

# CAPITULO 2

## FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

### 2.1 Prospección geofísica

Es importante describir de forma sencilla el concepto de Prospección Geofísica, como ingeniería aplicada en el estudio del interior de la Tierra y de las propiedades mecánicas de las rocas a profundidad, a partir de las variaciones de sus parámetros físicos, mediante técnicas indirectas y no destructivas.

Los resultados que nos arrojan los diferentes métodos geofísicos evalúan las características mecánicas del macizo rocoso, como la resistencia a la corriente eléctrica, densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de ondas compresionales y longitudinales, etc. Así mismo nos revela la distribución de las unidades geológicas mapeadas.

La interpretación de esta información determina la geometría del subsuelo y nos proporciona datos útiles sobre la estructura y configuración de los estratos, así como, la localización de importantes discontinuidades como son fallas, fracturas, diques, entre otras.

En actualidad los métodos geofísicos tienen gran demanda en los estudios de factibilidad para la cimentación de grandes obras de ingeniería civil debido a su eficacia, ya que, en gran medida nos permite tener una clara idea de los problemas geológicos que de manera superficial no son visualizados (espesores de roca intemperizada y de rellenos aluviales, contactos geológicos, propiedades geomecánicas de las rocas y suelos, etc.). Por otro lado tenemos un beneficio adicional, estos métodos son económicos y rápidos.

MÉTODOS GEOFÍSICOS			
Método	Técnicas		Aplicaciones
Eléctrico	S.E.V.		Interpretación geológica, grado de alteración, contenido de agua y salinidad.
	Calicatas eléctricas		Igual al anterior pero para el estudio de su variación lateral
	Dipolo-dipolo		Igual que el SEV y las calicatas pero para el estudio de su variación a lo largo de una sección.
Sísmico	Sísmica de refracción		Espesor de recubrimientos, excavabilidad, calidad de la roca, condiciones de cimentación.
	Sísmica de reflexión		Investigación geológica profunda en obras subterráneas y laderas.
Electromagnético	EM en dominio de frecuencias		Interpretación geológica, grado de alteración, contenido de agua y salinidad.
	EM en dominio de tiempos		Lo mismo que la anterior pero para grandes profundidades.
	V.L.F.		Resistividad del terreno en superficie, interpretación geológica y variaciones laterales.
	Geo-radar		Huecos y elementos enterrados, contactos litológicos, investigación de estructuras.
Gravimétrico	Gravimetría		Contactos litológicos con contraste de densidad, terrenos blandos, cavidades, zonas de disolución y zonas de falla.
	Microgravimetría		Idem al anterior pero de mayor detalle.
Magnético	Magnetometría		Galerías mineras abandonadas, huecos rellenos de arcilla, conducciones enterradas, fallas, diques y masas mineralizadas.
Sísmica en sondeos	Cross-hole		Litología del sondeo, velocidad de ondas P y S, módulos dinámicos, propiedades resistentes, excavabilidad, espesor de recubrimientos.
	Down-hole Up-hole		
	Tomografía sísmica		Interpretación geológica, cavidades, módulos dinámicos, velocidades de ondas P y S, propiedades resistentes, zonas de fractura, zonas de alteración, excavabilidad, espesor de recubrimientos.
Testificación geofísica (en el interior de sondeos)	Eléctrica	Resistividad eléctrica Potencial espontáneo Cond. Eléctrica Tomografía eléctrica	Salinidad del agua, resistencia del material, secuencia litológica. Fracturas
	Nuclear o radioactiva	Gamma natural Gamma espectral Neutron Gamma-Gamma	Investigación de arcillas, contenido en agua, densidad del terreno.
	Sónica o acústica		Propiedades mecánica, grado de fracturación, secuencia litológica.
	Fluidos	Temperatura Conductividad Velocidad de flujo	Puntos de afluencia de agua al sondeo, niveles freáticos.
	Geométricos	Calibre Dipmetro Registro de T.V.	Acotaciones del sondeo, huecos y fracturas, orientación de discontinuidades.

