6-1.0 m)** también se emplean bastante en la posición central menos vulnerable.

**La selección del tipo óptimo de relleno para un sitio específico es determinada principalmente por la naturaleza y disponibilidad en cantidad suficiente, de los diferentes materiales de relleno.**

Las pendientes más altas de los paramemos posibles en espaldones de enrocado compactado pueden reducir entre 30 y 50% la cantidad de relleno requerido para una altura de presa dada.

# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

Los principales mecanismos y modos de falla identificables en una presa de relleno se ilustran en forma esquemática a continuación.

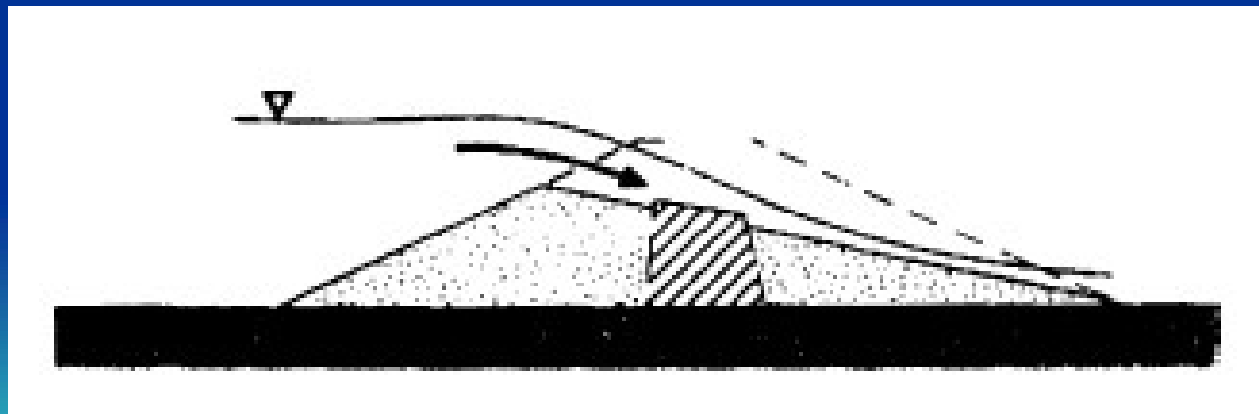
Ciertos mecanismos están interrelacionados, por ejemplo, puede ocurrir rebosamiento debido a una capacidad inadecuada del vertedero o por carencia de un borde libre lo que, a su vez, puede resultar de una deformación y sedimentación de largo plazo.

**La erosión interna y los mecanismos de rebosamiento son de interés particular, cada uno de ellos es responsable entre 30 y 35% de los incidentes y fallas serios.**

# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

## **Rebosamiento**

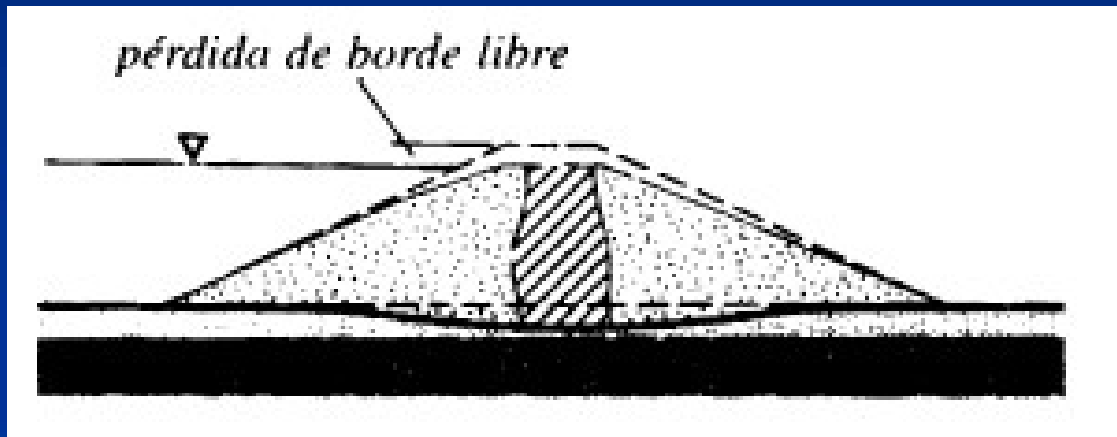
El vertedero de excesos y la capacidad de desagüe deben ser suficientes para prevenir rebosamientos, con riesgo de erosión severa y posible lavado del relleno. El borde libre, es decir, la diferencia entre el nivel máximo del embalse y el nivel mínimo de la cresta de la presa, debe ser suficiente para prevenir rebosamientos por la acción de las olas. También debe incluir un margen para la sedimentación de largo plazo de la presa previsible en una cimentación compresible.



# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

**Rebosamiento**

**Sedimentación de la cimentación**



# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

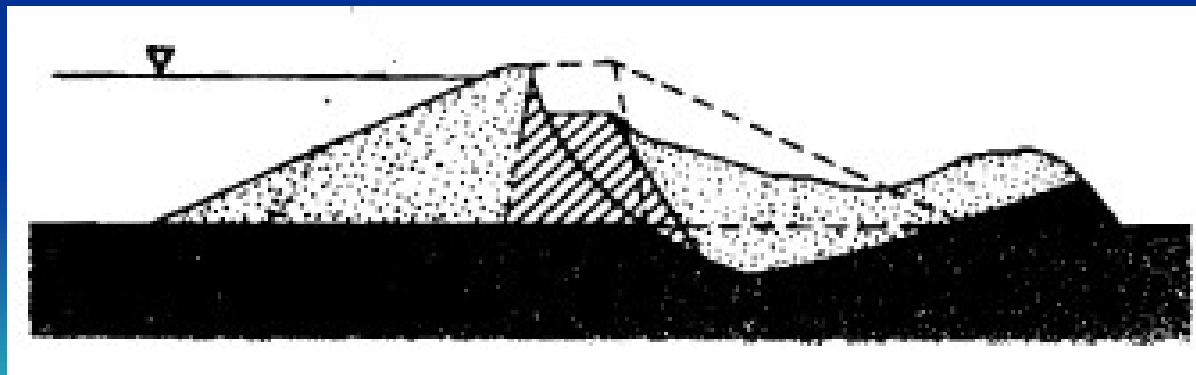
## **Estabilidad**

El relleno, incluida su cimentación, debe ser estable bajo la construcción y en todas las condiciones de operación del embalse. Las pendientes de los paramentos deben ser, por tanto, suficientemente planas para asegurar que los esfuerzos internos y la cimentación permanezcan dentro de límites aceptables.



# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

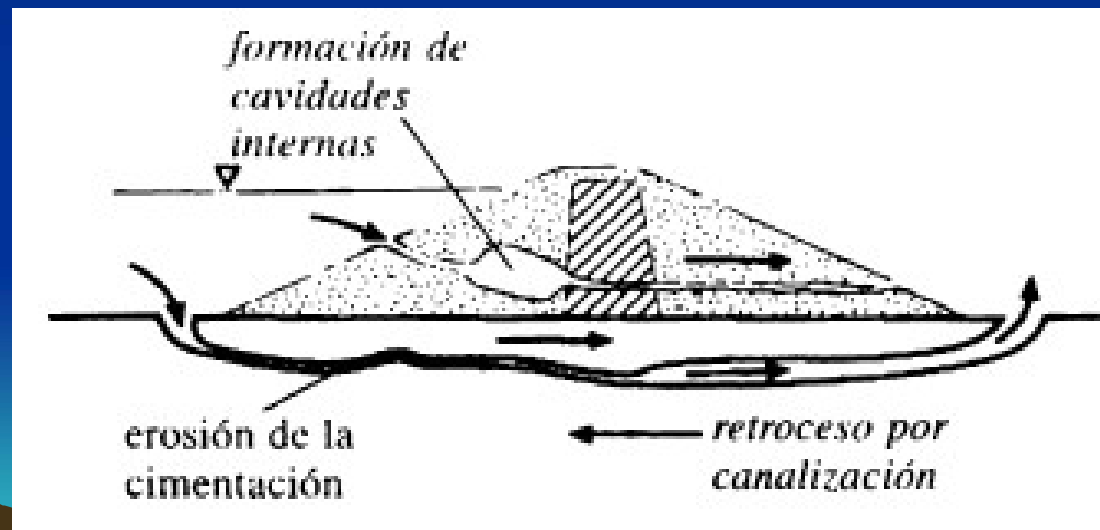
## **Estabilidad**



# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

## **Infiltración**

La infiltración dentro y debajo del relleno debe controlarse para prevenir la erosión interna oculta y la migración de materiales finos, por ejemplo, del núcleo, o la erosión externa y los desprendimientos. Los gradientes hidráulicos, la presión de infiltración y las velocidades de infiltración dentro y bajo la presa deben, por tanto, restringirse a niveles aceptables para los materiales del caso.





# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

## ***Protección del paramento aguas arriba***

El paramento aguas arriba debe protegerse contra la erosión local que resulta de la acción de las olas, movimiento del hielo, etc.

## ***Obras de desagüe y auxiliares***

Se debe ser muy cuidadoso para garantizar que el desagüe u otras estructuras construidas dentro de la presa, no permitan el paso sin obstrucción de agua infiltrada a lo largo de su perímetro con el riesgo de una migración de suelos y canalización.

# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

**Tabla 2.4** Mecanismos de fallas de presas de relleno y medidas preventivas

<i>Defectos</i>	<i>Características</i>	<i>Causas</i>	<i>Medidas preventivas - correctivas</i>
<b>Externos</b> Rebosamientos	Flujo sobre la presa y posible lavado; mayores riesgos en suelos menos cohesivos; más grave si es localizado.	Vertedero inadecuado y/o borde libre.  El borde libre reducido por sedimentación; vertedero obstruido.	Capacidad del vertedero adecuada y borde libre inicial, y/o refuerzo de la superficie con vegetación. Restauración de la sedimentación de protección de la cresta; buen mantenimiento.
Erosión por olas	Daño del paramento y espaldón aguas arriba.	Protección del paramento alterado o dañado.	Diseño apropiado y mantenimiento.
Erosión de pie de presa	Creciente que daña el pie de presa.	Canal del vertedero mal diseñado y/o localizado.	Buen diseño hidráulico; paredes de encauzamiento.
Cárcavas	Erosión local concentrada del paramento aguas abajo por la precipitación.	Drenaje superficial pobre.	Vegetación, refuerzo superficial y/o drenaje.

# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

## *Infiltración interna*

### **Pérdida de agua**

Aumento en las pérdidas de infiltración y/o irregularidades de la superficie freática; zonas blandas en taludes o aguas abajo.

Presa y/o cimentación permeable; rastrillo inadecuado.  
Agrietamiento interno.

Rastrillo e inyecciones en el núcleo.

Diseño cuidadoso, inyecciones.

### **Erosión de infiltración (erosión interna oculta)**

Infiltración turbia a través del sistema de drenaje.

Agrietamiento interno.

Infiltraciones a lo largo del perímetro de alcantarillas, túneles, tuberías, etc.

Drenaje interno, filtros, zonificación cuidadosa del relleno.

Diseño detallado, uso de collares, inyecciones.

# MECANISMOS Y MODOS DE FALLA

***Inestabilidad***  
**Deslizamiento  
de la cimentación**

Cimentación blanda o débil y/o presiones de agua en los poros altas.

Consolidar el suelo, drenaje, mejoramiento del terreno.

**Paramento aguas  
abajo**  
**Paramento aguas  
arriba**

Cambio en morfología; pandeo y deformaciones que conducen a deslizamientos de rotación o de traslación.

Altas presiones del agua en los poros; pendiente demasiado empinada; descenso rápido del nivel de agua en la pendiente aguas abajo.

Drenaje; tendido de pendientes o construcción de bermas estabilizadoras.

**Deslizamientos  
por flujo**

Licuefacción repentina, mecanismos de flujo rápido.

Activada por un choque o movimiento; suelos limosos en riesgo.

Compactación adecuada/consolidación o adición de una berma de pie.

***Deformación***  
**Sedimentación**

Pérdida del borde libre; zonas bajas locales.

Deformación y consolidación de la presa y/o cimentación; resultado de erosión interna, etc.

Restauración del borde libre; buenas especificaciones internas detalladas para reducir el riesgo de agrietamiento. por ejemplo, filtros protectores.

**Interna**

Deformación del perfil externo; agrietamiento interno.

Deformación relativa de zonas o materiales.

Buenas especificaciones, con zonas de transición amplia, etc.