Tabla 1. Métodos geofísicos. Del libro de Ingeniería Geológica de Luis I. González de Vallejo. Pag.371.

Para el cumplimiento de los objetivos del estudio en el sitio Presidio, se empleó el método de sismica de refracción, debido a que mediante este método obtenemos la calidad de la roca, lo cual nos indica la frontera entre una roca de mala calidad, altera y/ o fracturada y una roca sana. Ya que, para la construcción de una presa es importante saber el volumen de roca a remover o tratar (roca de mala calidad).

## 2.2 Sísmica de Refracción

El método sísmico está basado en las distintas velocidades de propagación de las ondas elásticas en medios diferentes. Es importante destacar el papel fundamental que juegan los módulos de elasticidad, ya que, de ellos depende básicamente la velocidad en que se propagan las ondas, debido a que son muy distintos para cada material.

En la Geotecnia la sismica de refracción es de gran importancia y aplicación, debido a que nos proporciona las velocidades de onda del medio con las cuales podemos obtener los módulos de elasticidad, compacidad, profundidad del basamento, espesor de los materiales no consolidados o semi-consolidados, estimación cualitativa de la resistencia geomecánica "calidad" de las rocas, grado y espesor de alteración, etc.

Las ondas generadas por cualquier forma de golpe (explosión, golpe de marro, etc.) se constituyen por ondas P, ondas S y ondas superficiales. En la sismica de refracción generalmente se utilizan las ondas P y para la obtención de módulos elásticos dinámicos también se utilizan las ondas S.

A continuación se abordará más a detalle el Método de Sísmica de Refracción.

Las ondas elásticas bajo la superficie, al llegar a una interfase entre dos medios, se reflejan y refractan, en este caso se desarrolla la teoría de las refractadas.

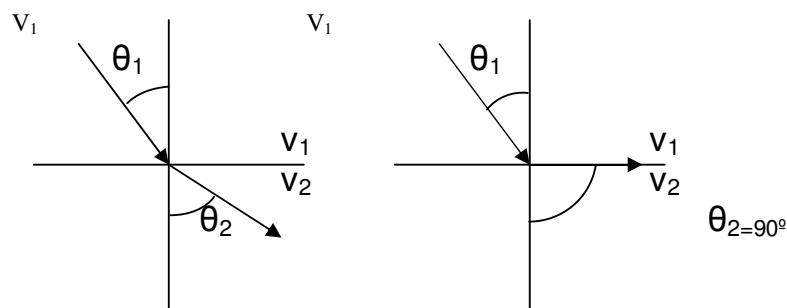


Figura 1. Refracción

Siendo  $V_1$  y  $V_2$  las velocidades de las ondas P en dos medios diferentes y de acuerdo con sus ángulos de incidencia tenemos las siguientes relaciones.

$$\frac{\text{Sen } \theta_1}{\text{Sen } \theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ley de Snell} \quad \text{ecc ( 1 )}$$

Cuando el ángulo  $\theta_2 = 90^\circ$  (ángulo crítico) tenemos:

$$\text{Sen } \theta_1 = \text{Sen } \theta = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{ecc ( 2 )}$$

### 2.2.1 Principio de Huygens:

Se encarga del análisis aplicado a los problemas de propagación de ondas, el cual citando la definición que da el Ing. Enrique del Valle Toledo tenemos que “La trayectoria que incide con el ángulo crítico genera un frente de onda que al desplazarse en el medio de alta velocidad produce un frente de onda en el medio  $V_1$  que corresponde a trayectorias paralelas con un mismo ángulo”.

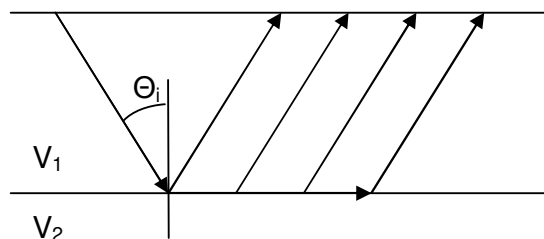


Fig. 2 Trayectoria con ángulo crítico. Por el Ing. Enrique del Valle.

Así pues, los sismodetectores pueden llegar dos ondas, la directa y la refractada, las cuales se representan geoméricamente de la siguiente forma.

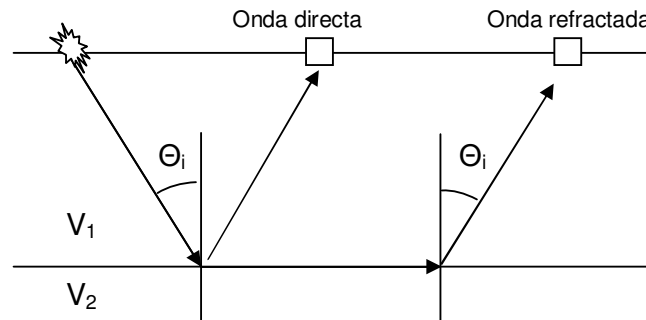


Fig. 3 Trayectoria de onda directa y refractada. Por el Ing. Enrique del Valle

Como se observa la onda elástica que incide con un ángulo  $\theta$  y viaja a lo largo del plano de intersección entre dos planos, se refracta con el mismo ángulo pero en dirección opuesta punto a punto. El tiempo que hacen en arribar las ondas refractadas desde el punto de tiro hasta cada uno de los sismodetectores se conoce como tiempo de viaje y son registrados para posteriormente graficarlos en función a su distancia y formar una curva conocida como dromocrónica o curva tiempo-distancia.

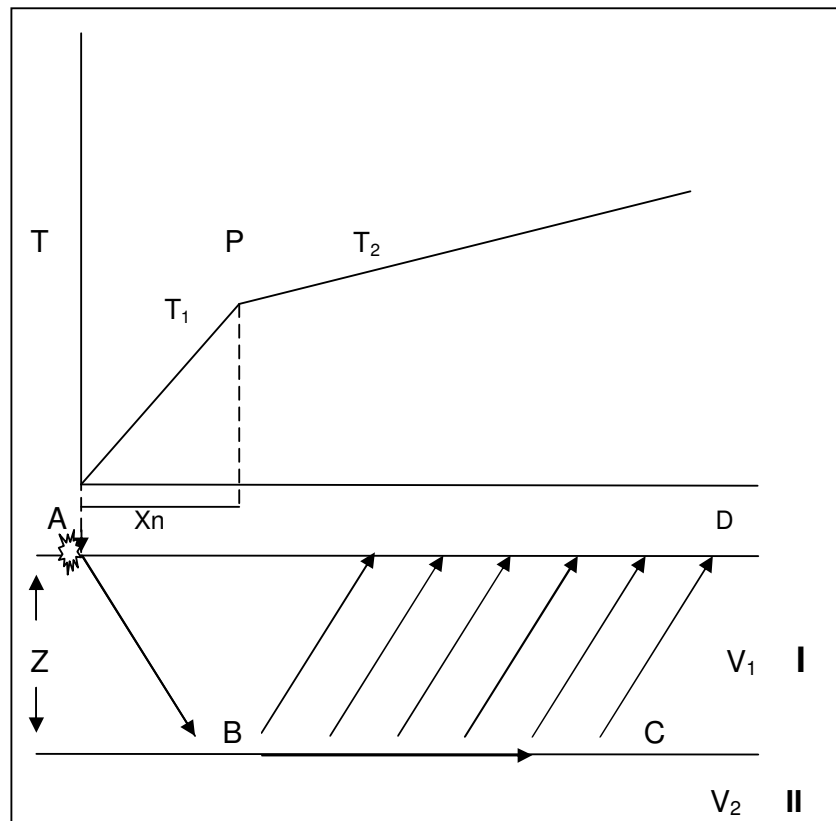


Fig. 4 Propagación de ondas refractadas y curva de tiempo de viaje.