# ASPECTOS DEL DISEÑO

## Zonificación de los rellenos de los espaldones

La zonificación cuidadosa y correcta de los materiales disponibles es un aspecto importante en el diseño de presas de relleno. Los principios esenciales son los siguientes:

- 1. El núcleo debe ser tan ancho como sea viable desde el punto de vista económico;
- 2. El material más fino del espaldón debe ser zonificado adyacente al núcleo;
- 3. Las zonas de los espaldones deben ser de material progresivamente más grueso a medida que se aproximan a las caras de los paramentos;
- 4. Cuando sea inevitable un cambio considerable de las características de los materiales en las zonas adyacentes, los efectos en la interfaz deben moderarse mediante la inserción de una zona intermedia o de transición.

# ASPECTOS DEL DISEÑO

La permeabilidad de zonas sucesivas debe incrementarse hacia los taludes exteriores, poniendo un filtro aguas abajo del núcleo.

Materiales que drenen con relativa libertad y con un alto grado de estabilidad inherente se utilizan para encerrar y soportar material menos estable del núcleo impermeable y el filtro.

Materiales más permeables, si están disponibles, se colocan en general en las secciones aguas arriba para permitir una disipación rápida de la presión del agua en los poros en descensos rápidos del nivel del agua.

**La estabilidad de una presa de relleno y su cimentación está determinada por su capacidad de resistir esfuerzos cortantes.**

# ASPECTOS DEL DISEÑO

Las presas de relleno construidas con materiales cohesivos de baja permeabilidad tienen en general pendientes más tendidas que aquellas utilizadas en rellenos zonificados, con zonas externas de drenaje libre que soportan las zonas internas con material de relleno menos permeable.

Materiales de relleno de menor calidad puestos al azar, pueden emplearse con satisfacción en las áreas dentro del perfil de la presa en donde ni la permeabilidad ni la resistencia al corte sean importantes y los requerimientos principales sean el volumen y el peso.

Por ejemplo, la colocación de un relleno estabilizador en el pie de la presa en una cimentación de baja resistencia o las denominadas 'zonas aleatorias' dentro de la presa.

# ASPECTOS DEL DISEÑO

En la zonificación y el perfil del núcleo se consideran los siguientes puntos generales:

- 1. Un **gradiente hidráulico nominal** a través del núcleo del orden de **1.5 - 2.5 es satisfactorio**, mientras que un valor mayor que 3.5 - 4 no es conveniente.
- 2. El perfil del núcleo no es crítico, siempre y cuando el talud aguas arriba del núcleo no controle la estabilidad global del talud. Es preferible que el núcleo esté próximo al centro y pueda moderar la ubicación del filtro aguas abajo si ese paramento se mantiene vertical.



# ASPECTOS DEL DISEÑO

**En la zonificación y el perfil del núcleo se consideran los siguientes puntos generales:**

- 3. El dimensionamiento de las zonas estructurales o zonas intermedias de transición se rige por consideraciones de estabilidad y de deformación. Algunas veces se complementa con información tomada de la construcción de rellenos especiales de prueba.
- 4. Se deben equilibrar la complejidad del diseño y la facilidad de construcción. La zonificación interna y los requerimientos asociados a las especificaciones deben mantenerse lo más simples que sea posible.

# ASPECTOS DEL DISEÑO

## Localización del vertedero

Para minimizar el riesgo de daño de una presa en condiciones de inundación, normalmente se requiere, por consideraciones de diseño geotécnicas e hidráulicas que **el vertedero de excesos y el canal de descarga se mantengan lejos del relleno.**

Los vertederos, por tanto, se construyen de ordinario en el terreno natural con un canal de desviación para alejarse del costado de la presa y descargar a un cuenco de amortiguación lejos del pie de presa aguas abajo.

Como alternativa se puede utilizar un vertedero de tipo pozo localizado dentro del embalse que descargue mediante un túnel o alcantarilla. En último caso, es preferible conducir la descarga a través del terreno natural del estribo dondequiera que sea posible. La alternativa es un alcantarillado de concreto si la cimentación es una roca incompresible.

# ASPECTOS DEL DISEÑO

## Borde libre

Las medidas necesarias para tener en cuenta en la sedimentación a largo plazo del borde libre mínimo están determinadas por la altura de la presa y la profundidad de la cimentación compresible en cualquier sección. Es, por consiguiente, usual construir la cresta de la presa con una inclinación longitudinal para acomodar la variación en la sedimentación.

El borde mínimo total desde el umbral del vertedero a la cresta de la presa (o a la parte superior de una pared estructural contra olas), debe ser por lo menos de 1.5 m para los embalses de pequeñas presas de relleno y mucho más grande para presas y/o embalses más grandes.

(MAS ADELANTE VEREMOS COMO CALCULARLO)

# ASPECTOS DEL DISEÑO

## Control de infiltración en la cimentación

Los flujos y la presión de infiltración dentro de la cimentación se controlan mediante los **rastrillos y el drenaje**.

**Los rastrillos son barreras impermeables que funcionan como una extensión del núcleo del relleno dentro de la cimentación.**

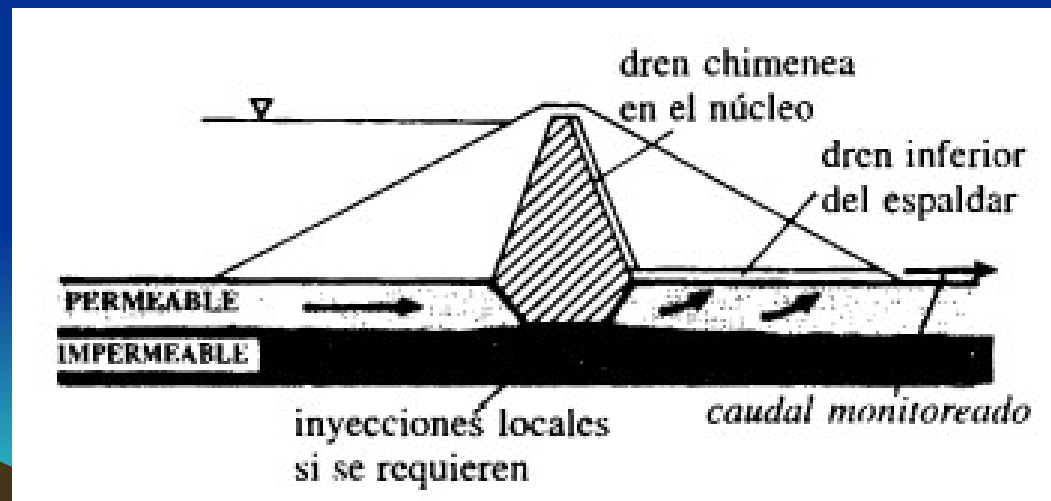
En general, se localizan bajo el núcleo, pero también pueden localizarse a una corta distancia aguas arriba y estar conectados al núcleo mediante una capa horizontal impermeable bajo el espaldón.