Este grafico nos muestra un modelo sencillo, donde:

- $T_1$  es la curva de tiempo de viaje para las ondas directas
- $T_2$  curva de tiempo para las ondas refractadas
- $P$  es el punto de cambio de pendiente
- $X_n$  distancia crítica
- $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  trayectoria

El punto P lo obtenemos de la distancia crítica, la cual nos representa la distancia hasta donde los primeros arribos son de las ondas directas viajando por la capa I y claramente se observa que llega primero a los detectores más cercanos al punto de tiro que la onda refractada. La profundidad de la interfase o espesor de la capa I se obtiene a partir de la distancia crítica con la siguiente ecuación.

$$Z = \frac{X_n}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad \text{ecc. (3)}$$

Esto es posible siempre  $V_1 < V_2$ , el caso contrario  $V_1 > V_2$  se conoce como efecto de inversión de velocidades.

### 2.2.2 Método de tiempo de intersección

Dentro de estos se encuentran los modelos de estratificado horizontal y capas inclinadas.

#### *Capas múltiples y horizontales*

En ocasiones alcanzamos más de dos capas de diferentes materiales y velocidades contrastantes que están dispuestas horizontalmente.

En estos casos las velocidades  $V_n$  se obtienen directamente del inverso de las pendientes obtenidas en la dromocrónica, posteriormente empleamos las intersecciones  $T_{in}$  de las prolongaciones de las rectas de las velocidades con el eje del tiempo (ordenadas), para finalmente hacer uso de las ecuaciones siguientes (Redpath 1973):

$$Z_1 = \frac{(T_{i2})V_1}{2 \cos \left( \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \right)} \quad \text{ecc. (4)}$$

$$Z_2 = \frac{\left[ \begin{array}{c} \cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_3}\right)\right) \\ T_{i3} - T_{i2} \frac{\cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)}{\cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_3}\right)\right)} \end{array} \right] V_2}{2 \cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_2}{V_3}\right)\right)} \quad \text{ecc. (5)}$$

$$Z_3 = \frac{\left[ \begin{array}{c} \cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_4}\right)\right) \\ T_{i4} - T_{i2} \frac{\cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)}{\cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_4}\right)\right)} - \frac{2Z_2 \cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_2}{V_4}\right)\right)}{V_2} \end{array} \right] V_3}{2 \cos\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_3}{V_4}\right)\right)} \quad \text{ecc. (6)}$$

*Modelo Estratificado con contactos inclinados*

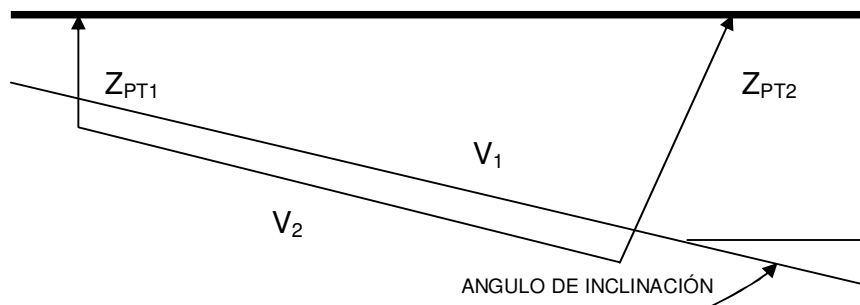


Fig. 5 Modelo estratificado con contactos inclinados

Para este modelo es necesario tener dos puntos de tiro uno en cada extremo del tendido.

Los datos que necesitamos se obtienen del análisis de las dromocrónicas, sin olvidar que algunos de ellos son únicamente aparentes, como en el caso de tener un modelo de dos capas con un solo contacto, en el cual las velocidades de la segunda capa ( $V_{2U}$  y  $V_{2D}$ ) son aparentes y se obtienen en cada punto de tiro.

Para calcular el echado ( $\gamma$ ) tenemos la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{1}{2} \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2D}} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2U}} \right) \right] \quad \text{ecc. (7)}$$

La velocidad real de la segunda capa la obtenemos con:

$$V_2 = \left[ \frac{2V_{2U}V_{2D}}{V_{2U} + V_{2D}} \right] \cos(\gamma) \quad \text{ecc. (8)}$$

En el caso de la profundidad cada uno de los puntos de tiro se obtienen con:

$$Z_{PT1} = \frac{1}{2} V_1 T_{1D} \cos(\gamma) \quad \text{ecc. (9)}$$

$$Z_{PT2} = \frac{1}{2} V_1 T_{1U} \cos(\gamma)$$

### 2.2.3 Método de tiempo de retraso

Si se tienen contactos irregulares entre dos capas se utiliza este método para poder calcular la profundidad bajo cada geófono, suponiendo que las ondas que se originan en los puntos de tiro viajan por la misma interfase.



Para llevar a cabo este método es necesario saber los tiempos de arribo de ambas señales a cada geófono, las velocidades reales y el tiempo total de viaje el cual tiene que ser casi el mismo en ambas trayectorias.

Una vez teniendo estos parámetros tenemos que la profundidad bajo cada geófono está dada por:

$$Z_D = \frac{1}{2} \frac{(T_{D1} + T_{D2} - T_t) V_1}{\cos \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \right]} \quad \text{ecc. (10)}$$

### 2.3 Tipos de presas y su clasificación

La diferencia entre los tipos de presa obedece a las diversas posibilidades de cumplir la doble exigencia de resistir el empuje del agua y evacuarla cuando sea preciso. Lo que condiciona la elección adecuada de algún tipo de presa en particular son las características del terreno y los usos que se le quiera dar al agua.

El problema fundamental que debe resolverse es la forma en que la presa absorberá la presión que le transmite el agua sin romperse y sin transmitir al terreno natural más carga de la que éste puede soportar, ya que una corriente de agua posee una "fuerza" que es más incontrolable cuanto mayor es su caudal y la pendiente del río.

Al oponerle un obstáculo para embalsarla, la estructura llamada presa tiene que poder asimilar tal empuje de forma permanente, para cualquier condición de carga y transferirlo al terreno. Tanto la forma en que la estructura resiste ese empuje, como la manera en que la transmite al terreno, se determinarán el tipo de presa que el proyectista elija. La cimentación, a su vez, debe ser capaz de soportar la presión a que la someterá la presa una vez lleno el embalse, cualidad que suele denominarse como "capacidad de carga" y que depende del tipo de suelo y/o roca que la conforma, es decir de la geología del terreno de desplante.

Otra importante condición la constituye la necesidad de lograr las premisas técnicas precedentemente enunciadas a un costo que permita la construcción económica de la obra, con esquemas factibles y aceptables para el mercado financiero. Esta búsqueda de alternativas económicas posibles, ha llevado en los últimos años a la incorporación de nuevos diseños y sistemas constructivos para las presas.

Las presas básicamente se dividen en dos grupos: presas de materiales graduados y presas de concreto, las cuales a su vez se subdividen como se describe a continuación.

### 2.3.1 Presas de Materiales Graduados

Estas presas se construyen a partir de materiales de la tierra como son la roca y el suelo. Sus ventajas son: mayor flexibilidad y tolerancia a cierto asentamiento, así mismo se pueden desplantar sobre cimentaciones de suelo por lo que se pueden construir en sitios donde las de concreto no. Respecto a la economía se considera de bajo costo, pues sus materiales se obtienen de excavaciones en el sitio de la presa o cerca de ella y generalmente con un mínimo de procesamiento.