El rastrillo puede penetrar el estrato impermeable (un rastrillo 'que penetre totalmente') o, si el material permeable se presenta a profundidades considerables, puede terminar donde la pérdida de carga a través del rastrillo sea suficiente para efectuar el grado de control requerido (un rastrillo 'que penetre parcialmente').

# ASPECTOS DEL DISEÑO

Con frecuencia, los **rastrillos más antiguos** se construían como 'zanjas rellenas de arcilla' muy angostas, con el inconveniente de que muchos eran vulnerables a daños por infiltración y erosión.

El rastrillo relativamente ancho y con zanjas poco profundas se rellena con arcilla compactada y forma la base del núcleo que está por encima. Es muy efectivo, en particular si se complementa con inyecciones, pero los costos de excavación lo limitan a profundidades máximas de zanja del orden de 10-20 m.



# ASPECTOS DEL DISEÑO

El **rastrillo del tipo de zona inyectada**, se emplea en la actualidad para un rango amplio de condiciones de cimentación debido a los desarrollos en las técnicas de lechadas, por ejemplo las técnicas de inyección en aluviones.

El rastrillo se forma por varias líneas paralelas de agujeros de inyección alternadas, espaciadas de 2 a 3 m entre sus centros.

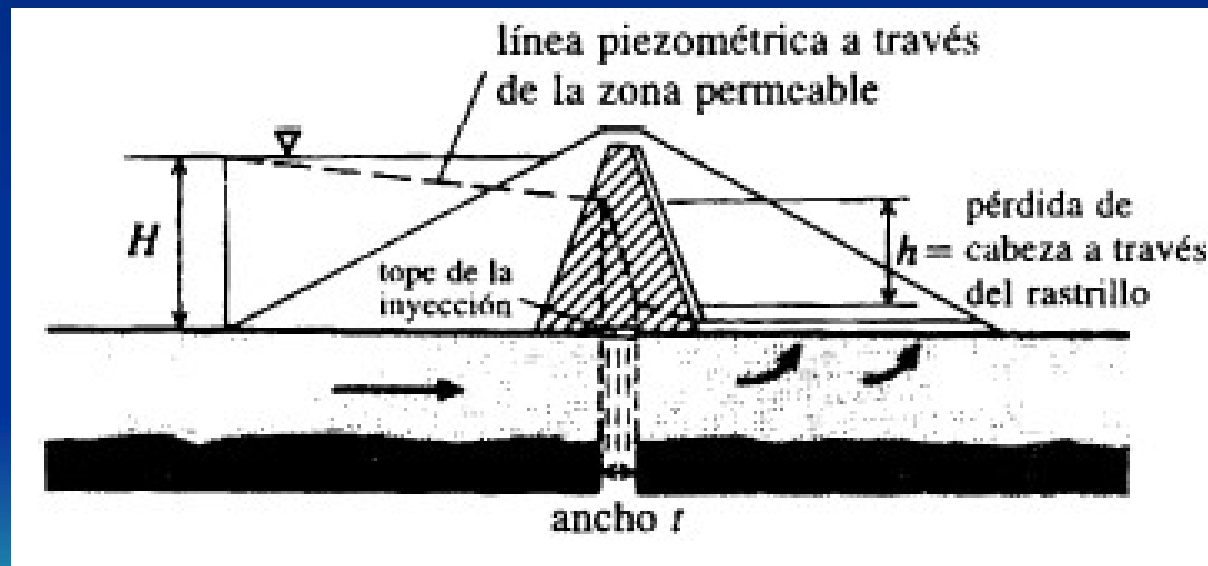
En general, se utilizan lechada de base de cemento, pero hay disponibles lechadas químicas más sofisticadas; costosas para condiciones particularmente difíciles.

• Los rastrillos inyectados son más efectivos en roca fracturada y en suelos de grano más grueso, donde pueden reducir la permeabilidad entre uno a tres órdenes de magnitud. Rastrillos de este tipo se han construido hasta profundidades de más de 100 m. Pueden ser instalados o mejorados después perforando a través del cuerpo de una presa, pero de ordinario son relativamente costosos.

# ASPECTOS DEL DISEÑO

Rastrillos de este tipo se han construido hasta profundidades de más de 100 m.

Pueden ser instalados o mejorados después perforando a través del cuerpo de una presa, pero de ordinario son relativamente costosos.



# ASPECTOS DEL DISEÑO

El **rastrillo del tipo diafragma delgado**, resultado de los avances logrados en los procesos geotécnicos, se forma mediante la excavación, en longitudes de tramos de una zanja angosta estabilizada con lechadas que luego se rellenan de modo permanente con una mezcla de arcilla, arena y bentonita.

De forma alterna puede emplearse un relleno de concreto 'plástico' relativamente débil y deformable para formar el elemento impermeable. El rastrillo de diafragma es muy efectivo en suelos de aluviones y de grano más fino y puede construirse de manera económica a profundidades de más de 30-40 m.

Muros de diafragma de tablestacado pueden dirigirse hasta profundidades de 20-25 m para formar un rastrillo bajo estructuras de cabeza baja.

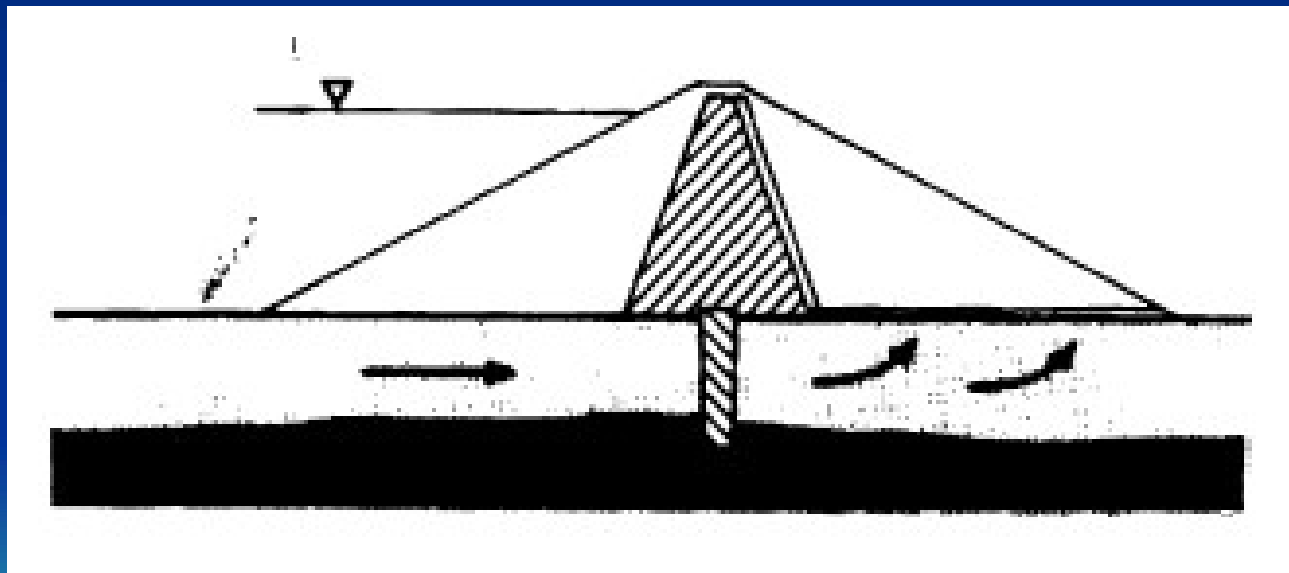
El costo de este tipo de rastrillo es moderado, pero su eficiencia es baja a menos que se complemente con inyecciones aguas arriba, por ejemplo con una lechada de bentonita.

- El control de la infiltración del rastrillo aguas abajo se favorece por la provisión casi universal de una **capa de drenaje horizontal a nivel del terreno** bajo el espaldón aguas abajo. A menudo se complementa con unos pozos profundos de



# ASPECTOS DEL DISEÑO

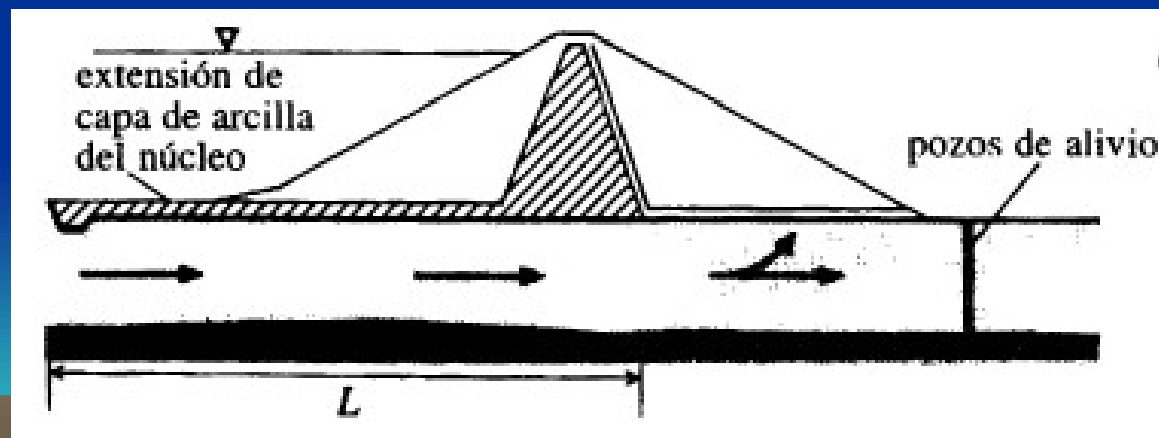
El control de la infiltración del rastrillo aguas abajo se favorece por la provisión casi universal de una capa de drenaje horizontal a nivel del terreno bajo el espaldón aguas abajo. A menudo se complementa con unos pozos profundos de alivio bajo o cerca del pie de presa.



# ASPECTOS DEL DISEÑO

También se puede moderar la infiltración por medio de una **continuación del núcleo aguas arriba mediante una capa horizontal impermeable que se extiende sobre el lecho del embalse**. La capa se lleva aguas arriba a una distancia suficiente para alargar la trayectoria de infiltración y de esta manera reducir el flujo al nivel requerido.

El espesor del relleno compactado requerido puede tomarse como  $e = 1.0 + 0.1H$ , donde  $H$  (m) es la altura del relleno. La eficiencia de una capa aguas arriba puede ser relativamente baja con respecto a los considerables costos de construcción involucrados.



# ASPECTOS DEL DISEÑO

## Obras de desagüe: túneles y alcantarillas

Donde sea posible, las obras de desagüe deben construirse como un túnel perforado a través del terreno natural del estribo de la presa.

Donde sea difícil o inconveniente desde el punto de vista económico, una alcantarilla de concreto cimentado sobre roca es una alternativa satisfactoria, siempre y cuando se pueda asegurar que, si no está cimentada en una roca poco profunda, la alcantarilla que es proyectada con cierta rigidez no origine agrietamientos por corte del relleno cuando este último sufra sedimentaciones.

La sección transversal del alcantarillado deberá ser ojival, conjuntas transversales a intervalos de 10-15 m y un revestimiento externo para deslizamiento, a fin de ayudar al asentamiento del relleno con respecto a la alcantarilla.

**Es potencialmente peligroso construir una alcantarilla de desagüe sobre una cimentación compresible dentro del relleno mismo, debido a los efectos de las deformaciones diferenciales y al posible agrietamiento.**

# ASPECTOS DEL DISEÑO

## **Protección del paramento aguas arriba**

Para proteger el paramento aguas arriba contra la erosión por olas, están disponibles varias opciones que abarcan desde el revestimiento con mezclas asfálticas tradicionales con inyecciones en las juntas, pasando por pantallas de concreto, hasta el uso de bloques de concreto, acorazamiento en roca y la escollera.

Una capa de protección pesada y gruesa es necesaria entre el nivel de la cresta y el nivel mínimo de operación o de descenso del agua, suministrando protección reducida de ahí hasta el lecho del embalse.