Por otro lado, la desventaja principal que podemos mencionar respecto a estas presas es que pueden dañarse o hasta destruirse por los efectos de la erosión del agua que debido a la insuficiencia de la altura o capacidad del vertedor se podría llegar a desbordar.

Las presas de materiales graduados se dividen en dos categorías principales que son las siguientes:

- *Presa de tierra:* Se conforma en más del 50% de materiales térreos donde encontramos tamaños de roca de gravas o menores.

Algunas presas antiguas de este tipo se les conocía como presas de relleno hidráulico en las cuales se utilizó agua como medio de transporte del material para el terraplén hasta su posición final en la presa. El proceso que se sigue da como resultado un terraplén con un núcleo relativamente impermeable.

En este tipo de construcción tenemos problemas importantes como el desarrollo de altas presiones de poro en el núcleo debido a que el relleno se encuentra saturado al colocarse, lo que hace susceptible al terraplén.

- *Presa de enrocamiento:* Constituido en más del 50% de materiales de roca con tamaños correspondientes a cantos rodados o mayores. Consta de dos componentes estructurales básicos, una membrana impermeable y una zona de enrocamiento que la va a soportar. Se pueden clasificar basándose en las características de la membrana dentro de diafragma y del núcleo central.

### 2.3.2 Presas de Concreto

Este tipo de presas se caracterizan por estar construida a partir de concreto colado en el lugar o de concreto compactado con rodillo.

Las presas de concreto en comparación con las de materiales graduados son más esbeltas y aplican cargas concentradas en los empotramientos y cimentación.

Para la construcción de éstas es necesario que la cimentación sea sólida sin fallas, ni grietas y que este libre de algún tipo de alteración que pueda influir en la resistencia. Es común creer que las estructuras de concreto tiene mayor permanencia que las de material graduado, sin embargo en presencia de una falla importante suele tener consecuencias más catastróficas.

Tenemos que se pueden dividir en tres tipos de estructura: de gravedad, de contrafuertes o machones y de arco, así mismo tenemos que los primero dos se pueden construir como presas compuestas, ya que se integran secciones de materiales graduados que flanquean la porción de concreto.

- *Presas de gravedad de concreto:*

Esta considerada de mayor durabilidad y sus exigencias de mantenimiento son mínimas. El peso de este tipo de presa es el encargado de resistir el empuje del agua, el cual es transmitido hacia el suelo, debido a lo cual éste debe ser muy estable.

Este tipo de presas es común, ya que su diseño y construcción es más sencillo. La forma triangula en sección transversal es una característica predominante en éstas. Para soportar las cargas del embalse y transferir las cargas a la cimentación es importante su peso y geometría. Las subpresiones es un problema realmente grave debido a que puede debilitar la cimentación y generar la falla de la presa por volteamiento o deslizamiento.

Para que el sitio donde se desplanten sea el adecuado debe ser ancho con un fondo de cañón relativamente plano.

- *Presas de contrafuerte:*

A este tipo de presa también se le conoce como presa de machones, son las que dependen del peso propio y el del agua para poder mantener su estabilidad. Se constituyen por dos elementos estructurales, un paramento impermeable aguas arriba y una serie de machones o muros casi verticales que lo van a sostener y transferir la carga hacia la cimentación.

Generalmente es de losa plana cuyo paramento aguas arriba es de concreto reforzado, sin embargo las configuraciones pueden variar, encontrándose presas con losas de otras características como son las de arco.

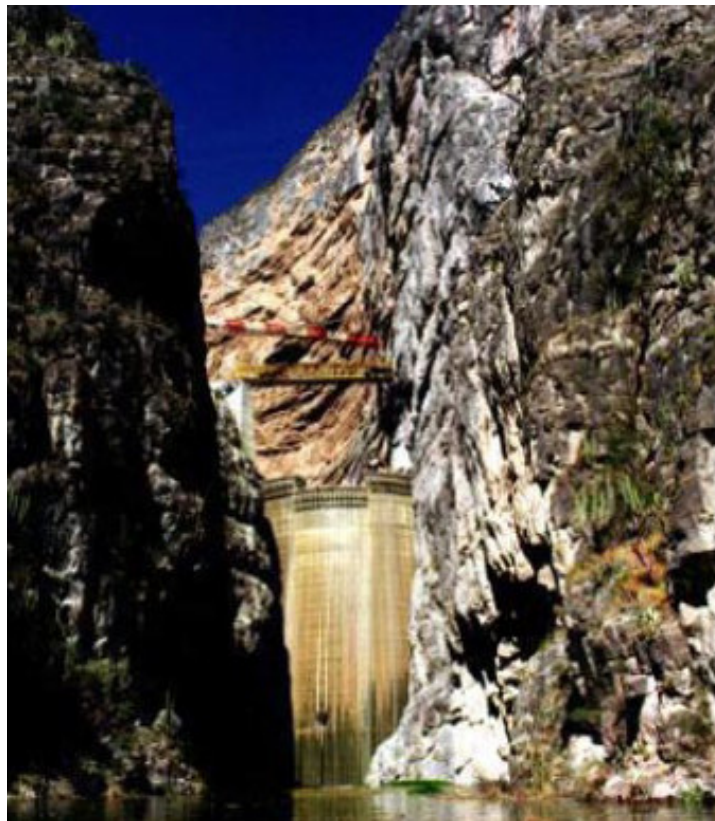
Las presas de contrafuerte tienen una losa delgada que se encarga de pasar la carga del embalse a los machones y en términos generales deben construirse sobre una cimentación de roca. En caso de que sea de poca altura se permite la construcción sobre roca alterada o materiales térreos siempre y cuando se utilicen losas de zapatas para mantener la capacidad de carga dentro de los límites permisibles.

Finalmente es importante mencionar que el costo de la construcción de estas presas es elevado debido al precio en que sale levantar las cimbras necesarias para estas estructuras.

- *Presas de arco:*

Normalmente es más delgada que una presa de gravedad, se construyen de concreto masivo y con una curvatura hacia aguas arriba. Debido a este diseño transmiten la carga del embalse a las paredes de cañón, lo que nos ayuda a optimizar por mucho su estabilidad. Una de sus desventajas es la disminución de seguridad debido a que tienen un espesor reducido y podría darse un sobre esfuerzo del concreto, así como una infiltración.

Las presas de arco deben construirse sobre roca sana y durable, en el caso que la roca esté deteriorada o existan fisuras, fallas, grietas etc. deben eliminarse y sustituirse por una de concreto. Respecto a la geometría del cañón debe ser preferentemente en V, ya que, la distribución de esfuerzos es más aceptable que en uno de geometría en U debido a que la parte baja de la presa por efecto del arco resiste mayor carga.



Fotografía 1. P.H. Zimapán Hidalgo. Presa de arco. Foto presentada por el Dr. Humberto Marengo.

### 2.3.3 Presas Compuestas

Las presas compuestas o mixtas se construyen combinando el concreto de gravedad o machones con materiales graduados, estos últimos pueden ser de tierra o de enrocamiento. Tiene las ventajas de ambo tipos de presas; poder actuar como vertedor en caso de las de concreto, lo que da seguridad al sobrepasarlas y el bajo costo como en el caso de las de materiales graduados, debido a que los materiales se obtienen de forma local.

Los valles amplios, llanuras o sitios donde se juntan planicies con montañas son los ideales para la construcción de estas presas mixtas, aunque raras veces se usan terrenos montañosos.



Fotografía 2. P.H. La Yesca. Presa de enrocamiento con cara de concreto.  
Foto bajada de la red de la página [www.cfe.gob](http://www.cfe.gob).