Las mezclas asfálticas son costosas y, aunque son durables, no son disipador eficiente de la energía de las olas.

Las losas de concreto tienen limitaciones similares y permiten elevaciones considerables de las olas que deben incluirse dentro del diseño del borde libre. Las obras en bloques pesados de concreto con juntas abiertas cimentadas sobre grava y un filtro granular son preferibles y en la actualidad se utilizan ampliamente. Cuando se dispone de rocas durables, grandes y angulares, el acorazamiento en

# ASPECTOS DEL DISEÑO

Las obras en bloques pesados de concreto con juntas abiertas cimentadas sobre grava y un filtro granular son preferibles y en la actualidad se utilizan ampliamente.

Cuando se dispone de rocas durables, grandes y angulares, el acorazamiento en roca y la escollera de roca lanzada proveen una protección efectiva.

Una regla empírica para determinar el tamaño de la roca en el acorazamiento necesario para la estabilidad bajo acción de las olas es la siguiente:

$$M = 10^3 \cdot H_s^3$$

donde  $M$  (kg) es la masa de la piedra requerida y  $H_s$  es la altura significativa de la onda (m).

# ASPECTOS DEL DISEÑO

## **Cresta de la presa de relleno**

La cresta debe tener un ancho no menor a 5 m y deberá tener una vía de acceso alisada y bien drenada.

(En las presas antiguas, este último requerimiento proporciona una resistencia valiosa contra los efectos erosivos de pequeños rebosamientos ocasionales).

# MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

**Tres categorías principales de material de relleno son necesarias con relación a las presas de relleno térreo para cumplir los requerimientos del núcleo, espaldones, capas de drenaje, filtros, etcétera.**

Los rellenos del núcleo deben tener **permeabilidad baja** y de forma ideal deben ser de **plasticidad intermedia** a alta para acomodar la deformación sin arriesgar el agrietamiento.

No es necesario, y posiblemente desventajoso, que tengan una alta resistencia al corte.

Los suelos más apropiados tienen contenidos de arcilla de más de 25-30%, por ejemplo, tilitas glaciales, etc.; aunque también pueden utilizarse arenas arcillosas y limos.

**El núcleo es el elemento principal de un relleno y es el más exigente respecto a las características y uniformidad del material.**

# MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

Las principales características de los grupos más importantes de suelos apropiados para núcleos trabajados con rodillo:

**Tabla 2.5** Características de suelos para núcleos

<i>Descripción del suelo (BS 5930)</i>	<i>Resistencia al agrietamiento</i>	<i>Resistencia a la erosión y canalización</i>	<i>Rodillo de compactación óptimo</i>	<i>Sensibilidad al control de contenido de agua en la compactación</i>
Arenas muy limosas o gravas; 6% arcilla (GM-SM)	Baja; incrementos con $<\rho_d$ y $>I_p$	Baja; incrementos con $<\rho_d$ y $>I_p$	Banda de rodadura neumática (20-80 t)	Alta para evitar fragilidad
Arenas muy arcillosas o gravas; 20% arcilla (GC-SC)	Intermedia con un $\rho_d$ representativo	Intermedia	Banda de rodadura neumática (20-80 t)	Baja para controlar $u_w$
Arcillas con baja plasticidad (CL)	Relativamente flexible	Alta; incrementa con $>\rho_d$	Banda de rodadura neumática o de pata de cabra	Intermedia a alta para controlar $u_w$
Arcillas con alta plasticidad (CH)	Flexible; puede resistir grandes deformaciones	Alta; incrementa con $\rho_d$	De pata de cabra	Alta para controlar $u_w$



# MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

Las propiedades del núcleo compactado con arcilla son críticas para la integridad de la impermeabilización a largo plazo. Los valores representativos de los parámetros mecánicos más importantes de rellenos de tierra compactados se resumen:

**Tabla 2.6** Propiedades mecánicas comunes para rellenos de tierra compactada (comparar con la tabla 2.3)

Tipo de relleno	Características de compactación		Resistencia al corte (esfuerzos efectivos)		Coeficiente de compresibilidad $m_v (\times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ kN}^{-1})$	Coeficiente de permeabilidad horizontal, $k_h (\text{m s}^{-1})$
	Peso unitario $\gamma_{d \text{ máx}} (\text{kN m}^{-3})$	Agua $w_{\text{opt}} (\%)$	Cohesión, $c' (\text{kN m}^{-2})$	Ángulo de fricción $\phi' (\text{grados})$		
Gravas (GW-GC)	18-22	5-10	0	35-40	0.1-1.0	$10^{-3}$ - $10^{-5}$
Arenas (SW-SP)	16-20	10-20	0	35-40	0.5-1.5	$10^{-4}$ - $10^{-6}$
Limos (ML-MH)	16-20	15-30	<10	25-35	0.5-2.5	$10^{-5}$ - $10^{-8}$
Arcillas (CL-CH)	16-21	15-30	<20	20-30	0.5-3.0	$10^{-7}$ - $10^{-10}$
Roca triturada (tamaños entre 2-600 mm)	17-21	N/A	0	40-55	N/A	$10^{-1}$ - $10^{-2}$

# MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

El **relleno del espaldón** requiere tener una **resistencia al corte bastante grande** para permitir una construcción económica de taludes estables con el ángulo más alto posible del talud.

Es preferible que el relleno tenga una permeabilidad relativamente alta para ayudar a la disipación de la presión del agua en los poros.

Los materiales apropiados varían a lo largo de un espectro que cubre materiales granulares gruesos hasta rellenos que difieren muy poco de los materiales del núcleo.

Los espaldones no necesitan ser homogéneos; en su interior es habitual utilizar los diferentes rellenos que estén disponibles en zonas predeterminadas.

# MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

El material de **drenaje del filtro** debe estar limpio, permitir el drenaje libre y no ser propenso a degradación química.

Las gravas naturales finas procesadas, rocas trituradas y arenas gruesas o medias son apropiadas, y se emplean en la secuencia y gradación determinada por la naturaleza del núcleo y/o los rellenos de los espaldones adyacentes.

**El costo de los materiales procesados de filtro es relativamente alto, y su requerimiento, por tanto, debe restringirse al mínimo.**

# LA CONSTRUCCIÓN

Las **operaciones de construcción** que siguen al desarrollo inicial del sitio se pueden **clasificar en cuatro grupos principales de actividades**, relacionadas con:

- (1) desarrollo de la fuente del material;
- (2) preparación y construcción de la cimentación;
- (3) construcción y control de relleno;
- (4) construcción de obras complementarias.

# LA CONSTRUCCIÓN

## (1) desarrollo de la fuente del material;

comprenden la apertura de las áreas de extracción o canteras e incluyen la instalación de equipos fijos como trituradoras, bandas transportadoras, etc., y también la construcción de vías de acceso y de acarreo entre las diferentes áreas de extracción y el sitio de la presa, y la movilización de los equipos de excavación y acarreo.

# LA CONSTRUCCIÓN

## (2) preparación y construcción de la cimentación;

incluyendo desvíos del río, pueden realizarse de manera simultánea con el desarrollo de las fuentes de relleno. El desvío temporal del río se efectúa por lo general mediante la perforación de un túnel lateral que en la mayoría de los casos alberga los trabajos de desagüe. (Cuando se planea una alcantarilla de desagüe a través o bajo el relleno en lugar del túnel lateral, ésta puede usarse en forma temporal para desviar el río).

# LA CONSTRUCCIÓN

Se remueven la capa superficial del suelo y los depósitos meteorizados de la superficie de los terrenos de acarreo, etc. En caso de una cimentación compresible y blanda, se puede mejorar la resistencia y acelerar la construcción mediante preconsolidación y/o instalación de drenes de arena. En esta etapa también se instala la instrumentación de la cimentación para vigilar la presión de poros y el comportamiento del rastrillo. La construcción de la cimentación se completa con la colocación de las capas de drenaje que sostendrán la base del espaldón aguas abajo.

# LA CONSTRUCCIÓN

## (3) construcción y control de relleno;

es un ejercicio de la utilización eficiente del equipo cumpliendo los términos de los requerimientos de especificaciones de rendimiento de los materiales y las técnicas de compactación. Las operaciones de colocación de relleno podrán estar influidas por las condiciones climáticas y cambios sutiles en las características del material. El control se centra en la supervisión del contenido de agua, el espesor de las capas y el procedimiento de compactación.



# LA CONSTRUCCIÓN

La calidad y uniformidad del relleno para el núcleo compactado son decisivas. En la práctica reciente se emplean enfoques estadísticos en las pruebas y en el control de calidad y se exige que la resistencia al corte no drenado,  $c_u$ , se halle dentro de los límites especificados.

Para las arcillas del Reino Unido (Kennard *et al.*, 1979) es común especificar  **$c_u = 55-100 \text{ kN m}^{-2}$** .

# LA CONSTRUCCIÓN

Para controlar la presión del agua en los poros en la construcción y acelerar la consolidación de materiales de relleno cohesivos de baja permeabilidad puede ser necesario instalar capas de drenaje horizontales en ambos espaldones, a intervalos verticales de **3-5 m**.

La instalación de la instrumentación en el núcleo y los espaldones procede en paralelo con la colocación del relleno. La construcción del relleno concluye con la culminación del acorazamiento en roca del paramento aguas arriba u otras obras de revestimiento.

# LA CONSTRUCCIÓN

## (4) construcción de obras complementarias.

comprende la construcción del vertedero y los cuencos de amortiguación, alcantarillas o túneles para obras de desagüe, etc., torres de válvulas y obras de control similares. Incluye también el acabado de los detalles de la cresta, como calzadas, obras de drenaje, barreras, etc., y, donde las condiciones climáticas lo permitan, el recubrimiento vegetal del talud aguas abajo.

# INFILTRACIÓN

**La superficie freática del régimen de infiltración, es decir, la superficie libre, debe mantenerse alejada del paramento aguas abajo para evitar altas presiones del agua en los poros que puedan promover la inestabilidad del talud.**

En el caso extremo en que la línea de infiltración emerja en el paramento, ocurrirá ablandamiento local y erosión y se iniciarán desprendimientos.

**Las presiones y velocidades de infiltración también deben controlarse para prevenir la erosión interna y la migración de partículas.**

El control de infiltración se efectúa mediante la incorporación de drenajes del tipo chimeneas verticales y capas de drenaje horizontales, protegidas por filtros y capas apropiadas de transición.

# INFILTRACIÓN

**Las relaciones fundamentales que se aplican en las redes de flujo en medios porosos bidimensionales se resumen a continuación.**

Para suelos anisotrópicos, con coeficiente de permeabilidad horizontal  $K_h > K_v$  el coeficiente de permeabilidad vertical, **el factor de transformación de escala horizontal,  $\lambda$ , y la permeabilidad efectiva,  $k'$ , están dados, respectivamente, por:**

$$\lambda = \left( \frac{k_v}{k_h} \right)^{1/2}$$

$$k' = (k_v \cdot k_h)^{1/2}$$

# INFILTRACIÓN

El flujo de infiltración,  $q$  se define por:

$$q = k' \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_d}$$

donde  $H$  es la diferencia de energía y la razón  $N_f/N_d$  es el factor de forma de la red de flujo, es decir el número de canales de flujo,  $N_f$ , respecto del número de reducciones en el potencial  $N_d$ .

# INFILTRACIÓN

Si se aplica la situación de flujo no confinado en la infiltración a través de una presa homogénea, **la superficie freática es en esencia parabólica.**

La curva puede construirse utilizando la aproximación de Casagrande-Kozeny o a partir de la interpretación de los datos piezométricos.