### 2.3.4 Componentes Principales de las Presas

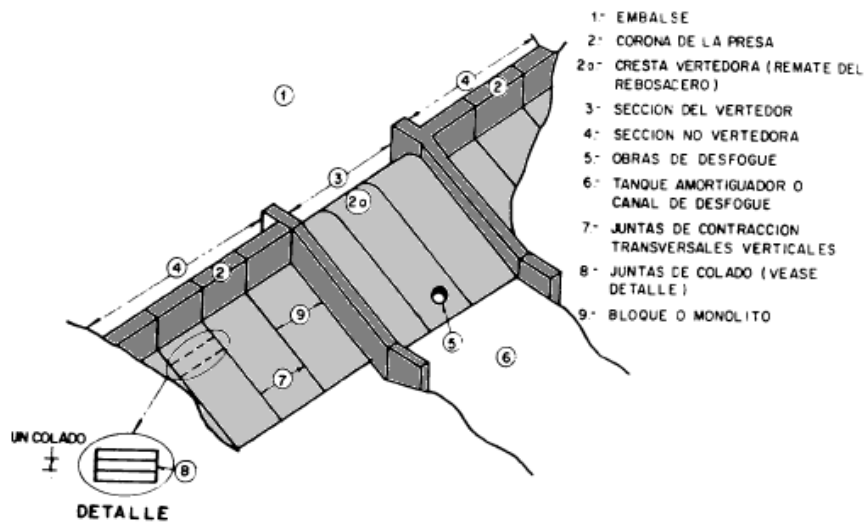


Fig. 6 Partes de una presa típica de concreto. Figura tomada del Manual módulo- inspección de presas de concreto y mampostería

Es importante mencionar los componentes principales de los que deben constar las presas, en general son similares en ambos grupos aunque en las presas de concreto se tengan unos cuantos más. A continuación se mencionarán las partes relevantes:

#### *Corona.*

Superficie superior de la cortina que forma parte de la protección de la presa contra oleaje y sismos. Generalmente la cruza una vía de tránsito, ya que es necesario el paso de vehículos así como para facilitar la inspección y mantenimiento de la maquinaria.

#### *Talud de aguas arriba y de aguas abajo.*

Llamamos talud de aguas arriba a la superficie inclinada de la presa que está en contacto con el embalse (cuerpo de agua captado por la presa) y el de aguas abajo tiene la misma definición sólo que se encuentra opuesta al embalse. Ambos requieren una protección contra la acción erosiva (oleaje o lluvia según sea el caso), ésta puede ser el pasto y en el de aguas arriba también podemos colocar un enrocamiento.

#### *Empotramiento:*

Es la zona de la ladera en la cual descansan los extremos de la presa, generando un punto de contacto entre ambas, al cual se le conoce como aristas. En este componente es importante cuidar la erosión por escurrimientos y las filtraciones.

### *Estructuras de conducción de agua:*

- Vertedor: Es la estructura por la cual se descargan las avenidas desde el embalse. El vertedero puede ser de tipo controlado o no, depende si se utilizan medios mecánicos como compuertas para regular el paso del agua.
- Obras de desfogue: Estructuras que se utilizan para hacer las descargas normales del embalse, así como el vaciado del mismo.
- Tuberías de presión: En caso de que la presa tenga planta generadora se requiere de estos conductos de presión que corren del embalse a la casa de máquinas.

Para las presas de concreto también son importantes las juntas las cuales usualmente se utilizan en las estructuras de concreto y son de tres tipos, juntas de expansión, contracción y construcción.

Las de contracción evitan la formación de grietas de tensión debidas a la contracción volumétrica ocasionada por las bajas temperaturas. Las de expansión son utilizadas para el ajuste de la estructura de concreto a la expansión volumétrica debida a las altas temperaturas. Finalmente las juntas de construcción se crean al colocar concreto nuevo en una colada previa, deben prepararse y tratarse durante la construcción lo que nos da una mejor adhesión de las coladas sucesivas.



Fotografía 3. Panorámica del C.H. El Cajón, Nayarit. Foto presentada por el Dr. Humberto Marengo.