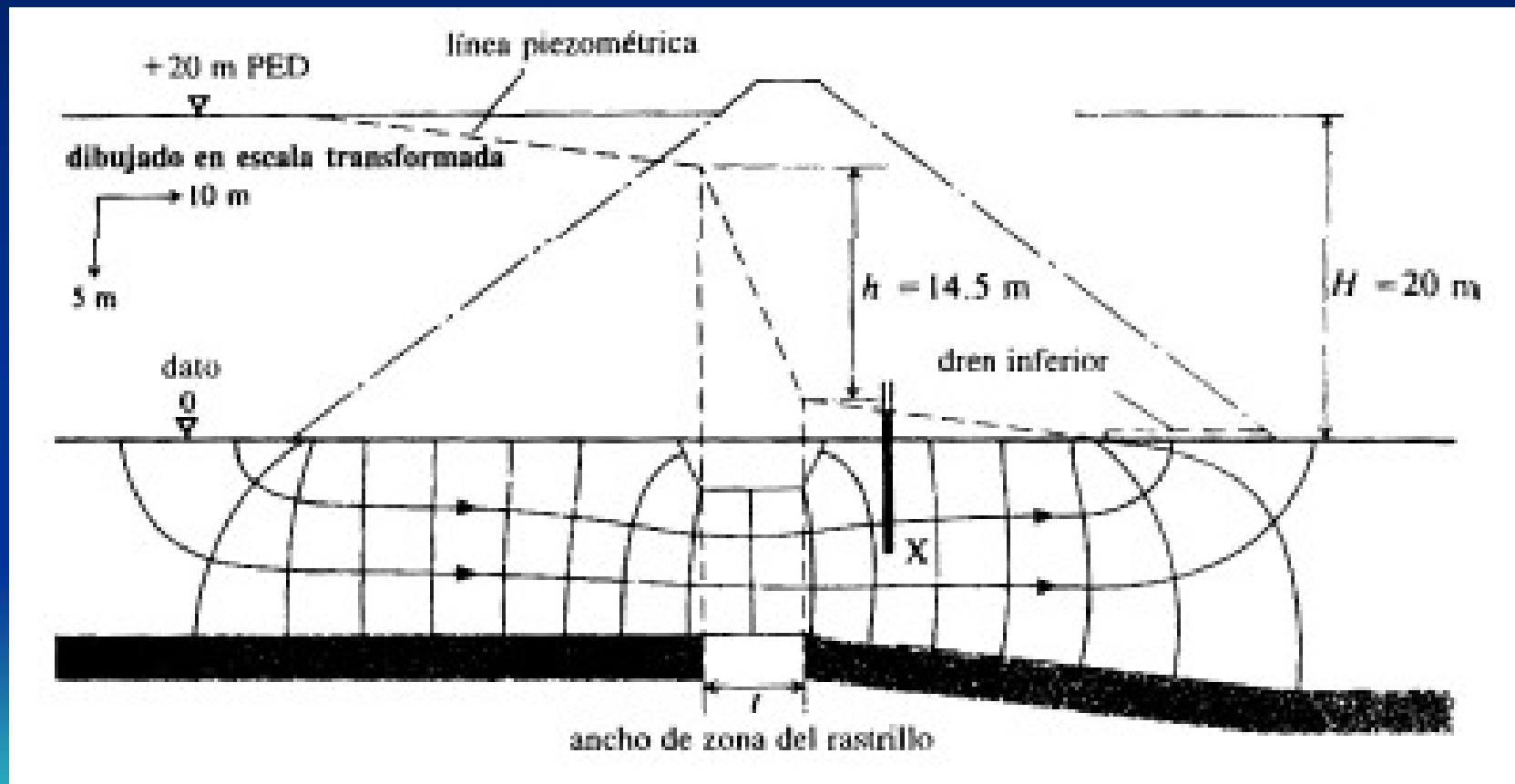
En el caso de un núcleo central y/o un relleno zonificado, la construcción de la red de flujo se basa en la consideración de la permeabilidad relativa de cada elemento y la aplicación de la ecuación de continuidad:

**Q espaldón aguas arriba = Q zona del núcleo =**

**Q espaldón aguas abajo + Q drenes**

# INFILTRACIÓN

Una red de flujo que ilustra la infiltración bajo un relleno se presenta en la figura:





# EFICIENCIA DEL NÚCLEO Y RASTRILLO

La efectividad de un núcleo o de un rastrillo puede definirse de forma empírica en función de dos criterios:

## EFICIENCIA DE CARGA

$$E_h = \frac{h}{H}$$

donde  $h$  es la pérdida de carga a través del núcleo o del rastrillo y  $H$  es la carga total diferencial, como se muestra en la figura anterior.

## EFICIENCIA DE FLUJO

$$E_Q = 1 - \frac{Q}{Q_0}$$

donde  $Q$  y  $Q_0$  son, respectivamente, los caudales de infiltración con y sin el núcleo o rastrillo.

# EFICIENCIA DEL NÚCLEO Y RASTRILLO

Para el caso especial de un rastrillo que penetra totalmente y un régimen de flujo paralelo a la frontera, las eficiencias  $E_H$  y  $E_Q$  se relacionan así:

## EFICIENCIA DE FLUJO

$$\frac{E_H}{E_Q} = \frac{k_1}{k_1 - k_2}$$

donde  $k_1$  y  $k_2$  son los coeficientes de permeabilidad de la cimentación natural y la zona del rastrillo, respectivamente.

**Las eficiencias registradas para rastrillos bien contruidos en lo normal exceden entre 50 y 60%.**

# DISEÑO DEL FILTRO

El diseño de los filtros y las capas de transición para prevenir la migración de finos inducida por la infiltración se estudia en textos de mecánica de suelos.

Requieren ser suficientemente finos para prevenir la migración del suelo que protegen (**criterio de canalización**) y, al mismo tiempo, ser suficientemente permeables para permitir la descarga libre de la infiltración (**criterio de permeabilidad**).

El principio esencial de diseño plantea que cualquier cambio de material fino a grueso debe efectuarse de manera gradual con un filtro en etapas o zonas de transición, es decir núcleo de arcilla → arena → arena gruesa → grava fina → espaldón grueso, etcétera.

# DISEÑO DEL FILTRO

Un enfoque empírico de amplio uso para definir las envolventes de granulometría del material de filtro apropiado está dado por las expresiones:

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{suelo})} \leq 5$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{suelo})} \geq 5$$

$$\frac{D_{50}(\text{filtro})}{D_{50}(\text{suelo})} \leq 25$$

donde  $D_{15}$  se refiere al tamaño que pasa el 15%, etc., determinado por un análisis granulométrico. Las dos primeras expresiones indican los criterios de canalización y permeabilidad, respectivamente; la última expresión define la razón de permeabilidad.

# GRACIAS!!!!

## Cátedra de Obras Hidráulicas (CI457)

### BIBLIOGRAFÍA

[1] RAFAEL DAL-RÉ TENREIRO (2003) Pequeños Embalses de Uso Agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Hidráulicas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. CEILP.

[2] BUREAU OF RECLAMATION (1983) Diseño de Presas Pequeñas. USA.

[3] DAL-RÉ RAFAEL, SEGURA R. (1985) Diseño y Construcción de Pequeños Embalses. Manuales Técnicos. Madrid.